

# Projeto de Graduação



16 de Dezembro de 2022

## **SIMULAÇÃO DE CURTO-CIRCUITO COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E DIMENSIONAMENTO E AJUSTE DE PROTEÇÃO UTILIZANDO O OPENDSS**

Daniel de Faria e Cunha Carvalho





**SIMULAÇÃO DE CURTO-CIRCUITO COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E DIMENSIONAMENTO E AJUSTE DE PROTEÇÃO UTILIZANDO O OPENDSS**

**Aluno: Daniel de Faria e Cunha Carvalho**

**Orientador: Delberis Araujo Lima**

Trabalho apresentado como requisito parcial à conclusão do curso de Engenharia Elétrica na Pontifícia Universidade Católica do Rio Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

## **Agradecimentos**

Agradeço em primeiro lugar a Deus e a minha família pelo apoio emocional e financeiro. Além disso, agradeço também ao professor Delberis pelo apoio no projeto final de graduação. E agradeço aos meus amigos que me ajudaram nessa trajetória.

## Resumo

As inovações no ramo elétrico trouxeram não apenas grandes vantagens, mas também preocupações quanto a proteção do sistema elétrico. Painéis fotovoltaicos, mini e micro geradores, energia eólica, todas são formas alternativas de se gerar energia e que tem até certo ponto grandes vantagens, porém quais os impactos reais que essas chamadas gerações distribuídas têm no sistema como um todo? O projeto pretende realizar simulações de curto-circuito para avaliar qual o impacto da geração distribuída no cálculo de curto-circuito. Além disso pretende-se, a partir disso, observar qual o impacto na proteção também.

**Palavras-chave: Curto-circuito, Curto-circuito, Geração de Energia**

## **SHORT-CIRCUIT SIMULATION WITH DISTRIBUTED GENERATION AND SIZING AND PROTECTION ADJUSTMENT USING OPENDSS**

### **Abstract**

How innovations in the electrical field brought not only great advantages, but also concerns about the protection of the electrical system. Photovoltaic panels, mini and micro generators, wind energy, all are alternative ways of generating energy and that have, to some extent, great advantages, but what are the real effects that these generation chambers have on the whole system?

The work intends to carry out short-circuit simulations to assess the impact of distributed generation on the short-circuit calculation. In addition, pretend, from this, observe what impact on protection too.

**Keywords: Fault, Distributed, Distributed**

## Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>2</b>
a	Geral . . . . .	2
b	Objetivo . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Teoria</b>	<b>3</b>
a	Curto-Circuito . . . . .	3
b	Proteção de Sistemas Elétricos de Potência . . . . .	5
1	Elos Fusíveis . . . . .	6
2	Relés . . . . .	6
3	Religadores . . . . .	8
4	Coordenação de dispositivos . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Desenvolvimento</b>	<b>12</b>
a	Sistema IEEE 13 Barras . . . . .	12
b	Proteção sistema IEEE 13 Barras . . . . .	13
1	Bloco 1 . . . . .	13
2	Bloco 2 . . . . .	19
3	Bloco 3 . . . . .	21
4	Bloco 4 . . . . .	25
<b>4</b>	<b>OpenDSS</b>	<b>28</b>
a	Básico . . . . .	28
b	Simulações e Comparação com GD . . . . .	28
<b>5</b>	<b>Conclusão &amp; Trabalhos Futuros</b>	<b>38</b>
	<b>Referências</b>	<b>39</b>

## Lista de Figuras

1	Componentes Simétricas - Fonte: Elaborado pelo autor . . . . .	3
2	Componentes Simétricas separados por sequências - Fonte: Elaborado pelo autor . . . . .	4
3	Curva de tempo corrente relés de sobrecorrente - Fonte: Proteção do Sistema Elétrico de Potência . . . . .	7
4	Religadores - Fonte: Proteção de Sistemas Elétrico de Potência . . . . .	9
5	Coordenação Elos Fusíveis - Fonte: Apostila de Proteção de Sistemas Elétricos de Potência . . . . .	10
6	Sistema IEEE 13 Barras – Fonte: IEE Power Engineering Society . . . . .	12
7	Sistema IEEE 13 Barras com Proteção – Fonte: IEE Power Engineering Society e elaborado pelo autor . . . . .	12
8	Recorte IEEE 13 Barras Bloco 1 -Fonte: IEE Power Engineering Society e elaborado pelo autor . . . . .	13
9	Curva tempo corrente elos fusíveis tipo K - Fonte: Proteção de Sistemas Elétricos de Potência . . . . .	17
10	Curva de múltiplos de corrente por tempo dos relés - Fonte: Proteção de Sistemas Elétricos de Potência . . . . .	18
11	Curva de múltiplos de corrente por tempo dos relés - Fonte: Proteção de Sistemas Elétricos de Potência . . . . .	18
12	Recorte IEEE 13 Barras Bloco 2 - Fonte: IEE Power Engineering Society e elaborado pelo autor . . . . .	19
13	Curva de múltiplos de corrente por tempo dos relés - Fonte: Proteção de Sistemas Elétricos de Potência . . . . .	21
14	Recorte IEEE 13 Barras Bloco 3 - Fonte: IEE Power Engineering Society e elaborado pelo autor . . . . .	22
15	Curva de tempo corrente elo fusível tipo K - Fonte: Proteção de Sistemas Elétricos de Potência . . . . .	23
16	Coordenação Elos Fusíveis Tipo K e H - Fonte: Proteção de Sistemas Elétricos de Potência . . . . .	24
17	Coordenação Elos Fusíveis Tipo K e H - Fonte: Proteção de Sistemas Elétricos de Potência . . . . .	25
18	Recorte IEEE 13 Barras Bloco 4 - Fonte: IEE Power Engineering Society e elaborado pelo autor . . . . .	25
19	Print MATLAB - Fonte: Trabalho de Conclusão de Cuso da PUC-Rio . . . . .	27
20	Esquema Painel Fotovoltaico no OpenDSS - Fonte: Documentação OpenDSS . . . . .	28
21	Diferença entre correntes de curto para três fases sem GD e com GD - Fonte: Elaborado pelo autor . . . . .	29
22	Recorte IEEE 13 Barras com painel fotovoltaico no OpenDSS - Fonte: OpenDSS e elaborado pelo autor . . . . .	31
23	Gráfico IEEE 13 Corrente Barra 684 sem geração distribuída - Fonte: OpenDSS . . . . .	31
24	Gráfico IEEE 13 Corrente Barra 684 com geração distribuída - Fonte: OpenDSS . . . . .	32
25	Gráfico IEEE 13 Corrente Barra 684 com geração distribuída ajustado - Fonte: OpenDSS . . . . .	32
26	Gráfico IEEE 13 Corrente Barra 671 Fase 1 sem geração distribuída - Fonte: OpenDSS . . . . .	33
27	Gráfico IEEE 13 Corrente Barra 671 Fase 2 sem geração distribuída - Fonte: OpenDSS . . . . .	33
28	Gráfico IEEE 13 Corrente Barra 671 Fase 3 sem geração distribuída - Fonte: OpenDSS . . . . .	34
29	Gráfico IEEE 13 Corrente Barra 671 Fase 1 com geração distribuída - Fonte: OpenDSS . . . . .	34
30	Gráfico IEEE 13 Corrente Barra 671 Fase 2 com geração distribuída - Fonte: OpenDSS . . . . .	35
31	Gráfico IEEE 13 Corrente Barra 671 Fase 3 com geração distribuída - Fonte: OpenDSS . . . . .	35
32	Gráfico IEEE 13 Corrente Barra 671 Fase 1 com geração distribuída ajustado - Fonte: OpenDSS . . . . .	36
33	Gráfico IEEE 13 Corrente Barra 671 Fase 2 com geração distribuída ajustado - Fonte: OpenDSS . . . . .	36
34	Gráfico IEEE 13 Corrente Barra 671 Fase 3 com geração distribuída ajustado - Fonte: OpenDSS . . . . .	37

### Lista de Tabelas

1	Coordenação Elos Fusíveis Tipo K e H - Fonte: Apostila de Proteção de Sistemas Elétricos de Potência . . . . .	10
2	Coordenação Elos Fusíveis Tipo K - Fonte: Apostila de Proteção de Sistemas Elétricos de Potência . . . . .	10
3	Coordenação Elos Fusíveis Tipo K - Fonte: Apostila de Proteção de Sistemas Elétricos de Potência . . . . .	10
4	Coordenação Elos Fusíveis Tipo K e H - Fonte: Apostila de Proteção de Sistemas Elétricos de Potência . . . . .	14
5	Correntes de curto-circuito barras 611 e 652 - Fonte: OpenDSS . . . . .	14
6	Relação Corrente Nominal e Relação Nominal - Fonte: Proteção de Sistemas Elétricos de Potência . . . . .	15
7	Relação Corrente Nominal e Relação Nominal - Fonte: Proteção de Sistemas Elétricos de Potência . . . . .	19
8	Definição de curva tempo corrente no OpenDSS - Fonte: Documentação OpenDSS	28
9	Definição de elo fusível no OpenDSS - Fonte: Documentação OpenDSS . . . . .	29
10	Definição de elo fusível no OpenDSS - Fonte: Documentação OpenDSS . . . . .	29
11	Definição de elo fusível no OpenDSS - Fonte: Documentação OpenDSS . . . . .	30
12	Definição de falta no OpenDSS - Fonte: Documentação OpenDSS . . . . .	30

## 1 Introdução

### a Geral

A energia elétrica que chega na casa dos consumidores passa por uma série de processos e elementos, a esse conjunto dá-se o nome de Sistema Elétrico de Potência. De forma resumida, a energia gerada em hidrelétricas, termelétricas e de outras maneiras alternativas como eólica, fotovoltaica etc. é transportada por meio das linhas de transmissão, que são responsáveis por transmitir valores de alta tensão, e após essa etapa a energia chega nas cidades, precisando ser transformada para média tensão nas subestações, o que é realizado por transformadores. Por fim a corrente flui pelas linhas de distribuição, chegando às casas dos consumidores, sendo antes transformadas novamente.

No entanto, no decorrer da transmissão ou distribuição, há a possibilidade de ocorrer algum acidente ou desastre natural, e algum poste ou linha ser comprometido. O comprometimento das linhas cria uma condição anormal no sistema e, por conseguinte, uma série de outros problemas acontecem. Um deles é a elevação das correntes que fluem pelas linhas devido às faltas em uma, duas ou todas as fases. A esse fenômeno dá-se o nome de curto-circuito.

Vale ressaltar, no entanto, que nos últimos anos esse fluxo tem alterado, pois a geração pode ocorrer em escalas menores em locais mais próximos dos consumidores, o que de certa forma traz uma vantagem ao consumidor em termos de não depender de transmissão e distribuição. A todo esse movimento de geração de energia elétrica mais próxima aos consumidores dá-se o nome de Geração Distribuída. Dentre alguns exemplos típicos de geração distribuída pode-se citar a energia proveniente de painéis fotovoltaicos, a energia eólica ou mesmo a utilização de baterias.

Portanto, é importante avaliar como a corrente de curto-circuito se comporta pois ela pode acabar danificando equipamentos do sistema elétrico de potência que não estão preparados para receber uma carga alta e, por consequência, prejudicar o fornecimento de energia elétrica aos consumidores.

### b Objetivo

O presente trabalho visa entender como é o comportamento das chamadas correntes de curto-circuito, a fim de projetar elementos capazes de proteger o sistema elétrico de potência de eventuais faltas que possam ocorrer e reduzir os impactos gerados por essas condições. Além disso, buscará entender qual a diferença da proteção dos sistemas elétricos quando um tipo de geração distribuída é inserido na rede.

Para isso, será importante definir brevemente alguns conceitos chave no entendimento do assunto, além de utilizar um software livre chamado Open DSS que auxiliará no cálculo das correntes de curto e será responsável por simular as condições anormais para projetar o sistema de proteção conforme os resultados encontrados.

## 2 Teoria

### a Curto-Circuito

Um curto-circuito ocorre quando dois pontos de uma rede se conectam por meio de algum material condutor. A baixa impedância causada pelo curto-circuito faz com que haja uma elevação rápida da corrente na linha, ao que se dá o nome de corrente de curto-circuito.

Os curtos-circuitos podem ser classificados em três tipos considerando o número de fases: os curtos monofásicos, bifásicos e trifásicos. Os curtos-circuitos monofásicos ocorrem quando apenas uma fase do sistema deixa de operar em condições normais, o bifásico, quando são duas fases e o trifásico quando ocorre com três fases.

Em um sistema real os vetores de tensão e corrente não estão em completa simetria, por isso há de se encontrar um meio no qual pode – se simplificar o problema. Fortescue foi o responsável por desenvolver o método das Componentes Simétricas. A simplificação dos sistemas elétricos em impedâncias que podem ser ligadas em série facilitou muito o processo de cálculo de correntes de curto, por isso, no trabalho será utilizado esse método.

Ele é importante para o cálculo de curto pois as grandezas de um curto desequilibrado podem ser obtidas a partir de outros circuitos monofásicos.

Pelo teorema de Fortescue, temos que cada fasor de um conjunto de  $n$  fasores desequilibrados pode ser expresso pela soma de  $n$  fasores, sendo que cada um destes é de um sistema de fasores equilibrados de sequência de fases distintas e simétricas.

O que ocorre na prática é que o cálculo de um sistema trifásico assimétrico pode ser quebrado em três sistemas simétricos. Em circuitos trifásicos as tensões podem ser decompostas em três sistemas: o de sequência negativa, sequência positiva e sequência zero. Sendo que a componente de sequência positiva é constituída por três fasores de módulos iguais e defasados entre si de  $120^\circ$ , tendo a mesma sequência de fases do sistema original; a componente de sequência negativa é constituída por três fasores de módulos iguais e defasados entre si de  $120^\circ$ , tendo a sequência de fases inversa do sistema original; e por fim a componente de sequência zero, constituída por três fasores de módulos iguais e em fase.

