

Universidade Federal da Bahia  
Departamento de Engenharia Elétrica e Computação - DEEC

## **Relatório da Etapa II - Trabalho de Curto-Circuito - 2021.1**

Discentes: Henrique Nunes Poleselo, Leonardo Lima, Miguel Damásio  
Docente: Daniel Barbosa

Maio  
2021

# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Especificações</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Desenvolvimento dos Scripts</b>	<b>2</b>
2.1	Diagrama de Sequência Zero . . . . .	3
2.2	Falta Monofásica . . . . .	3
2.3	Falta Bifásica . . . . .	5
2.4	Falta Bifásica à Terra . . . . .	6
2.5	Um condutor aberto na linha LT05C1 . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Simulações</b>	<b>7</b>
3.1	Resistência de Aterramento do transformador TR03T1 . . . . .	7
3.2	Resistência de falta para controlar tensão resultante na barra 2 . . . .	8
3.3	Desconsiderando a Impedância Mútua $Z_{0m}$ . . . . .	8
3.4	Transformadores TR02T1 e TR03T1 em $Yy0$ . . . . .	8

# 1 Especificações

Durante esta segunda etapa do trabalho de curto-circuito, explorou-se os conceitos acerca de faltas assimétricas e condutor aberto. Utilizou-se o software Anafas para validar os dados calculados pelos scripts em Python que foram desenvolvidos. O sistema elétrico de potência que foi analisado em questão é mostrado na Fig. 1. Sendo os requisitos desta segunda etapa:

- As tensões de pós-falta ( $Va1$ ,  $Va2$ ,  $Va0$ ,  $Va$ ,  $Vb$ ,  $Vc$ ) em todas as barras em Volts e por unidade e as contribuições de corrente nas linhas de transmissão circunvizinhas ( $Ia1$ ,  $Ia2$ ,  $Ia0$ ,  $Ia$ ,  $Ib$ ,  $Ic$ ) para os seguintes curtos-circuitos:
  - Monofásico na barra da SE4 - 345kV com impedância de falta  
 $Z_{fa} = 1,673\Omega$
  - Bifásico na barra da SE5 - 138kV com impedância de falta  
 $Z_{fb} = 2,033\Omega$
  - Bifásico à terra na barra da SE2 - 345kV com impedância de falta  
 $Z_{fc} = 0,328\Omega$
  - Matriz de impedância de base de sequência positiva;
- Tensões de pós-falta ( $Va1$ ,  $Va2$ ,  $Va0$ ,  $Va$ ,  $Vb$ ,  $Vc$ ) em todas as barras:
  - Um condutor aberto na linha LT05C1 (5-6)
  - Dois condutores abertos na linha LT04C1 (4-9)
- Os diagramas de sequência negativa e zero;
- As matrizes de impedância de base negativa e zero;

Além disso, algumas tarefas relacionadas ao Anafas foram feitas, resultados e a discussão dessas podem ser encontrados na seção 3 de Simulações.

As tensões de pré-falta foram fornecidas, como indicado na tabela 1.

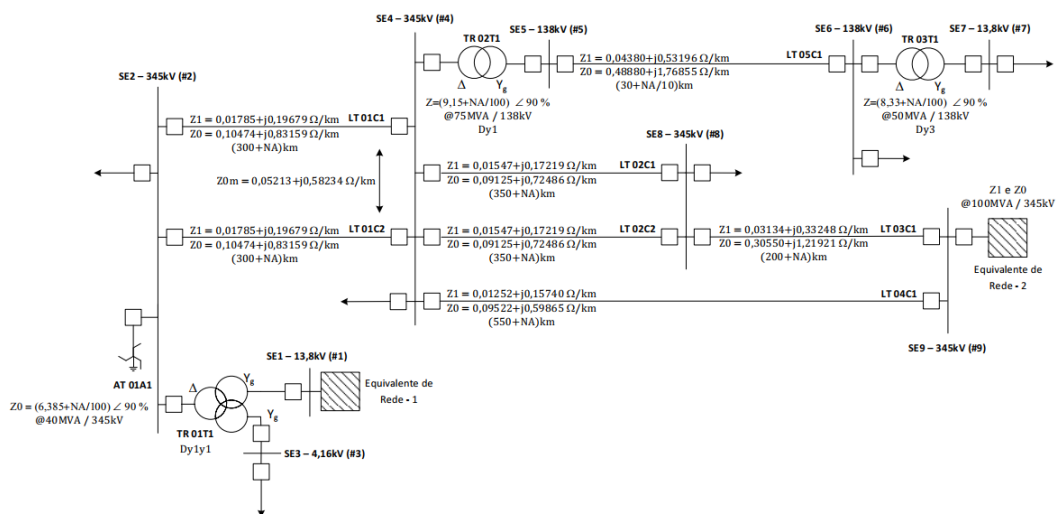


Figura 1: Representação do SEP que foi analisado.