Para representar as equações do que foi descrito acima é necessário introduzir o conceito de operador de fase  $a$ , que representa uma rotação de  $120^\circ$ , ou seja, quando um fasor multiplicar o operador de fase  $a$ , ele será rotacionado  $120^\circ$ . A representação de  $a$  se dá da seguinte forma:

$$e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}j \quad (1)$$

Tem – se abaixo a representação fasorial de um sistema desequilibrado que será decomposto em componentes simétricas:

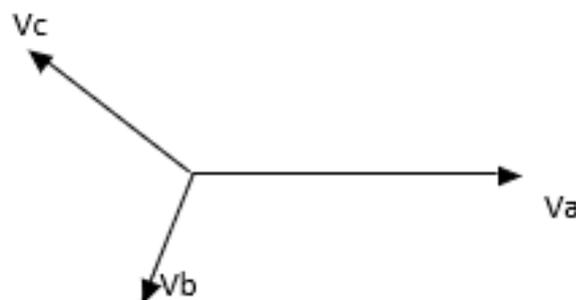


Figure 1: Componentes Simétricas - Fonte: Elaborado pelo autor

$$V_a = V_a^0 + V_a^1 + V_a^2 \quad (2)$$

$$V_b = V_b^0 + V_b^1 + V_b^2 \tag{3}$$

$$V_c = V_c^0 + V_c^1 + V_c^2 \tag{4}$$

Onde

é a tensão de sequência zero,

é a tensão de sequência positiva e

é a tensão de sequência negativa.

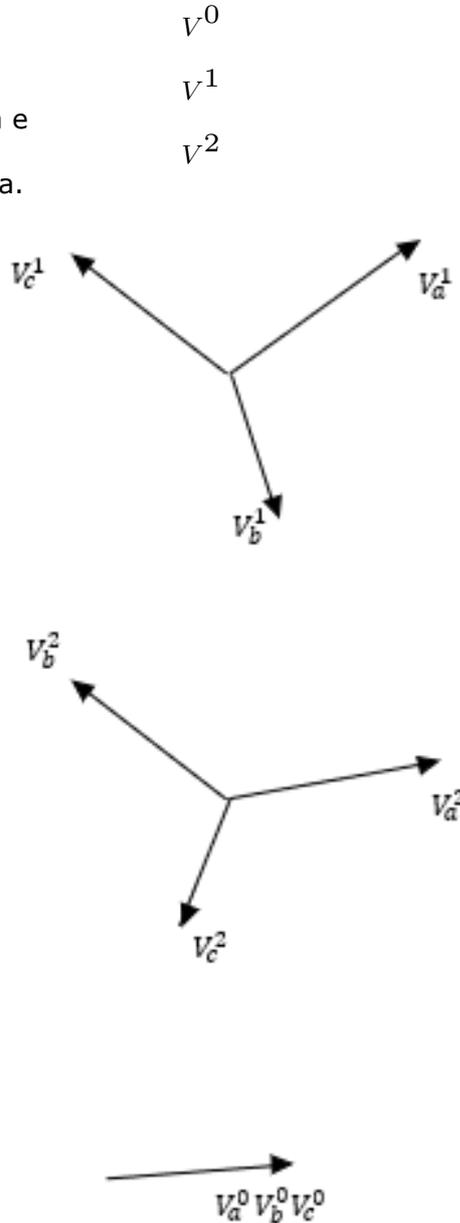


Figure 2: Componentes Simétricas separados por sequências - Fonte: Elaborado pelo autor

Representando os diagramas por meio das equações tem - se que:

$$V_b^1 = a^2 V_a^1 \tag{5}$$

$$V_c^1 = a V_a^1 \tag{6}$$

$$V_b^2 = a V_a^2 \tag{7}$$

$$V_c^2 = a^2 V_a^2 \quad (8)$$

Com isso, pode - se chegar na seguinte configuração matricial:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1a^2 & a & \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_a^0 \\ V_a^1 \\ V_a^2 \end{bmatrix}$$

A mesma relação pode ser estabelecida para as correntes:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1a^2 & a & \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_a^0 \\ I_a^1 \\ I_a^2 \end{bmatrix}$$

Invertendo a primeira matriz tem - se que:

$$\begin{bmatrix} V_a^0 \\ V_a^1 \\ V_a^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1a^2 & a & \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

Para entender como funciona uma falta, vamos supor que houve uma falta em uma determinada barra chamada i.

Sabe-se, pelo princípio da superposição e pelo teorema de Thévenin, que:

$$V_{i_{df}}^0 = V_{i_{antes\ da\ falta}}^0 + \Delta V_i^0 \quad (9)$$

$$V_{i_{df}}^1 = V_{i_{antes\ da\ falta}}^1 + \Delta V_i^1 \quad (10)$$

$$V_{i_{df}}^2 = V_{i_{antes\ da\ falta}}^2 + \Delta V_i^2 \quad (11)$$

Sendo "df" depois da falta.

O primeiro caso será o curto monofásico na fase a:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1a^2 & a & \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_a^0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Representado pela seguinte equação:

$$I_{fa}^0 = I_{fa}^1 = I_{fa}^2 = \frac{V_f}{Z_{kk}^0 + Z_{kk}^1 + Z_{kk}^2 + 3Z_f} \quad (12)$$

No caso do curto-circuito bifásico entre b e c tem - se que:

$$I_{fa}^1 = -I_{fa}^2 = \frac{V_f}{Z_{kk}^1 + Z_{kk}^2 + Z_f} \quad (13)$$

## b Proteção de Sistemas Elétricos de Potência

A função principal do sistema de proteção é guardar a integridade dos equipamentos, além de proteger as pessoas que estão ao redor. Além disso, quando se fala de curto, ele deve tirar de operação os equipamentos de que estão sobre o efeito de correntes curto-circuito.

Um fator importante que define a eficácia de um bom sistema de proteção é a seletividade. Ela determina que apenas a área onde houve o problema seja isolada e em seguida seja feito o devido reparo, sem prejudicar outras áreas que estão ao redor e necessitam de energia elétrica.

As principais características de um sistema elétrico de proteção são:

- Sensibilidade – detectar faltas, no menor nível de corrente de curto-circuito possível, assumindo uma condição real de operação.
- Seletividade – selecionar, dentre os possíveis estados aqueles para o quais ele deve operar. Esse ponto é importante pois eventualmente se mal ajustado o dispositivo pode operar para correntes que não são de curto-circuito.
- Velocidade – deve ser rápido o suficiente para operar na velocidade necessária para realizar a proteção.

Os principais equipamentos responsáveis pela proteção do sistema são os relés, disjuntores, transformadores de corrente e potencial e fusíveis. Além dos religadores e seccionadores. Há de se definir quais são as zonas de proteção, pois dessa forma consegue-se garantir a seletividade e coordenação. Segundo [livro de proteção] é necessário definir uma zona primária e uma zona secundária, sendo a primária a que realizará a proteção principal e a secundária a que ficará responsável por fazer a proteção de retaguarda.

Em geral, os sistemas de distribuição a coordenação se dão por meio da temporização de dois ou mais elementos, os quais podem ser relés, religadores, seccionadores e fusíveis. O ato de coordenar é, na verdade, a coordenação temporal dos dispositivos de proteção para que cada um haja no momento correto, evitando que inúmeras ramificações do sistema de distribuição fiquem prejudicadas por falta de energia elétrica.

## 1 Elos Fusíveis

Os elos fusíveis são dispositivos que protegem o sistema elétrico de potência das seguintes maneiras: isolando completamente a rede elétrica sob falta pelo rompimento do seu filamento interno; sendo capaz de eliminar adequadamente o arco elétrico; mantendo a rede elétrica aberta, mesmo com tensão nominal aplicada em seus terminais.

Chaves fusíveis são os elementos mais utilizados na proteção de redes de distribuição urbanas e rurais, por apresentar preços reduzidos e desempenho satisfatório para o nível de proteção que se deseja.

Os elos são dispositivos que são classificados segundo a sua velocidade de atuação. Os elos podem ser organizados em tipos:

1. Tipo K – Elos com o SR(Speed Ratio) variando entre 6 e 8, que possuem capacidade de sobrecarga de 50% do seu valor nominal.
2. Tipo T – elos fusíveis com SR variando entre 10 e 13, que também suportam uma sobrecarga de 50
3. Tipo H – suportam elevada sobrecorrente e, ainda assim, asseguram uma alta temporização de operação.

Com o objetivo de dimensionar elos fusíveis para redes de distribuição tem – se que atender a um critério: a corrente nominal de um elo fusível de um ramal deverá ser igual ou maior que 1,5 vezes o valor de corrente de carga máxima. E para que haja a coordenação correta entre dois elos fusíveis a capacidade nominal do elo protetor( elo que está a jusante) deve ser, no máximo um quarto da corrente de curto-circuito fase-terra mínimo no fim do trecho protegido por ele, além disso o elo protegido( elo que está a montante) deverá coordenar com o elo protetor para, pelo menos, o valor de corrente de curto-circuito fase-terra mínimo no ponto de instalação do elo protetor. [1]

## 2 Relés

Os relés são dispositivos que são utilizados como proteção tanto principal quanto de retaguarda de redes primárias de proteção. Eles possuem uma vantagem principal que é não necessitam de transformadores redutores pois estão ligados diretamente aos circuitos que fazem a proteção. Dentre os tipos de relés podemos citar os: sobrecorrente, direcional, de distâncias e piloto. O funcionamento do relé ocorre em algumas etapas que serão elencadas abaixo:

Inicialmente determina-se as condições normais e excepcionais de operação do sistema. Como ocorre a coordenação entre dois relés, sendo um da zona primária e outro que fica na zona secundária?

1. A falta ocorre em um tempo  $t = 0$ .
2. O sistema de proteção da zona primário detecta a falta no tempo  $t_1$ , que ocorre depois do tempo  $t = 0$ ;
3. O sistema de proteção da zona primária é acionado  $t_2$ , interrompendo a falta que ocorre depois do tempo  $t_1$ ;
4. O sistema de proteção da zona secundária observa que houve a falta, mas não faz nada pois "dá a oportunidade" do sistema de proteção da zona do primário de tentar mitigar o problema.
5. Caso a zona primária não consiga, a zona secundária entra em ação no tempo  $t_3$ .

É importante notar que o tempo de operação de relés de sobrecorrente varia com a magnitude de corrente. Os relés que foram utilizados no trabalho foram escolhidos pois são adequados para sistemas de distribuição e transmissão pois são robustos, além de que oferecem um bom custo-benefício quando comparado com outros dispositivos de proteção. [2]

Os dois principais ajustes que devem ser feitos no relé são o da corrente limiar e da alavanca de tempo, que definirá a curva de tempo corrente do relé. No ajuste de corrente limiar há uma regra que diz que o valor dela deve ser maior que a corrente máxima de carregamento da linha por motivos de segurança.

Em geral, as características de respostas dos relés de sobrecorrente são alocadas em função do tempo (segundos) versus o valor normalizado da corrente máxima de curto-circuito para cada posição da alavanca.

A seguir foram levantados alguns possíveis tipos de curva de tempo corrente características dos relés. A escolha de um tipo de entre elas dependerá das necessidades que o sistema exigirá quando se fala em proteção.

1. Tempo mínimo definido(a);
2. Tempo moderadamente inverso(b);
3. Tempo inverso(c);
4. Tempo muito inverso(d);
5. Tempo extremamente inverso(e);

Equação:

$$T_{op} = \frac{k}{I_{cc(normalizado)}^\alpha - 1} \times AT$$

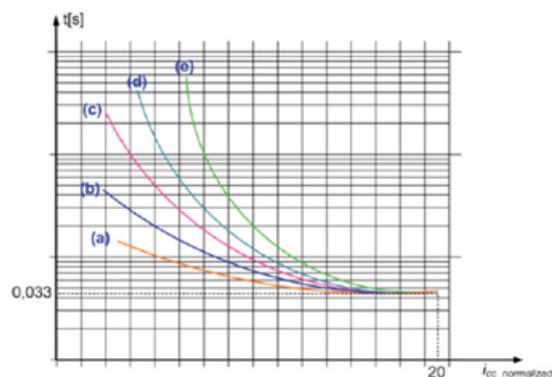


Figure 3: Curva de tempo corrente relés de sobrecorrente - Fonte: Proteção do Sistema Elétrico de Potência

Com os valores de alfa e k já definidos, e os tempos também, pode-se determinar qual relé será ativado primeiramente e qual será acionado depois. Existem vários tipos de relés, dentre eles citam-se: relé de sobrecorrente (51), direcional (67), e de distância (21). Os números indicados entre parênteses são números que caracterizam a função destes relés.

Como o nome já indica, o relé de sobrecorrente é projetado para operar quando a magnitude da corrente de falta, que flui por um alimentador ou ramal, atinge um valor superior à corrente de sensibilização do relé.

Se o relé está ligado para a proteção de fase, as suas unidades são conhecidas como 50 e 51 de fases. No caso de estar realizando a proteção de neutro ou terra, fala-se em unidades 50 e 51 de neutro ou terra.

A corrente mínima de atuação deverá ser ajustada em um valor menor do que a corrente de curto-circuito bifásico dentro da sua zona de proteção, incluindo sempre que possível os trechos a serem adicionados quando em condição de manobras consideradas usuais. Um artifício muito poderoso utilizado para diferentes tipos de dispositivos é a curva que mostra o tempo pela corrente, ou chamada de curva tempo corrente. Vale lembrar que para fins de proteção elétrica o curto-circuito gera uma corrente extremamente elevada que atravessa os geradores, podendo causar a destruição destes.

A equação da primeira Lei de Ohm dá uma noção do que ocorre no caso da corrente de curto, pois mostra que para um mesmo valor de tensão com uma baixa impedância a corrente será muito alta. Na proteção contra um curto-circuito de tempo dependente há de se definir inicialmente a curva de tempo corrente inversa, onde o tempo de disparo do relé depende do valor da corrente que circula no sistema.

Quando se fala em relés de sobrecorrente, que é o que será utilizado no trabalho tem – se de pensar em unidades 50 de fase e neutro e unidade 51 de fase e de neutro. O ajuste da unidade 51 de fase do relé é feita da seguinte forma:

$$I_{min(51F)}^{AT} \leq \frac{I_{cc-bifasico(max)}}{RTC} \quad (14)$$

$$I_{min(51F)}^{AT} \geq \frac{I_{carga(max)}}{RTC} \times k \quad (15)$$

Sendo que  $I_{min(51F)}^{AT}$  é a corrente mínima de atuação para unidade 51 de fase.

O ajuste da unidade 50 de fase do relé é feita da seguinte forma:

$$I_{min(50F)}^{AT} \geq \frac{I_{carga(max)}}{RTC} \times 3 \quad (16)$$

$$I_{min(50F)}^{AT} \geq \frac{I_{cc(3\phi)}}{RTC} \times f \quad (17)$$

O ajuste da unidade 51 de neutro do relé é feita da seguinte forma:

$$I_{min(51N)}^{AT} \leq \frac{I_{cc(\phi-T-min)}}{RTC} \quad (18)$$

$$I_{min(51N)}^{AT} \geq \frac{I_{carga(max)}}{RTC} \times k \times 0.1 \quad (19)$$

Sendo que  $I_{min(51N)}^{AT}$  é a corrente mínima de atuação para a unidade 51 de neutro.

O ajuste da unidade 50 de neutro do relé é feita da seguinte forma:

$$I_{min(50N)}^{AT} \geq \frac{I_{carga(max)}}{RTC} \times 0.8 \quad (20)$$

$$I_{min(50N)}^{AT} \geq \frac{I_{cc(\phi-T-min)}}{RTC} \times f \quad (21)$$

### 3 Religadores

Os elos fusíveis durante um tempo exerceram um papel importante ao sistema elétrico de potência por possuírem um custo baixo e terem grande efetividade na proteção, porém com o tempo algumas características negativas foram sendo notadas: quando eles fundiam alguém tinha que ir lá fazer manutenção e trocar, o que demandava tempo e dinheiro; as curvas tempo corrente alteravam ao longo do tempo devido ao envelhecimento; não conseguem fazer distinção entre defeitos transitórios e permanentes. Por isso foi desenvolvido um aparelho que

é capaz de realizar uma série de religamentos com o objetivo de conferir se a falta é transitória ou permanente.



Figure 4: Religadores - Fonte: Proteção de Sistemas Elétrico de Potência

Os religadores são dispositivos capazes de detectar uma falta interromper um circuito se a sobrecorrente persistir após um intervalo de tempo predeterminado e, após testes de verificação, religar automaticamente o circuito. O dispositivo ao sentir uma condição de sobrecorrente, interrompe o circuito, religando automaticamente, após um tempo predeterminado. Se perceber, no momento do religamento, que o defeito ainda persiste, repete a sequência "disparo x religamento", até três vezes consecutivas. Após o quarto disparo, o mecanismo de religamento é travado, deixando aberto o circuito.

No geral os religadores são projetados para contagem e registro de até três operações de fechamento e depois de uma abertura final eles bloqueiam a sequência de abertura/fechamento. Eles podem ser instalados no sistema elétrico de potência em ramos laterais que emergem dos alimentadores, caso ocorra uma falta os outros.

As curvas de temporização de fase e de neutro devem ser escolhidas para coordenar com equipamentos à montante e à jusante. As operações temporizadas permitirão abertura do elo quando o defeito for permanente. Os tempos de religamentos são definidos em função da coordenação com os demais equipamentos.

E o tempo de rearme, que é o momento em que o religador volta a fazer a contagem depois dos religamentos, deve ser  $1,1 \times$  tempo total de todas as operações de abertura para corrente de disparo mais  $1,15 \times$  somatório dos tempos de intervalo de religamento.

#### 4 Coordenação de dispositivos

Como descrito na teoria acima é necessário realizar a coordenação entre os dispositivos para que atuem da maneira correta em sua respectiva zona de proteção sem afetar o desempenho de outros equipamentos elétricos. Por isso há a necessidade de se entender como realizar a coordenação dos dispositivos propostos para o sistema IEE 13 Barras.

- Coordenação Elo Fusível x Elo Fusível

Para que haja a correta coordenação entre dois elos fusíveis o elo que está a montante deve ter uma capacidade nominal maior do que 1,5 vezes o valor máximo da corrente de carga medida no ponto de instalação. A capacidade nominal do elo fusível a jusante (protetor) deverá ser no máximo  $\frac{1}{4}$  da corrente de curto-circuito fase-terra mínimo no fim do trecho protegido por ele; e por fim o elo a montante (protegido) deverá coordenar com o elo protetor para pelo menos a corrente de curto-circuito fase-terra mínimo no ponto de instalação do elo protetor. [3]

Com o objetivo de facilitar a coordenação entre os elos fusíveis e não ser necessário fazer tantos cálculos e procedimentos utiliza – se também as tabelas de elos fusíveis que se seguem:

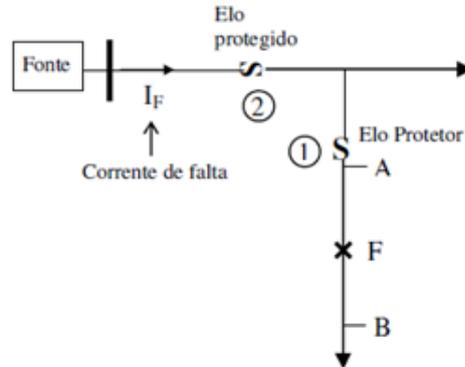


Figure 5: Coordenação Elos Fusíveis - Fonte: Apostila de Proteção de Sistemas Elétricos de Potência

Elo protetor	Elo protegido													
	8K	10K	12K	15K	20K	25K	30K	40K	50K	65K	80K	100K	140K	200K
1H	125	280	380	510	650	840	1060	1350	1700	2200	2800	3900	5800	9200
2H		45	220	450	650	840	1060	1350	1700	2200	2800	3900	5800	9200
3H		45	220	450	650	840	1060	1350	1700	2200	2800	3900	5800	9200
5H		45	220	450	650	840	1060	1350	1700	2200	2800	3900	5800	9200
8H		45	220	450	650	840	1060	1350	1700	2200	2800	3900	5800	9200

Table 1: Coordenação Elos Fusíveis Tipo K e H – Fonte: Apostila de Proteção de Sistemas Elétricos de Potência

Elo protetor	Elo protegido													
	8T	10T	12T	15T	20T	25T	30T	40T	50T	65T	80T	100T	140T	200T
1H	400	520	710	920	1200	1500	2000	2540	3200	4100	5000	6100	9700	15200
2H	240	500	710	920	1200	1500	2000	2540	3200	4100	5000	6100	9700	15200
3H	240	500	710	920	1200	1500	2000	2540	3200	4100	5000	6100	9700	15200
5H	240	500	710	920	1200	1500	2000	2540	3200	4100	5000	6100	9700	15200
8H	240	500	710	920	1200	1500	2000	2540	3200	4100	5000	6100	9700	15200

Table 2: Coordenação Elos Fusíveis Tipo K - Fonte: Apostila de Proteção de Sistemas Elétricos de Potência

Elo protetor	Elo protegido													
	8K	10K	12K	15K	20K	25K	30K	40K	50K	65K	80K	100K	140K	200K
6K		190	350	510	650	840	1060	1340	1700	2200	2800	3900	5800	9200
8K			210	440	650	840	1060	1340	1700	2200	2800	3900	5800	9200
10K				300	540	840	1060	1340	1700	2200	2800	3900	5800	9200
12K					320	710	1050	1340	1700	2200	2800	3900	5800	9200
15K						430	870	1340	1700	2200	2800	3900	5800	9200
20K							500	1100	1700	2200	2800	3900	5800	9200
25K								660	1350	2200	2800	3900	5800	9200
30K									850	1700	2800	3900	5800	9200
40K										1100	2200	3900	5800	9200
50K											1450	3500	5800	9200
65K												2400	5800	9200
80K													4500	9200
100K														2000
140K														4000

Table 3: Coordenação Elos Fusíveis Tipo K - Fonte: Apostila de Proteção de Sistemas Elétricos de Potência

- Coordenação Elo Fusível x Religador

Como há um religador a montante de alguns elos fusíveis, será feita a coordenação do religador com o elo fusível. A teoria diz que em termos de corrente de curto – circuito máxima: para todos os valores de corrente de falta que fluem pelo elo fusível, o tempo mínimo de fusão do elo deve ser superior ao tempo de atuação do religador na curva

rápida, o que ocorre na prática: este critério estabelece a máxima corrente de falta que assegura a coordenação, cujo valor de encontra no ponto de interseção entre a curva de tempo mínimo de fusão do elo e a curva rápida do religador.

Em termos de corrente de curto – circuito mínima: para todos os valores de corrente de falta que fluem pelo elo fusível, o tempo total de extinção do arco no seu interior deve ser menor que o tempo de atuação do religador na curva temporizada lenta, o que ocorre na prática: este critério estabelece a corrente mínima de falta que assegura a coordenação, cujo valor se encontra no ponto de interseção entre a curva de tempo total de extinção do arco e a curva temporizada lenta do religador.

Para se verificar na prática a coordenação entre o elo fusível e o religador será utilizado um script em MATLAB realizado em outro trabalho de conclusão de curso, o qual coleta dados do tipo de elo fusível, a quantidade de curvas rápidas e lentas do religador, a corrente de disparo do religador, as correntes de curto bifásico e trifásico para os quais deve – se ocorrer a coordenação. De posse desses dados é realizado o plot dos tipos de elos fusíveis conforme o grupo(H,T ou K e grupo A ou B) e as curvas do religador. A coordenação será confirmada se as curvas do elo fusível estiverem entre as duas curvas do religador.

- Coordenação Elo Fusível x Relé

A coordenação entre relés e elos fusíveis segue a regra geral das coordenações dos dispositivos de proteção: o dispositivo mais a jusante deve atuar primeiro que o que está a montante. Por isso a curva do relé deve estar acima da curva do elo fusível. Considerando o elo fusível a jusante deve – se ter em mente então que o tempo de atuação do elo deve ser 0,2 s mais rápido que as curvas de neutro e fase do relé no ponto mais crítico.

- Coordenação Religador x Relé a montante

A coordenação desses dois dispositivos segue, inicialmente, o mesmo princípio que diz que o dispositivo que está a jusante deve atuar primeiro do que está a montante para uma falta no trecho onde estiver, por isso a curva de tempo do relé deve estar mais de 0,2 s acima da curva retardada do religador.

- Coordenação Relé x Relé

Para que haja a coordenação entre dois relés em uma subestação, sendo que um funciona de proteção principal e outro de retaguarda, as curvas de tempo dos relés principais, ou seja, que não servem de proteção de retaguarda deverão estar, no mínimo, 0,4 s acima dos relés de retaguarda no ponto mais crítico.

### 3 Desenvolvimento

#### a Sistema IEEE 13 Barras

O sistema do IEEE de 13-barras será utilizado como teste por ter uma configuração radial e básica de uma rede de distribuição. Ele é um sistema de 115 kV com uma subestação, um transformador e algumas cargas nas barras. Inicialmente será modelado no Open DSS sem a presença de geração distribuída para o cálculo das correntes de curto-circuito por meio do modo Fault Study.

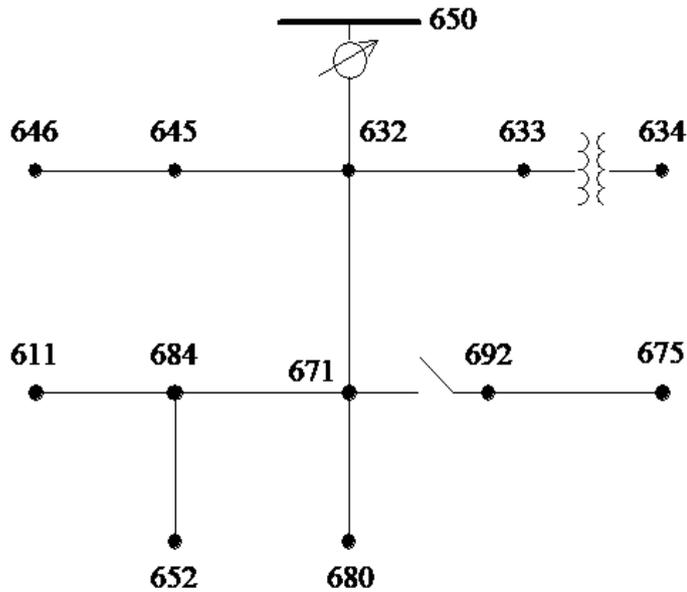


Figure 6: Sistema IEEE 13 Barras – Fonte: IEE Power Engineering Society

O esquema de proteção que será utilizado está logo abaixo na figura:

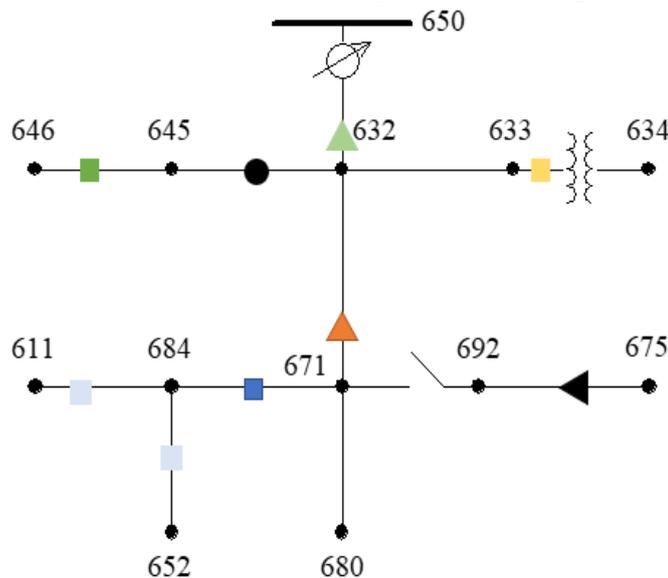


Figure 7: Sistema IEEE 13 Barras com Proteção – Fonte: IEE Power Engineering Society e elaborado pelo autor

Os triângulos são símbolos que representam os relés de sobrecorrente, os quadrados representam os elos fusíveis, o círculo representa um religador. As cores foram estabelecidas para diferenciar entre as características construtivas de cada um.