Barra	Módulo(PU)	Angulo
1	1.0394	$-13.8148^{\circ}$
2	1.0266	$-13.8715^{\circ}$
3	1.0346	$-14.0869^{\circ}$
4	1.0222	$-13.6568^{\circ}$
5	1.0166	$-20.6902^{\circ}$
6	1.0161	$-21.1685^{\circ}$
7	0.9891	$-26.0122^{\circ}$
8	1.0136	$-12.2356^{\circ}$
9	1.0207	$-8.8582^{\circ}$

Tabela 1: Tabela das tensões de pré-falta.

## 2 Desenvolvimento dos Scripts

Nesta segunda etapa do trabalho de curto-circuito a grande questão de se trabalhar com faltas assimétricas e pela sua dificuldade de cálculo por meio do método tradicional utilizado na etapa 1, é trabalhar com o sistema de componentes simétricos. Na primeira etapa deste trabalho, para o cálculo das faltas simétricas, fez-se o uso do diagrama de sequência positiva. Para o cálculo de componentes simétricos, estende-se os diagramas para o de sequência zero e sequência negativa. É importante salientar que no dado SEP em questão, o diagrama de sequência negativa é o mesmo que o de sequência positiva por não haver máquinas rotativas no sistema.

Fez-se proveito do que foi feito na primeira etapa, já que o Z-Barra e Y-Barra de sequência positiva foram exportados como CSV e os mesmos são necessários para o cálculo das correntes de falta, tensão de pós-falta e correntes circunvizinhas de sequência. A importação das matrizes foi feita no script *assymetrical-fault.py*, que é o código principal para o cálculo dos requisitos mencionados na seção 1.

## 2.1 Diagrama de Sequência Zero

Como foi mencionado, é necessário construir o diagrama de sequência zero, portanto, como foi orientado, utilizou-se o método do Z-Barra para a construção da matriz Z-Barra de sequência zero. Lembrando que na sequência zero, dados adicionais como a impedância mútua e transformadores de aterramento. Ambas as matrizes Y-Barra e Z-Barra de sequência 0 podem ser vistos nas Fig. 11 e Fig. 12, respectivamente anexados a este relatório. Além disso a matriz Z-Barra de sequência negativa também foi anexada na Fig. 13.

## 2.2 Falta Monofásica

Para o cálculo das tensões de pós-falta monofásicas, é necessário o cálculo da corrente de falta, visto que a variação das tensões nas barras é resultado da corrente de falta passante entre elas. No entanto, o cálculo deve ser feito para as tensões de pós-falta de sequência positiva, negativa e zero. Por se tratar de uma falta monofásica, as correntes de falta de sequência são iguais, portanto, no cálculo das correntes têm-se do script *assymetric-fault.py*:

Corrente de Falta na barra 4 ê: em PU/Graus: (5.8566, -65.7072)  
 Corrente de Falta na barra 4 ê: Módulo(kA): (0.9801, -65.7072)

É importante salientar que para o cálculo da corrente de falta monofásica, há uma dependência direta com as matrizes Z-Barra de sequência positiva, negativa e zero, que pode ser notado na equação (1):

$$I_{f_k} = \frac{V_{pref}}{3 \cdot Z_{f_k} + Z_{k_{kn}} + Z_{k_{kp}} + Z_{k_{k0}}} \quad (1)$$

Onde  $I_{f_k}$  representa a corrente de falta,  $V_{pref}$  a tensão de pré-falta,  $Z_{k_{kp}}$  o elemento da matriz Z-Barra de sequência positiva (onde o k representa a barra em que a falta ocorre),  $Z_{k_{kn}}$  o elemento da matriz Z-Barra de sequência negativa e  $Z_{k_{k0}}$  o elemento da matriz Z-Barra de sequência zero.

Para calcular as tensões de pós-falta  $V_{pos_p}$  de sequência positiva em cada barra:

$$V_{pos_p} = V_{pref} - Z_{k_{kp}} \cdot I_{f_k} \quad (2)$$

Para calcular as tensões de pós-falta  $V_{pos_n}$  de sequência negativa em cada barra:

$$V_{pos_n} = -Z_{k_{jn}} \cdot I_{f_k} \quad (3)$$

Onde  $-Z_{k_{jn}}$  representa o elemento de transferência da matriz Z-Barra de sequência negativa, ou seja, sendo  $k$  o número da barra de falta e  $j$  a barra em que o cálculo da tensão de pós-falta está sendo feito.