## b Proteção sistema IEEE 13 Barras

O diagrama unifilar foi desenhado novamente, porém agora com os símbolos que representam os equipamentos de proteção do sistema elétrico e recortado com apenas uma parte do circuito para que o estudo seja feito por meio de blocos. A legenda e os cálculos necessários para realizar a coordenação estão logo abaixo da figura.

### 1 Bloco 1

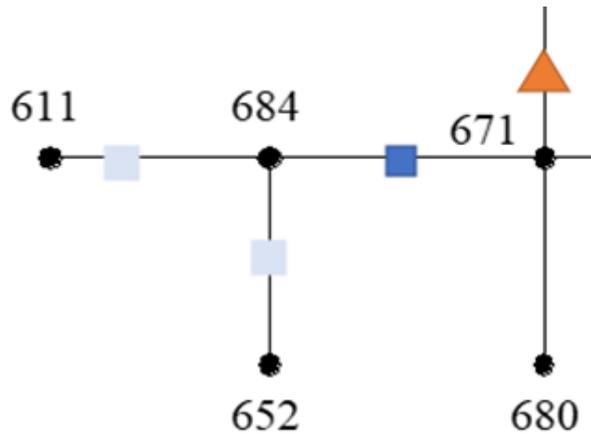


Figure 8: Recorte IEEE 13 Barras Bloco 1 -Fonte: IEE Power Engineering Society e elaborado pelo autor

- Escolha dos elos fusíveis dos trechos 684-611 e 684-652

Deve – se inicialmente avaliar qual a corrente nominal que elo é capaz de suportar, para isso foram encontradas corrente de carga máxima no OpenDSS tanto para o trecho 611 – 684 quanto para o trecho 684 – 652 por meio do comando “Show Correntes Elem”.

Como a corrente nominal que chega nas barras 611 e 652 são respectivamente 71,2 e 63,1, tem – se que o limite inferior de corrente considerando um fator de crescimento de carga  $k=1.5$  é:

$$I_{nom}^{Elo} \geq k \times i \quad (22)$$

$$I_{nom}^{Elo-611} \geq 1.5 \times 71.2A$$

$$I_{nom}^{Elo-611} \geq 106.8A$$

$$I_{nom}^{Elo} \geq 1.5 \times 63.1A$$

$$I_{nom}^{Elo-652} \geq 94.65A$$

O limite superior de corrente pode ser computado da seguinte maneira:

$$I_{nom}^{Elo} \leq \frac{I_{cc(min)}^{\phi-T}}{4} \quad (23)$$

Onde  $I_{cc(min)}^{\phi-T}$  é a menor corrente de curto no final do trecho protegido. É escolhida a menor corrente de curto para que o elo atue para qualquer corrente de curto. Assim:

$$I_{nom}^{Elo-611} \leq \frac{2622}{4}A$$

$$I_{nom}^{Elo-611} \leq 655,5A$$

$$I_{nom}^{Elo-652} \leq \frac{2477}{4} A$$

$$I_{nom}^{Elo-652} \leq 619,25 A$$

Pode - se observar que é necessário para o trecho 684-611 respeitar o limite de 106,8 A e 655,5 A por isso será utilizado um elo fusível do tipo 140k. Pode - se observar que é necessário para o trecho 684-652 respeitar o limite de 94,65 A e 619,25 A por isso será utilizado um elo fusível do tipo 100k.

## 2. Escolha do elo fusível do trecho 671-684

Para determinar o limite inferior de corrente que o elo do ramo 671-684 deve suportar, é necessário que se escolha um fator de crescimento de carga k. Para esse trabalho, foi escolhido k=1.5. O limite inferior de corrente pode ser computado da seguinte maneira:

$$I_{nom}^{Elo-684} \geq 1.5 \times 71.2 A$$

$$I_{nom}^{Elo-684} = 106,8 A$$

O limite superior de corrente pode ser computado da seguinte maneira:

$$I_{nom}^{Elo-684} \leq \frac{3025}{4} A$$

$$I_{nom}^{Elo-684} \leq 756,25 A$$

Pode - se observar que é necessário respeitar o limite de 106,8 A e 726,25 e respeitar a coordenação entre os outros elos fusíveis, por isso pode - se ver que o elo mais adequado é o de 200k.

Tab. 2.6 Coordenação de elos K

Elo protetor	Elo protegido														
	8K	10K	12K	15K	20K	25K	30K	40K	50K	65K	80K	100K	140K	200K	
6K		190	350	510	650	840	1060	1340	1700	2200	2800	3900	5800	9200	
8K			210	440	650	840	1060	1340	1700	2200	2800	3900	5800	9200	
10K				300	540	840	1060	1340	1700	2200	2800	3900	5800	9200	
12K					320	710	1050	1340	1700	2200	2800	3900	5800	9200	
15K						430	870	1340	1700	2200	2800	3900	5800	9200	
20K							500	1100	1700	2200	2800	3900	5800	9200	
25K								660	1350	2200	2800	3900	5800	9200	
30K									850	1700	2800	3900	5800	9200	
40K										1100	2200	3900	5800	9200	
50K											1450	3500	5800	9200	
65K												2400	5800	9200	
80K													4500	9200	
100K													2000	9100	
140K														4000	

Table 4: Coordenação Elos Fusíveis Tipo K e H - Fonte: Apostila de Proteção de Sistemas Elétricos de Potência

Pela tabela pode - se observar que há coordenação para ambos os elos fusíveis de 100k quanto de 40k, pois as correntes de curto não excedem os valores fornecidos na tabela. As correntes geradas pelo OpenDSS podem ser visualizadas na tabela abaixo.

Bus 3-Phase2-Phase1-Phase			
611 A	2622 A	0	2621 A
652 A	2477 A	0	2477 A

Table 5: Correntes de curto-circuito barras 611 e 652 - Fonte: OpenDSS

## 3. Determinação TC do relé

Como para dimensionar o relé é necessário um TC, os cálculos serão feitos inicialmente para ele. Para o TC(Transformador de corrente) deve - se achar o valor mínimo que

deve ter a corrente nominal no primário, para isso é necessário multiplicar a corrente de carga máxima pelo valor de k, que será assumido nesse trabalho como 1,5.

$$I_n^p \geq 1.5 \times 471,09A$$

$$I_n^p \geq 706,6A$$

Considerando um fator de sobrecorrente de 20 e que todos os curto-circuitos devem estar dentro da região onde não há saturação e o maior curto-circuito nesse sistema é de 6329 A, tem - se que:

$$I_n^p \geq \frac{6329}{20}A$$

$$I_n^p \geq 316,45A$$

Define - se, portanto, um TC com corrente nominal do primário de 800 A, e por isso olhando a tabela pode - se observar que o mais adequado é uma relação de transformação de 160:1.

Corrente nominal	Relação nominal						
5	1:1	60	12:1	400	80:1	2500	500:1
10	2:1	75	15:1	500	100:1	3000	600:1
15	3:1	100	20:1	600	120:1	4000	800:1
20	4:1	125	25:1	800	160:1	5000	1.000:1
25	5:1	150	30:1	1000	200:1	6000	1.200:1
30	6:1	200	40:1	1200	240:1	8000	1.600:1
40	8:1	250	50:1	1500	300:1	-	-
50	10:1	300	60:1	2000	400:1	-	-

Table 6: Relação Corrente Nominal e Relação Nominal - Fonte: Proteção de Sistemas Elétricos de Potência

Da teoria pode - se ver que para ajustar a unidade 51 de fase tem - se que satisfazer essas condições:

$$I_{min}^{AT}(51F) \leq \frac{2477}{160}A$$

$$I_{min}^{AT}(51F) \geq \frac{471,09}{160} \times 1.5A$$

$$I_{min}^{AT}(51F) \leq 15,48A$$

$$I_{min}^{AT}(51F) \geq 4,41A$$

$$I_{min}^{AT}(51F) = 5A$$

Da teoria pode - se ver que para ajustar a unidade 50 de fase tem - se que satisfazer essas condições:

$$I_{min}^{AT}(50F) \geq \frac{471,09}{160} \times 3A$$

$$I_{min}^{AT}(50F) \geq \frac{6329}{160} \times 1,5A$$

$$I_{min}^{AT}(50F) \geq 8,83A$$

$$I_{min(50F)}^{AT} \geq 59,33A$$

$$I_{min(50F)}^{AT} = 60A$$

O ajuste da unidade 51 de neutro do relé é feita da seguinte forma:

$$I_{min(51N)}^{AT} \leq \frac{2621}{160}A$$

$$I_{min(51N)}^{AT} \geq \frac{471,09}{160} \times 1,5 \times 0,1A$$

$$I_{min(51N)}^{AT} \leq 16,38A$$

$$I_{min(51N)}^{AT} \geq 0,44A$$

$$I_{min(51N)}^{AT} = 0,5A$$

Sendo que  $I_{min(51N)}^{AT}$  é a corrente mínima de atuação para a unidade 51 de neutro do relé.

O ajuste da unidade 50 de neutro do relé é feita da seguinte forma como visto na teoria:

$$I_{min(50N)}^{AT} \geq \frac{71,205}{160} \times 1,5$$

$$I_{min(50N)}^{AT} \geq \frac{I_{cc}(\phi-T-min)}{RTC} \times f$$

$$I_{min(50N)}^{AT} \geq 0,35A$$

$$I_{min(50N)}^{AT} \geq 32,38A$$

$$I_{min(50N)}^{AT} = 70A$$

O curto trifásico na segunda fórmula é do primeiro ponto a jusante do relé de sobrecorrente, ou seja, da barra 671.

Com objetivo de coordenar as curvas de tempo do relé de fase que está logo acima desse elo fusível é necessário encontrar a corrente de curto bifásico na barra 684 e corrente trifásica máxima na barra 671. Com o Open DSS achou - se que:

$$I_{cc}^{2\phi-684} = 4320A$$

$$I_{cc}^{3\phi-671} = 6329A$$

Com objetivo de coordenar as curvas de tempo do relé de neutro que está logo acima desse elo fusível é necessário encontrar a corrente de curto fase terra na barra 684 e corrente de curto fase terra na barra 671. Com o Open DSS achou - se que:

$$I_{cc}^{\phi-T-684} = 3025A$$

$$I_{cc}^{\phi-T-671} = 3454A$$

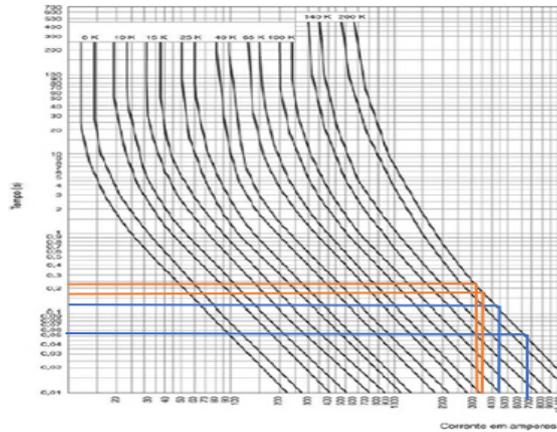


Figure 9: Curva tempo corrente elos fusíveis tipo K - Fonte: Proteção de Sistemas Elétricos de Potência

$$I_{cc}^{2\phi-684} = 4320A \rightarrow t_1 = 0,13s$$

$$I_{cc}^{3\phi-671} = 6329A \rightarrow t_2 = 0,051s$$

$$I_{cc}^{\phi-T-684} = 3025A \rightarrow t_3 = 0,24s$$

$$I_{cc}^{\phi-T-671} = 3454A \rightarrow t_4 = 0,16s$$

Para que haja coordenação e seletividade é necessário que a curva do relé esteja acima da curva do Elo. Para as unidades de 51 de fase tem - se que:

$$t_1 = 0,13s + 0,2s = 0,33s$$

$$t_2 = 0,051s + 0,2s = 0,251s$$

As curvas dos relés são comumente fornecidas em função dos múltiplos, por isso será calculado da seguinte forma:

$$m_i = \frac{I_{cc}}{RTC \times I_{min}^{AT}(51F)} \tag{24}$$

$$m_1 = \frac{4320}{160 \times 5} = 5,4 \rightarrow t_1 = 0,13s$$

$$m_2 = \frac{6329}{160 \times 5} = 7,9 \rightarrow t_2 = 0,051s$$

Pode - se observar nas curvas normalmente inversa dos múltiplos dos relés que:

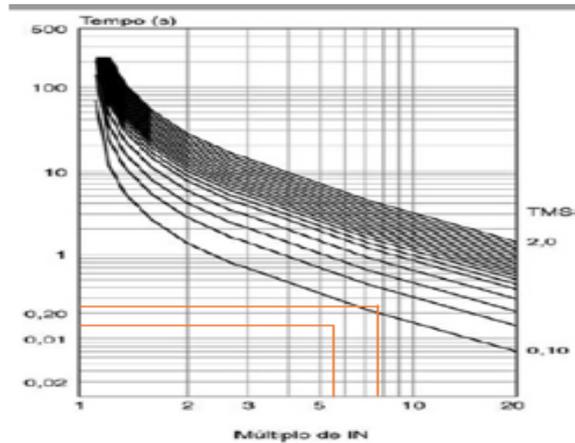


Figure 10: Curva de múltiplos de corrente por tempo dos relés - Fonte: Proteção de Sistemas Elétricos de Potência

Adotando inicialmente o TMS de 0,3 pode – se satisfazer a coordenação entre as curvas. Para as unidades de neutro (curvas azuis na figura 9):

$$t_1 = 0,24s + 0,2s = 0,44s$$

$$t_1 = 0,16s + 0,2s = 0,26s$$

$$m_1 = \frac{3025}{160 \times 5} = 9,45 \rightarrow t_1 = 0,44s$$

$$m_1 = \frac{3454}{160 \times 5} = 10,7 \rightarrow t_2 = 0,26s$$

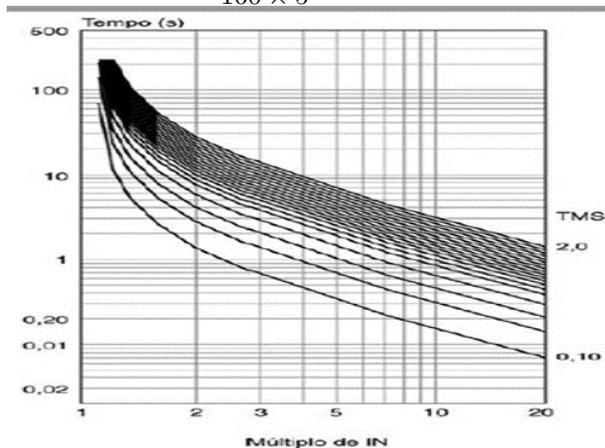


Figure 11: Curva de múltiplos de corrente por tempo dos relés - Fonte: Proteção de Sistemas Elétricos de Potência

Adotando o TMS de 0,3 pode – se satisfazer a coordenação entre as curvas de neutro.

2 Bloco 2

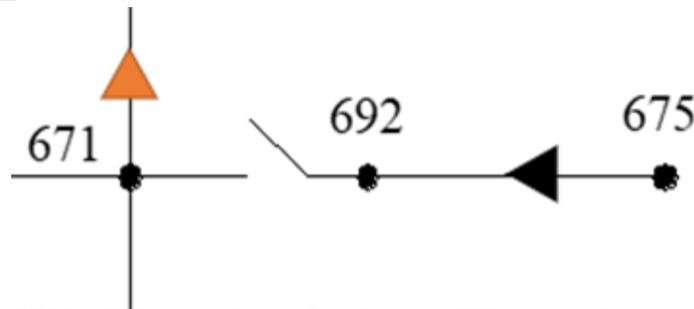


Figure 12: Recorte IEEE 13 Barras Bloco 2 - Fonte: IEE Power Engineering Society e elaborado pelo autor

1. Escolha do relé de sobrecorrente de trecho 692-675

Para dimensionar o TC(Transformador de corrente) deve – se multiplicar a corrente de carga máxima pelo valor de k, que será assumido nesse trabalho como 1,5.

$$I_n^p \geq 1.5 \times 471,09$$

$$I_n^p \geq 706,6A$$

Define – se, portanto, um TC com corrente nominal do primário de 400 A.

Olhando na tabela abaixo pode – se observar que o mais adequado é uma relação de transformação de 80:1.

Corrente nominal	Relação nominal						
5	1:1	60	12:1	400	80:1	2500	500:1
10	2:1	75	15:1	500	100:1	3000	600:1
15	3:1	100	20:1	600	120:1	4000	800:1
20	4:1	125	25:1	800	160:1	5000	1.000:1
25	5:1	150	30:1	1000	200:1	6000	1.200:1
30	6:1	200	40:1	1200	240:1	8000	1.600:1
40	8:1	250	50:1	1500	300:1	-	-
50	10:1	300	60:1	2000	400:1	-	-

Table 7: Relação Corrente Nominal e Relação Nominal - Fonte: Proteção de Sistemas Elétricos de Potência

Da teoria pode - se ver que para ajustar a unidade 51 de fase tem - se que satisfazer essas condições:

$$I_{min}^{AT}(51F) \leq \frac{4917}{80}$$

$$I_{min}^{AT}(51F) \geq \frac{205,29}{80} \times 1,5$$

$$I_{min}^{AT}(51F) \leq 61,46A$$

$$I_{min}^{AT}(51F) \geq 3,83A$$

$$I_{min}^{AT}(51F) = 4A$$

Da teoria pode - se ver que para ajustar a unidade 50 de fase tem - se que satisfazer essas condições:

$$I_{min}^{AT}(50F) \geq \frac{205,29}{80} \times 3$$

$$I_{min}^{AT}(50F) \geq \frac{5565}{80} \times 1,5$$

$$I_{min}^{AT}(50F) \geq 7,69A$$

$$I_{min}^{AT}(50F) \geq 104,34A$$

$$I_{min}^{AT}(50F) = 120A$$

O ajuste da unidade 51 de neutro do relé é feita da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 I_{min}^{AT}(51N) &\leq \frac{3169}{80} \\
 I_{min}^{AT}(51N) &\geq \frac{205,29}{80} \times 1,5 \times 0,1 \\
 I_{min}^{AT}(51N) &\leq 39,61A \\
 I_{min}^{AT}(51N) &\geq 0,25A \\
 I_{min}^{AT}(51N) &= 2A
 \end{aligned}$$

Sendo que  $I_{min}^{AT}(51N)$  é a corrente mínima de atuação para a unidade 51 de neutro.

O ajuste da unidade 50 de neutro do relé é feita da seguinte forma como visto na teoria:

$$\begin{aligned}
 I_{min}^{AT}(50N) &\geq \frac{205,29}{160} \times 0,8 \\
 I_{min}^{AT}(50N) &\geq \frac{3169}{80} \times 1,5 \\
 I_{min}^{AT}(50N) &\geq 2,05A \\
 I_{min}^{AT}(50N) &\geq 59,41A \\
 I_{min}^{AT}(50N) &= 70A
 \end{aligned}$$

Para se fazer este estudo, será empregado o critério de seletividade relé x relé. Para se obter seletividade entre esses dois conjuntos de relés, as curvas de tempo dos relés principais (fase e neutro) deverão estar acima das curvas dos relés de retaguarda (fase e neutro), respectivamente, no mínimo 0,4 s, no ponto mais crítico, em todo o trecho protegido pelos relés principais, para as correntes de curtos-circuitos de fase e terra. É necessário, inicialmente, calcular os múltiplos, por isso tem - se que:

$$\begin{aligned}
 m_1 &= \frac{4917}{160 \times 5} = 6,14A \\
 m_2 &= \frac{4917}{5565} = 6,9A \\
 m_3 &= \frac{4917}{80 \times 5} = 15,3A \\
 m_4 &= \frac{4917}{80 \times 4} = 17,3A
 \end{aligned}$$

Com o TMS de 0,3 para Fase tem - se que:

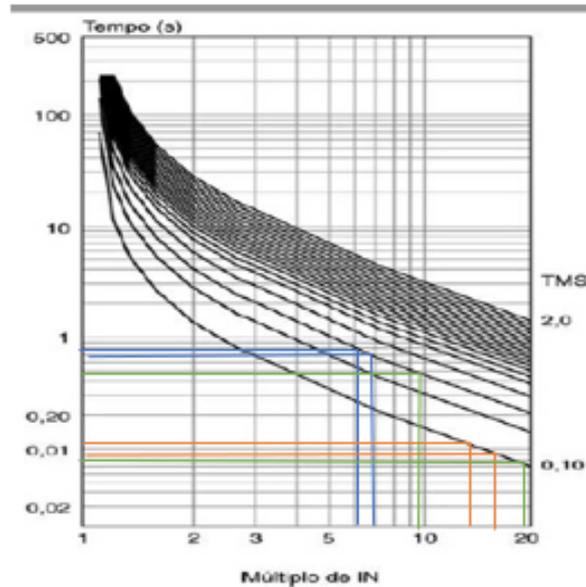


Figure 13: Curva de múltiplos de corrente por tempo dos relés - Fonte: Proteção de Sistemas Elétricos de Potência

Pelo critério de seletividade, tem-se que:

$$t_{rele\_montante} \geq t_{rele\_jusante} + 0,4s \quad (25)$$

Como as linhas azuis do gráfico foi obtido o seguinte resultado:

$$m_1 = 6,14A \rightarrow t_{rele\_montante} = 0,80s$$

$$m_2 = 6,9A \rightarrow t_{rele\_montante} = 0,69s$$

Como as linhas laranjas do gráfico foi obtido o seguinte resultado:

$$m_3 = 15,3A \rightarrow t_{rele\_montante} = 0,11s$$

$$m_4 = 17,3A \rightarrow t_{rele\_montante} = 0,09s$$

Nota-se que:

$$0,80 - 0,11 = 0,69s$$

$$0,69 - 0,09 = 0,60s$$

Ambos são maiores que 0,4, ou seja, há coordenação.

Para as unidades de neutro:

$$m_1 = \frac{3169}{160 \times 2} = 9,90$$

$$m_3 = \frac{3169}{80 \times 2} = 19,8$$

No gráfico com as curvas verdes:

$$t_{rele\_montante} = 0,47s \rightarrow \text{Curva verde com TMS} = 0,3$$

$$t_{rele\_jusante} = 0,009s \rightarrow \text{Curva verde com TMS} = 0,3$$

$$t_{rele\_montante} - t_{rele\_jusante} = 0,461s$$

A diferença entre os relés a montante é maior do que 0,4 s, ou seja, o valor de 0,2 para o TMS satisfaz a coordenação entre as unidades de fase dos relés.

### 3 Bloco 3

Do terceiro bloco:

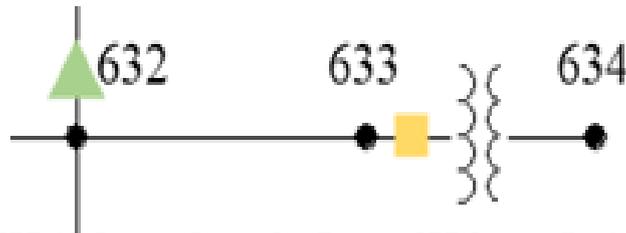


Figure 14: Recorte IEEE 13 Barras Bloco 3 - Fonte: IEE Power Engineering Society e elaborado pelo autor

1. Escolha do elo fusível do trecho 633-634

$$I_n = \frac{S}{\sqrt{3} \times V_b} = 7,20A \quad (26)$$

$$I_n = \frac{500}{\sqrt{3} \times 4,16} = 7,20A$$

Para proteger o primário do transformador será adotado o método utilizado na apostila do professor Marcos Dias.

Na tabela presente no livro do João Mamede sobre proteção há uma tabela que mostra que 4,6Kv este entre 3,8 e 6,6 o elo fusível da 633 escolhido será o de 50k, pois é o limite superior.

2. Escolha do relé de sobrecorrente da barra 632

Para dimensionar o TC(Transformador de corrente) deve - se multiplicar a corrente de carga máxima pelo valor de k, que será assumido nesse trabalho como 1,5.

Todos os curto-circuitos devem estar dentro da região onde não há saturação e considerando que o maior curto-circuito nesse sistema é de 6656 A, tem - se que:

$$I_{n,p} \geq \frac{12642}{20}$$

$$I_{n,p} \geq 632,1 A$$

Define - se, portanto, um TC com corrente nominal do primário de 1000 A, e por isso olhando a tabela 7 pode - se observar que o mais adequado é uma relação de transformação de 200:1.

Da teoria pode - se ver que para ajustar a unidade 51 de fase tem - se que satisfazer essas condições:

$$1,5 \frac{587,08}{200} \leq I_{\min(51F)}^{AT} \leq \frac{7866}{200}$$

$$4,40 A \leq I_{\min(51F)}^{AT} \leq 39,33 A$$

$$I_{\min(51F)}^{AT} = 6 A$$

Da teoria pode - se ver que para ajustar a unidade 50 de fase tem - se que satisfazer essas condições:

$$8 \frac{587,08}{200} \leq I_{\min(50F)}^{AT}$$

$$23,48 A \leq I_{\min(50F)}^{AT}$$

$$\frac{1,9 \ 12642}{200} \leq I_{\min(50F)}^{AT}$$

$$120,099 \leq I_{\min(50F)}^{AT}$$

$$I_{\min(50F)}^{AT} = 260 A$$

O ajuste da unidade 51 de neutro do relé é feita da seguinte forma:

$$0,1 \ 1,9 \frac{587,08}{200} \leq I_{\min(51N)}^{AT} \leq \frac{5189}{200}$$

$$0,55 A \leq I_{\min(51N)}^{AT} \leq 25,94 A$$

$$I_{\min(51N)}^{AT} = 2 A$$

Sendo que  $I_{\min(51N)}^{AT}$  é a corrente mínima de atuação para a unidade 51 de neutro.

O ajuste da unidade 50 de neutro do relé é feita da seguinte forma como visto na teoria:

$$I_{\min}^{AT}(50N) \geq 0,80 \frac{587,08}{200}$$

$$I_{\min}^{AT}(50N) \geq 1,4 \frac{6948}{200}$$

$$I_{\min}^{AT}(50N) \geq 2,34 A$$

$$I_{\min}^{AT}(50N) \geq 48,63 A$$

$$I_{\min}^{AT}(50N) = 70 A$$

### 3. Coordenação Elo Fusível 50k com Relé de Sobrecorrente

Com objetivo do coordenar as curvas de tempo do relé de fase que está logo acima desse elo fusível é necessário encontrar a corrente de curto bifásico na barra 633 e corrente trifásica máxima na barra 633. Com o Open DSS achou - se que:

$$I_{2f\ 633} = 7866 A$$

$$I_{3f\ 633} = 8960 A$$

Com objetivo do coordenar as curvas de tempo do relé de neutro que está logo acima desse elo fusível é necessário encontrar a corrente de curto fase terra na barra 633:

$$I_{(ft633)} = 5189A$$

$$I_{(ft633)} = 5189A$$

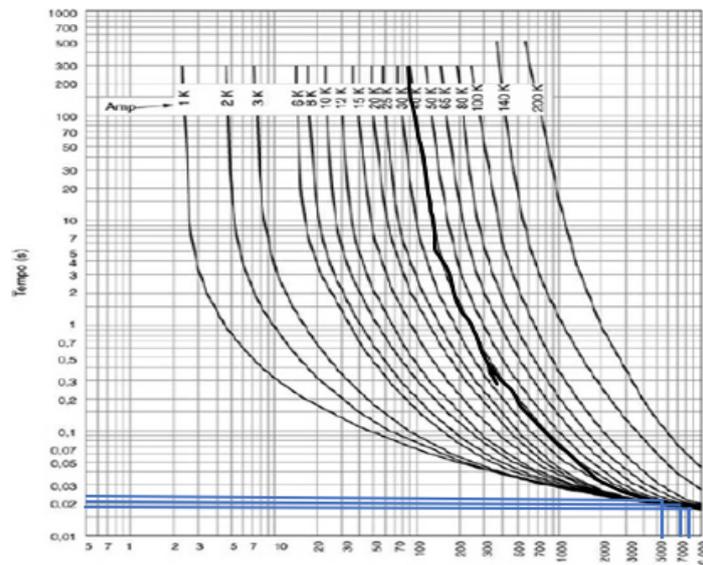


Figure 15: Curva de tempo corrente elo fusível tipo K - Fonte: Proteção de Sistemas Elétricos de Potência

Azul - Curvas de tempo de fase.

$$t_1 = 0,019s$$

$$t_2 = 0,022s$$

Laranja - Curvas de tempo de neutro.

$$t_3 = 0,026s$$

$$t_4 = 0,026s$$

Precisa - se que a curva do relé esteja acima da curva do Elo para que haja coordenação. Para as unidades de 51 de fase tem - se que:

$$t_{rel} = 0,019s + 0,2s = 0,219s$$

$$t_{rel} = 0,022s + 0,2s = 0,24s$$

As curvas do relés são comumente fornecidas em função dos múltiplos, por isso será calculado da seguinte forma:

$$m_1 = \frac{7866}{200 * 6} = 6,55$$

$$m_2 = \frac{8960}{200 * 6} = 7,46$$

Pode - se observar nas curvas normalmente inversa dos múltiplos dos relés que:

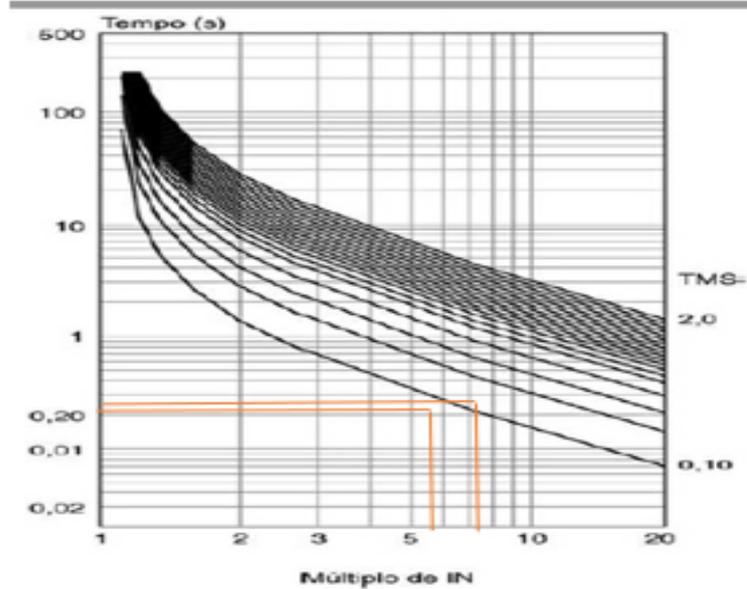


Figure 16: Coordenação Elos Fusíveis Tipo K e H - Fonte: Proteção de Sistemas Elétricos de Potência

Adotando o TMS de 0,2 pode - se satisfazer a coordenação entre as curvas.

Para as unidades de neutro (curvas azuis no gráfico 2):

$$t_{(rel)} = 0,026s + 0,2s = 0,226s$$

$$t_{(rel)} = 0,026s + 0,2s = 0,226s$$

$$m_1 = \frac{5189}{200 * 2} = 12,9$$

$$m_2 = \frac{5189}{200 * 2} = 12,9$$

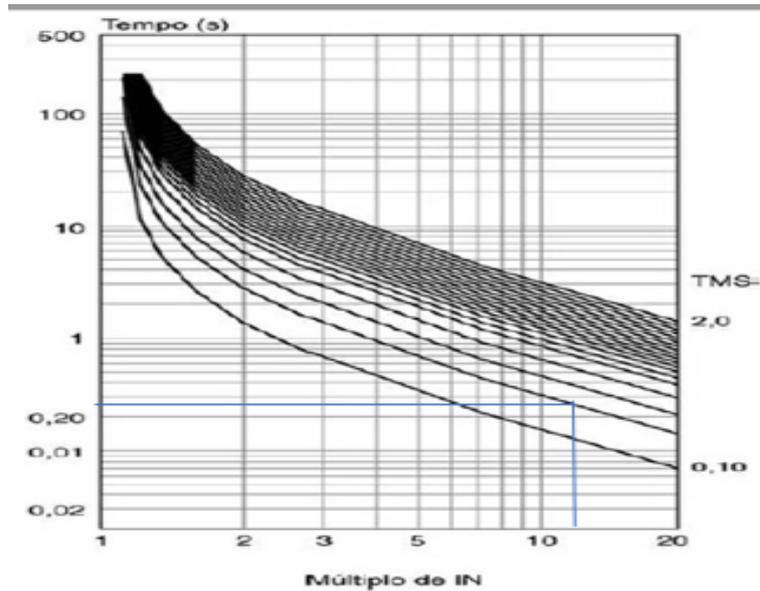


Figure 17: Coordenação Elos Fusíveis Tipo K e H - Fonte: Proteção de Sistemas Elétricos de Potência

Adotando o TMS de 0,4 pode – se satisfazer a coordenação entre as curvas.

#### 4 Bloco 4

Do bloco 4:

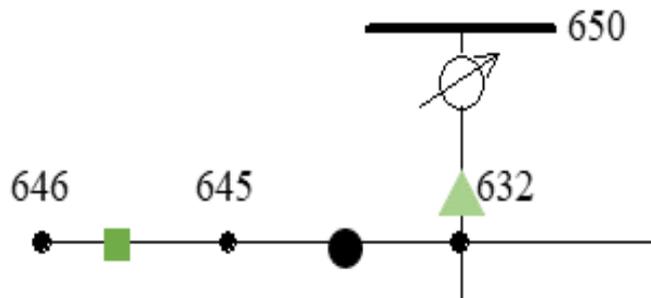


Figure 18: Recorte IEEE 13 Barras Bloco 4 - Fonte: IEE Power Engineering Society e elaborado pelo autor

1. Escolha do Elo Fusível 200 k

Para determinar o limite inferior de corrente que o elo do ramo 645-646 deve suportar, é necessário que se escolha um fator de crescimento de carga k. Para esse trabalho, foi escolhido k=1.5. O limite inferior de corrente pode ser computado da seguinte maneira:

$$I_{nom}^{Elo_{645-646}} \geq 1.5 * 64,429 \text{ A}$$

$$I_{nom}^{Elo_{645-646}} \geq 94,64 \text{ A}$$

É escolhida a menor corrente de curto para que o elo atue para qualquer corrente de curto. Assim:

$$I_{nom}^{Elo_{645-646}} \leq \frac{1}{4} * 4019 \text{ A}$$

$$I_{nom}^{Elo_{645-646}} \leq 1004,75 \text{ A}$$

Pode – se observar que é necessário respeitar o limite de 94,64 A e 1044,75 A por isso será utilizado um elo fusível do tipo 200k.

2. Determinação religador e coordenação com Elo de 200k

Dada a corrente de carga máxima entre as barras 632 e 645:

$$I = 143,41A$$

O limite inferior da corrente de disparo pode ser computado da seguinte maneira:

$$I_D^{Fase} \geq k * I_{carga}^{max} \quad (27)$$

$$I_D^{Fase} \geq 1.5 * 143,41$$

$$I_D^{Fase} \geq 215,115 A$$

O limite superior de corrente pode ser computado da seguinte maneira:

$$I_D^{Fase} \leq I_{ccmin}^{2\emptyset} \quad (28)$$

$$I_D^{Fase} \leq 5368 A$$

Onde  $I_{ccmin}^{2\emptyset}$  é a menor corrente de curto bifásica entre os nós. Tendo em mente esse range para a corrente de disparo, foram escolhidas as correntes de disparo da curva rápida  $I_{D50}^{Fase\emptyset}$  e da curva lenta  $I_{D51}^{Fase\emptyset}$  do religador.

$$I_{D(50)}^{Fase} = 220 A$$

$$I_{D(51)}^{Fase} = 220 A$$

Outro ponto importante é o critério de ajuste de correntes de falta, para definir o ajuste, tanto para a curva rápida quanto para a curva lenta do religador, usa-se como limite inferior 10% do valor da corrente de carga e o valor mínimo entre as correntes de curto possíveis na região protegida pelo religador  $I_{cc}^{\emptyset-T(min)}$

$$0.1 * 143,41 \leq I_D^{(50N)} \leq I_{cc}^{\emptyset-T(min)}$$

$$14,4 \leq I_D^{(50N)} \leq 4019$$

Assim, se escolhe os ajustes de:

$$I_D^{(50N)} = 15A$$

$$I_D^{(51N)} = 15A$$

Por fim, determina-se se existe coordenação entre o religador e o elo de 200 k. Para tal, usou-se o script concedido em outro trabalho de conclusão de curso onde é possível avaliar se há coordenação entre um determinado tipo de elo e um religador.

Para avaliar a coordenação do religador com o elo de 200 k usou-se os seguintes parâmetros no código:

- Digite o grupo do Elo Fusível desejado (Ex.: A=1, B=2): 1
- Entre com o dispositivo para coordenação (Ex.: Relay=1, Religador/Seccionador=2): 2
- Entre com o número de disparos rápidos (Ex.: 1 ou 2): 2
- Entre com a relação temporal de atuação da primeira curva do dispositivo (Ex.: Tempo Definido = 1, Tempo Dependente = 2): 2
- Entre com a relação temporal de atuação da segunda curva do dispositivo (Ex.: Tempo Definido = 1, Tempo Dependente = 2): 2
- Entre com o tipo da primeira curva de Tempo Dependente do dispositivo (Ex.: NI=1, MI=2, EI=3): 1
- Entre com o valor de TMS para disparos instantâneos (Ex.: 0.01 a 2): 0.01
- Entre com o tipo da segunda curva de Tempo Dependente do dispositivo (Ex.: NI=1, MI=2, EI=3): 2
- Entre com o valor de TMS para disparos temporizados (Ex.: 0.05 a 2): 2

- Entre com o valor da corrente de disparo em Ampères: 220
- Entre com o valor de corrente inicial para o intervalo de estudo: 5368
- Entre com o valor de corrente final para o intervalo de estudo: 6730

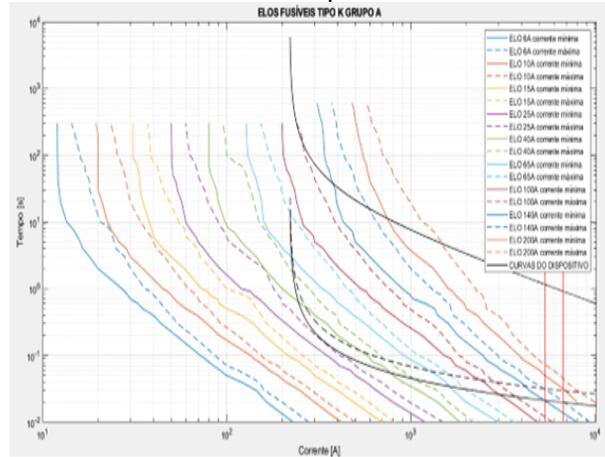


Figure 19: Print MATLAB - Fonte: Trabalho de Conclusão de Curso da PUC-Rio

Pode – se observar que é necessário respeitar o limite de 94,64 A e 1044,75 A por isso será utilizado um elo fusível do tipo 200k.

## 4 OpenDSS

### a Básico

O software utilizado para realizar as simulações e cálculos de curto-circuito foi o Open DSS. Ele é um software livre que possui uma interface que possibilita ao usuário inserir os elementos por meio de scripts, não ficando restrito a usuários que possuem conhecimentos em programação.

O primeiro elemento que deve ser definido no Open DSS para que ele funcione é o seguinte:

*New.Circuit.IEEE13Barras*

Assim ele consegue entender qual sistema será utilizado, como no caso será utilizado sistema 13 Barras do IEEE, será colocado o sistema IEEE13 Barras depois do comando "New Circuit".

### b Simulações e Comparação com GD

A curva tempo corrente é um elemento importante na definição dos elementos de proteção elétrica, por isso a definição dela será apresentada em primeiro lugar:

New TCCurve	TCC	Nome da Curva
npts	4	Número de Pontos
T_array	[1 2 3 4 5]	Vetor com instantes de tempo
C_array	[1.2 1.0 0.8 0.6]	Vetor com correntes

Table 8: Definição de curva tempo corrente no OpenDSS - Fonte: Documentação OpenDSS

Neste tópico serão realizados alguns testes no software OpenDSS com o objetivo de visualizar o funcionamento real dos equipamentos de proteção elétrico e verificar as diferenças do sistema IEEE 13 Barras com e sem GD.

Por isso, antes de entrar de fato na simulação será demonstrado um esquema gráfico de como funciona a geração por painel fotovoltaico no Open DSS.

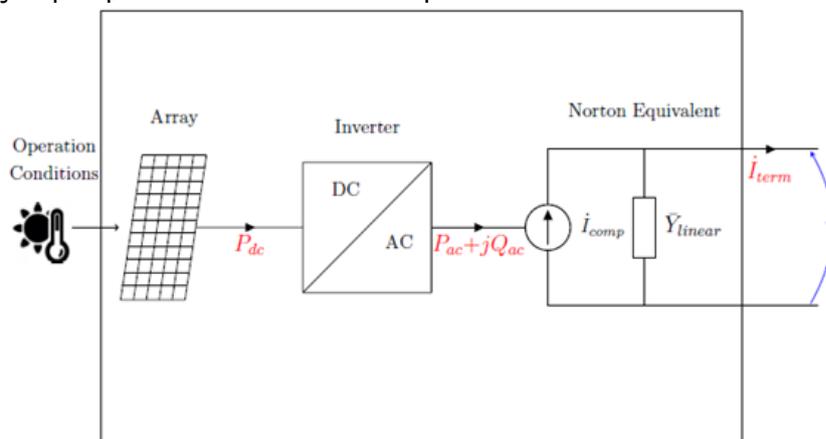


Figure 20: Esquema Painel Fotovoltaico no OpenDSS - Fonte: Documentação OpenDSS

Que é apresentado na documentação do OpenDSS sobre geração de energia com um sistema fotovoltaico. As propriedades necessárias para definir o sistema fotovoltaico no Open DSS são:

- Ponto de Máxima Potência - Potência máxima nominal em kW para  $1kW/m^2$  de irradiância e uma temperatura definida pelo usuário;
- PT Curve - Curva de fator de correção em Pu por temperatura;
- Propriedades do inversor;
- Propriedades de condições de operação;

O ponto de máxima potência pode ser resumido em encontrar, para determinados níveis de irradiação solar e temperatura ambiente, a tensão(Vpmp) ou a corrente(Ipmp) de máxima potência.

A diferença entre as correntes de curto-circuito sem GD e com GD foram computadas no Open DSS e demonstradas graficamente da seguinte forma:

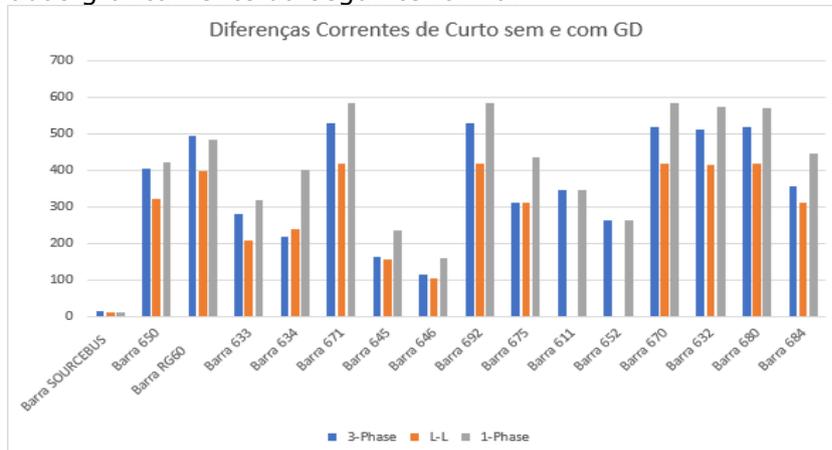


Figure 21: Diferença entre correntes de curto para três fases sem GD e com GD - Fonte: Elaborado pelo autor

Inicialmente foram realizados testes de trechos com os elos fusíveis e como ocorre a sua coordenação e a sensibilização de cada um para determinado nível de corrente.

Com os seguintes comandos define – se fusíveis nos trechos determinados acima:

New "Fuse	fusivel"	Nome do Fusível
MonitoredObj	line.684611	Linha que ele está conectado
MonitoredTerm	2	Terminal da linha
FuseCurve	Klink	Tipo de curva tempo corrente
RatedCurrent	100	Corrente mínima que aciona o fusível

Table 9: Definição de elo fusível no OpenDSS - Fonte: Documentação OpenDSS

New "Fuse	Fusivel2"	Nome do Fusível
MonitoredObj	line.684652	Linha que ele está conectado
MonitoredTerm	2	Terminal da linha
FuseCurve	Klink	Tipo de curva tempo corrente
RatedCurrent	140	Corrente mínima que aciona o fusível

Table 10: Definição de elo fusível no OpenDSS - Fonte: Documentação OpenDSS

New "Fuse	Fusivel3"	Nome do Fusível
MonitoredObj	line.671684	Linha que ele está conectado
MonitoredTerm	2	Terminal da linha
FuseCurve	Klink	Tipo de curva tempo corrente
RatedCurrent	200	Corrente mínima que aciona o fusível

Table 11: Definição de elo fusível no OpenDSS - Fonte: Documentação OpenDSS

A fuse curve do tipo klink define um fusível do tipo k, então por exemplo, o elo da tabela 22 é definido como um elo de 200K.

Apesar de ter sido usado o modo Fault Study do Open DSS para achar as correntes de curto – circuito, no caso dos testes serão aplicadas faltas pontuais.

Inicialmente aplica – se uma falta trifásica nas barras 611 por meio do comando:

New Fault	3F11
phases	3
bus1	611

Table 12: Definição de falta no OpenDSS - Fonte: Documentação OpenDSS

Pode ser observar que com esse tipo de configuração o elo fusível a jusante(tabela 6) foi acionado, enquanto o elo fusível 3(tabela 8) não sensibilizou devido ao RatedCurrent, que é a corrente máxima suportada pelo elo para que ele não derreta. Foi possível observar isso por meio do comando "ShowEventLog" no OpenDSS. Resposta do EventLog no OpenDSS:

"Hour=0, Sec=0, ControlIter=1, Element=Fuse.fusivel, Action=PHASE 1 BLOWN"

Para testar se os dispositivos estão coordenando da maneira correta será alterada a "RatedCurrent" do elo fusível de 140K(próximo a barra 611) para um valor superior a 200 A. Escolheu – se uma corrente de 210 A. Novamente roda – se o fluxo de potência no Open DSS com a mesma falta definida pela tabela 9. O resultado mostrado no EventLog do OpenDSS é o seguinte:

Hour=0, Sec=0, ControlIter=1, Element=Fuse.fusivel3, Action=PHASE 2 BLOWN

Demonstrando que agora elo fusível mais próximo da barra 611 não está sensibilizando para uma falta trifásica em 611, pois a RatedCurrent está maior, ou seja, ele suporta correntes maiores.

Com o objetivo de testar o mesmo trecho com a presença de geração distribuída foi inserido um sistema fotovoltaico na barra 611 conforme o seguinte esquema:

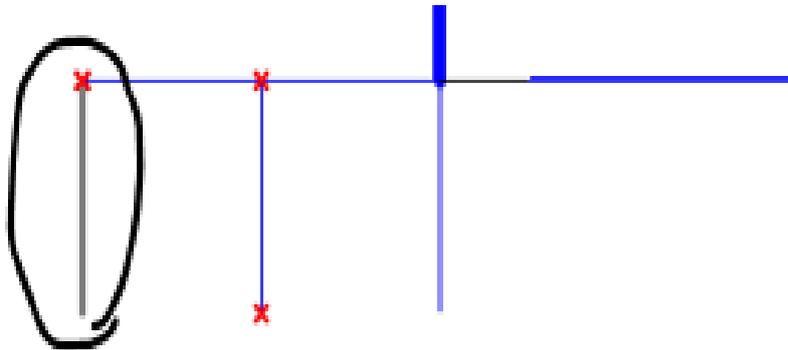


Figure 22: Recorte IEEE 13 Barras com painel fotovoltaico no OpenDSS - Fonte: OpenDSS e elaborado pelo autor

A instalação da geração distribuída foi feita com a ligação de um transformador que está circulado na figura acima de um print retirado da função "circuit plot" do OpenDSS. Dois monitores foram inseridos por meio dos comandos abaixo para entender o comportamento da corrente tanto na barra 611 quanto na barra 684.

Como o terminal de interesse é o 611, e o que segue logo após ele é o 684, os resultados exibidos foram apenas dos gráficos desse terminal.

No terminal 684 sem geração distribuída a corrente se comportou da seguinte forma:

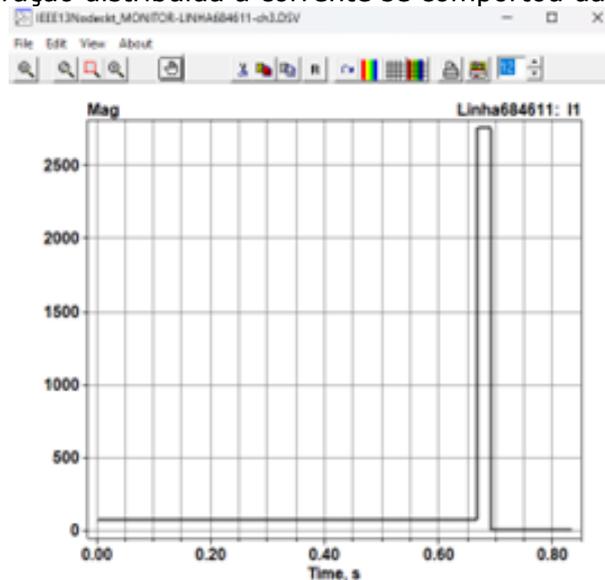


Figure 23: Gráfico IEEE 13 Corrente Barra 684 sem geração distribuída - Fonte: OpenDSS

No terminal 684 com geração distribuída a corrente se comportou da seguinte forma:

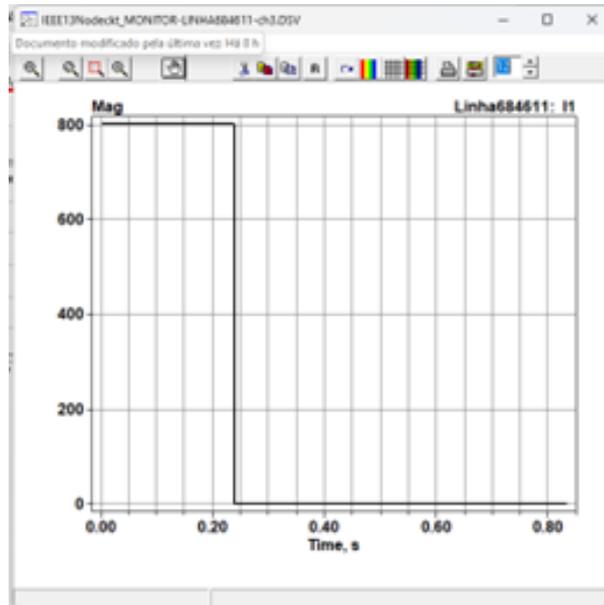


Figure 24: Gráfico IEEE 13 Corrente Barra 684 com geração distribuída - Fonte: OpenDSS

Como o fusível está atuando para uma corrente menor do que a corrente de curto e para um tempo menor há algo de errado que deve ser ajustado, por isso o parâmetro "RatedCurrent" do fusível 684611 será alterado, pois ele define o tipo de curva que o fusível terá. Se o valor atual que está em 100 for para 140 o seguinte gráfico é gerado:

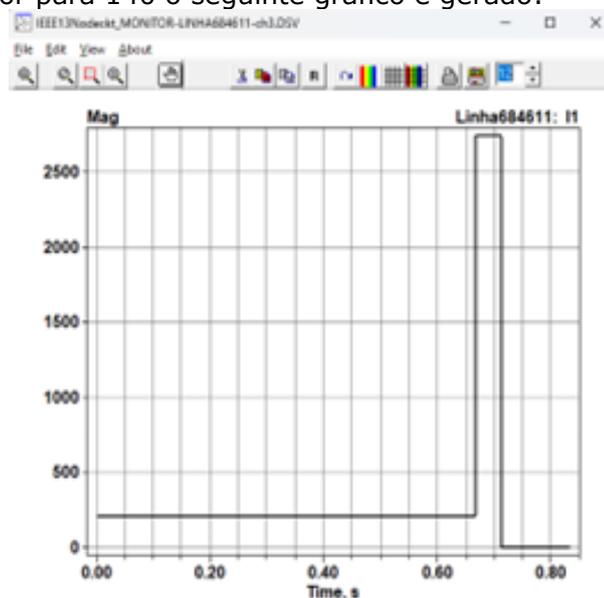


Figure 25: Gráfico IEEE 13 Corrente Barra 684 com geração distribuída ajustado - Fonte: OpenDSS

Com isso pode – se notar que o ajuste foi feito de forma correta, pois ele está sensibilizando novamente para uma corrente de curto.

Fazendo a análise para uma falta trifásica na barra 671 com apenas um relé de sobrecorrente com quatro intervalos de religamento no trecho 670 – 671 e sem a inserção de geração distribuída, pode – se observar o seguinte gráfico:

Para fase 1:

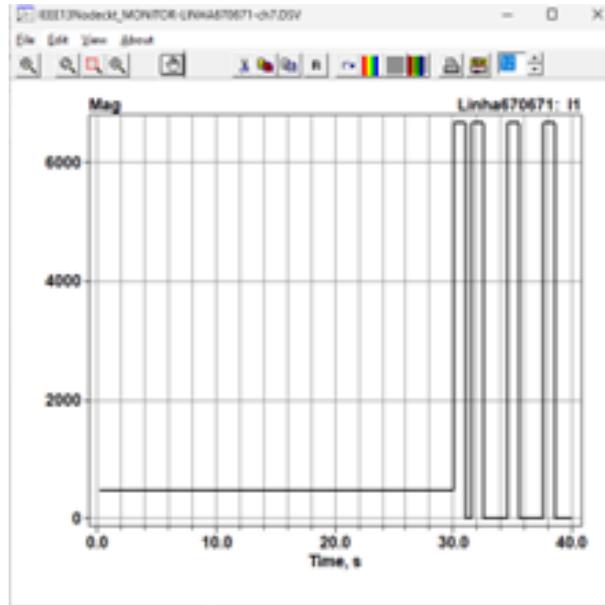


Figure 26: Gráfico IEEE 13 Corrente Barra 671 Fase 1 sem geração distribuída - Fonte: OpenDSS

Para fase 2:

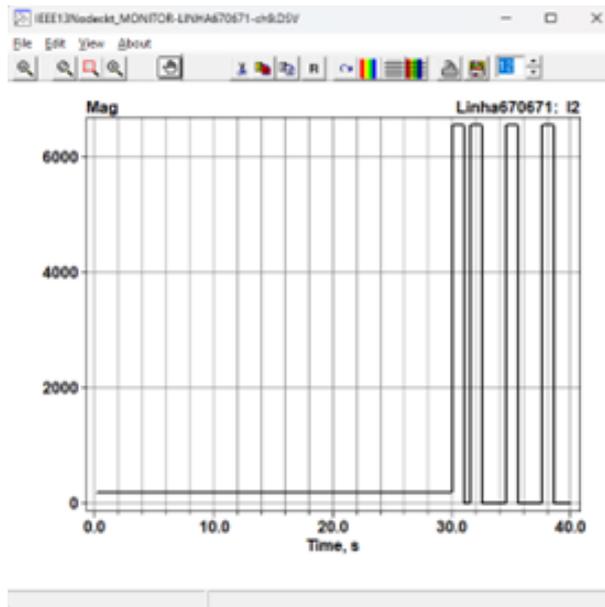


Figure 27: Gráfico IEEE 13 Corrente Barra 671 Fase 2 sem geração distribuída - Fonte: OpenDSS

Para fase 3:

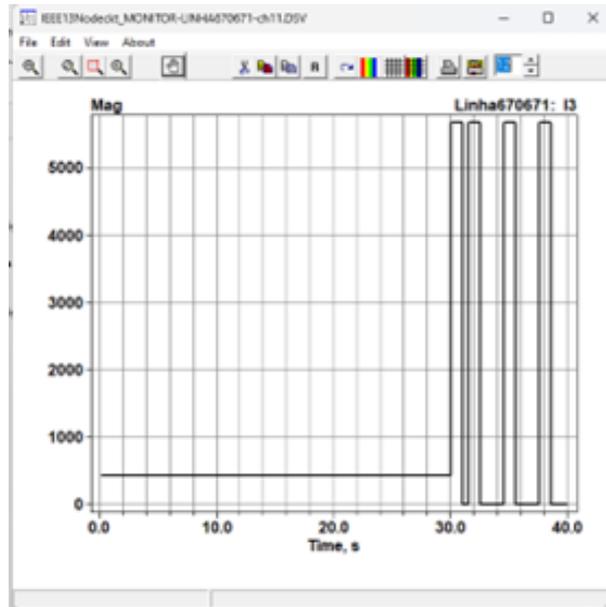


Figure 28: Gráfico IEEE 13 Corrente Barra 671 Fase 3 sem geração distribuída - Fonte: OpenDSS

Com a inserção do painel fotovoltaico pode – se observar os seguintes comportamentos das curvas tempo corrente:

Para fase 1:

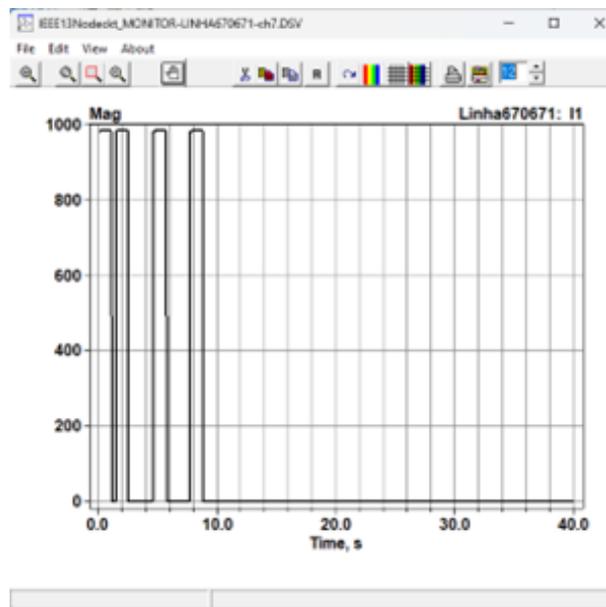


Figure 29: Gráfico IEEE 13 Corrente Barra 671 Fase 1 com geração distribuída - Fonte: OpenDSS

Para fase 2:

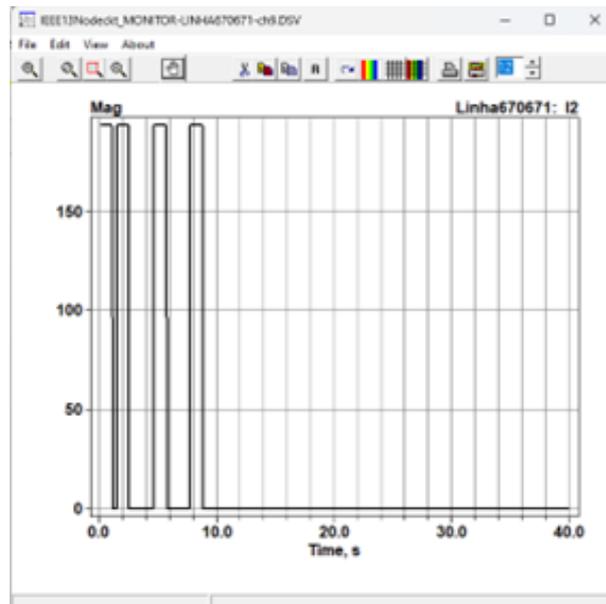


Figure 30: Gráfico IEEE 13 Corrente Barra 671 Fase 2 com geração distribuída - Fonte: OpenDSS

Para fase 3:

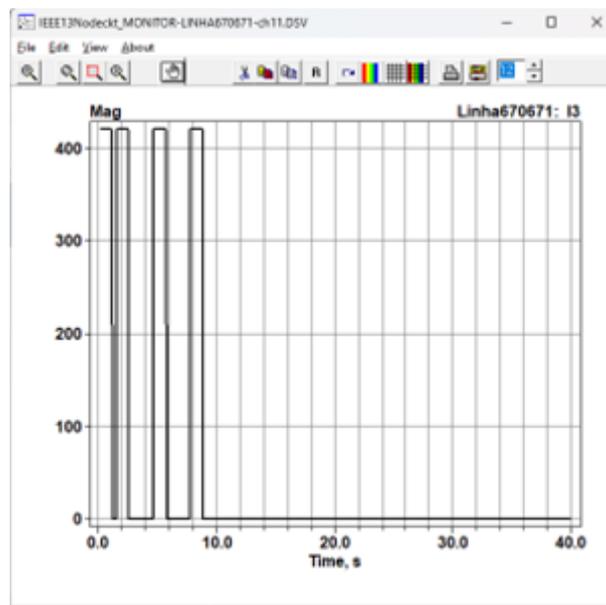


Figure 31: Gráfico IEEE 13 Corrente Barra 671 Fase 3 com geração distribuída - Fonte: OpenDSS

De posse dos gráficos pode – se notar que o relé atuou para correntes menores do que as correntes de curto, o mesmo comportamento demonstrado pelos fusíveis, com isso foi feito um ajuste na corrente de atuação do relé.

O aumento do parâmetro “PhaseTrip” no OpenDSS foi suficiente para fazer com que o relé atuasse da forma correta, isto é, para apenas corrente de curto-circuito. Os resultados encontrados foram exibidos nos gráficos abaixo:

Para fase 1:

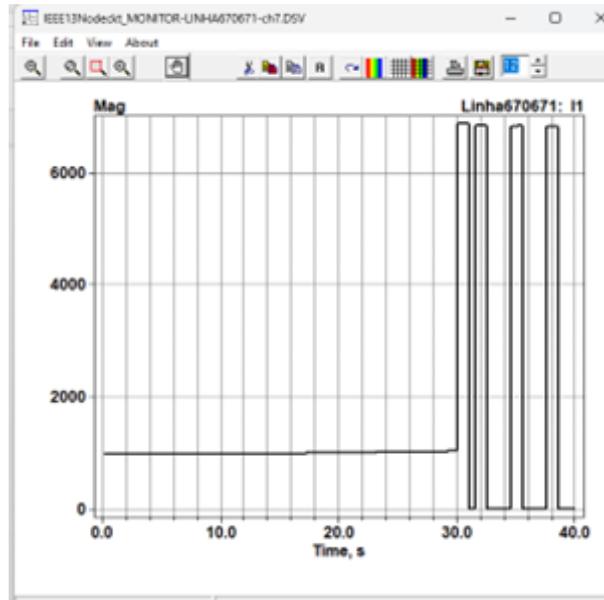


Figure 32: Gráfico IEEE 13 Corrente Barra 671 Fase 1 com geração distribuída ajustado - Fonte: OpenDSS

Para fase 2:

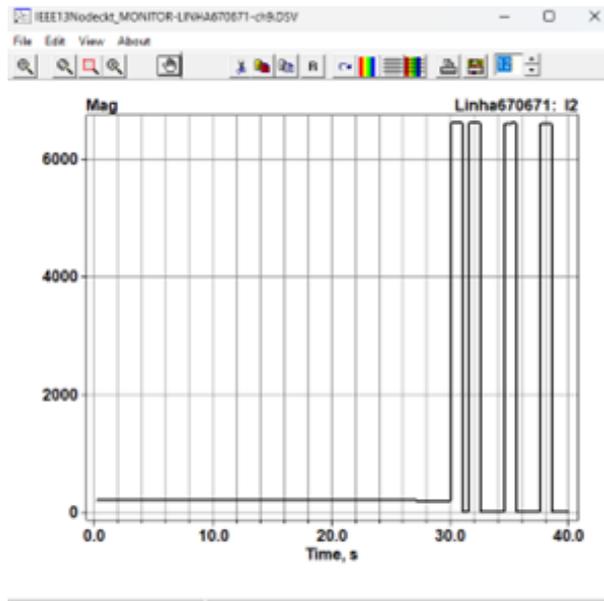


Figure 33: Gráfico IEEE 13 Corrente Barra 671 Fase 2 com geração distribuída ajustado - Fonte: OpenDSS

Para fase 3:

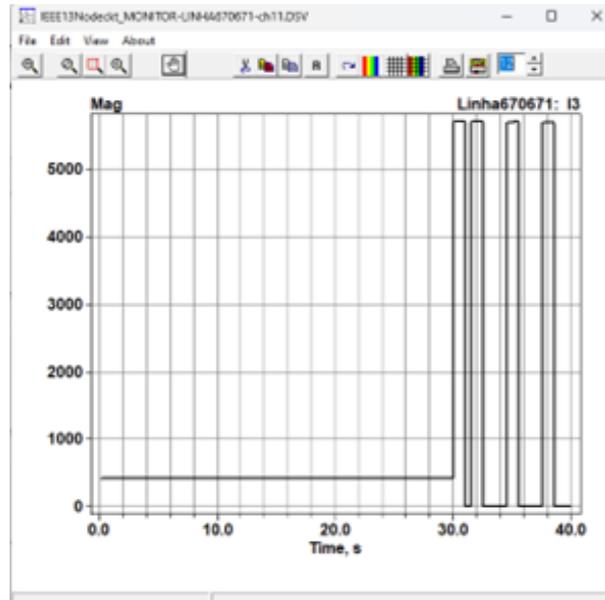


Figure 34: Gráfico IEEE 13 Corrente Barra 671 Fase 3 com geração distribuída ajustado - Fonte: OpenDSS

A fórmula do dimensionamento da unidade 50 de fase do relé de sobrecorrente mostra o efeito que o ocorreu acima:

$$f * \frac{I_{cc-3\phi}}{RTC} \leq I_{\min}^{AT} (50F)$$

Como houve um aumento na corrente de curto houve uma necessidade de aumentar o limite da corrente mínima de atuação do relé.

## 5 Conclusão & Trabalhos Futuros

A geração distribuída sem dúvidas veio como uma opção de geração de energia que a longo prazo traz um custo-benefício maior para o consumidor, porém há de se tomar cuidado quando o assunto é proteção. Pode – se observar por meio do trabalho que, dependendo do nível de inserção de geração distribuída há uma influência direta dela no desempenho do sistema e na parte de dimensionamento de dispositivos elétricos.

Os impactos da geração distribuída ficaram claros no trabalho por meio da comparação das correntes de curto, das simulações no OpenDSS e ajustes que foram realizados para adaptação da proteção. Inicialmente observou se um aumento natural das correntes de curto e alteração de algumas curvas de relés de sobrecorrente que dependiam desses valores.

O aprofundamento da utilização do OpenDSS para ajuste de proteção poderá ser realizado em trabalhos futuros, pois ainda há muito o que explorar vide inúmeros trabalhos e simulações que foram desenvolvidos nele com o objetivo de entender quais os impactos da geração distribuída não só na proteção mas em outros fatores.

Um dos trabalhos que já foi realizado por alguns estudantes da universidade de Wollongong é a simular um esquema de proteção adaptativa para o sistema IEEE 13 Barras. A ideia básica é mudar a corrente mínima de atuação conforme o nível de inserção de geração distribuída, assim consegue – se acompanhar o aumento da corrente de curto conforme há o aumento da inserção da geração distribuída. [4]

Além disso no próprio fórum do OpenDSS há um arquivo que é disponibilizado chamado “DG Protection” e possui alguns estudos de proteção de sistemas elétricos utilizando vários dispositivos além disso fazendo inserção de geração distribuída com vários níveis.

## Referências

- [1] J. M. Filho and D. R. Mamede, *Proteção do Sistemas Elétricos de Potência*. KLS, 2011.
- [2] R. J. A. Frazão, *Proteção do Sistema Elétrico de Potência*. KLS, 2019.
- [3] P. M. A. D. de Almeida, *Apostila de Proteção de Sistemas Elétricos.*, 2020.
- [4] M. Yousaf, K. M. Muttaqi, and D. Sutanto, "Overcurrent protection scheme for the iee 13-node benchmark test feeder with improved selectivity," 2011.