Para calcular as tensões de pós-falta  $V_{pos_0}$  de sequência zero em cada barra:

$$V_{pos_0} = -Z_{k_{j0}} \cdot I_{f_k} \quad (4)$$

Onde  $Z_{k_{j0}}$  representa o elemento de transferência da matriz Z-Barra de sequência zero.

Após o cálculo das tensões de pós-falta de sequência, ao aplicar componente simétrico às tensões, obtêm-se as tensões de pós-falta por fase. O mesmo vale para as correntes circunvizinhas, como mostrado na equação 5.

$$V_{ph} = [A] \cdot V_{seq} \quad (5)$$

Onde  $V_{ph}$  representa a tensão de pós-falta de fase e é neste caso um vetor 3x1, assim como  $A$  é a matriz de transformação 3x3 que contém os operadores rotacionais e  $V_{seq}$  as tensões de pós-falta de sequência. O mesmo procedimento vale para as correntes circunvizinhas, exceto que o  $V_{seq}$  é substituído pelas correntes circunvizinhas de sequência.

Com as tensões de pós-falta calculadas, consegue-se calcular as correntes circunvizinhas de sequência positiva 6, negativa 7 e zero 8.

$$I_{cp} = V_{pos_{ph}} - V_{pos_{pk}} \cdot (-Y_{h_{kp}}) \quad (6)$$

Onde  $Y_{h_{kp}}$  representa o elemento da matriz Y-Barra, em que os índices  $h$  sendo o número da barra conectada à barra de falta e  $k$  a barra de falta. O mesmo vale para os índices das tensões de pós-falta de sequência positiva  $V_{pos_{ph}}$  e  $V_{pos_{pk}}$ .

$$I_{cn} = V_{pos_{nh}} - V_{pos_{nk}} \cdot (-Y_{h_{kn}}) \quad (7)$$

$$I_{c0} = V_{pos_{0h}} - V_{pos_{0k}} \cdot (-Y_{h_{k0}}) \quad (8)$$

As tensões de pós-falta em todas as barras e as contribuições de corrente nas linhas de transmissão circunvizinhas podem ser encontradas em anexo a este relatório.

## 2.3 Falta Bifásica

Os cálculos foram feitos com base no fato de que a falta bifásica ocorre entre as fases B e C. Em comparação à falta monofásica, as correntes de falta da falta bifásica não são iguais, portanto é necessário calcular uma a uma, através das relações 13 e 15:

$$I_{f_{k_p}} = \frac{V_{pref}}{Z_{f_k} + Z_{k_{k_n}} + Z_{k_{k_p}} + Z_{k_{k_0}}} \quad (9)$$

É importante notar que o  $3 * Z_{f_k}$  não aparece no denominador justamente por não ser igual nas 3 sequências.

$$I_{f_{k_n}} = -\frac{V_{pref}}{Z_{f_k} + Z_{k_{k_n}} + Z_{k_{k_p}} + Z_{k_{k_0}}} \quad (10)$$

Além disso a corrente de falta de sequência negativa é a mesma em módulo da corrente de sequência positiva apenas defasada em 180 graus. E como as faltas ocorrem nas fases B e C, a corrente de falta de sequência 0 será 0.

Por meio do script desenvolvido em Python, obteve-se a seguinte saída do programa, *i.e.*: as seguintes correntes de falta de sequência:

```
Corrente de Falta de seq. + na barra 5 é: em PU,Graus: (3.2859, -107.8017)
Corrente de Falta de seq. + na barra 5 é: Módulo(kA),Graus: (1.3747, -107.8017)
Corrente de Falta de seq. - na barra 5 é: em PU,Graus: (3.2859, 72.1982)
Corrente de Falta de seq. - na barra 5 é: Módulo(kA),Graus: (1.3747, 72.1982)
Corrente de Falta de seq. 0 na barra 5 é: em PU,Graus: (0.0, 0.0)
Corrente de Falta de seq. 0 na barra 5 é: Módulo(kA),Graus: (0.0, 0.0)
```

Percebe-se que a corrente de falta de sequência 0 é 0, como foi comentado previamente. Após isto, aplicou-se componentes simétricos para obter-se as correntes de fase, onde naturalmente a corrente de fase de A será 0. Os resultados podem ser consultados na tabela em anexo a este relatório.

Para calcular as tensões de pós-falta  $V_{pos_p}$  de sequência positiva em cada barra:

$$V_{pos_p} = V_{pref} - Z_{k_{k_p}} \cdot I_{f_{k_p}} \quad (11)$$

Para calcular as tensões de pós-falta  $V_{pos_n}$  de sequência negativa em cada barra:

$$V_{pos_n} = -Z_{k_{j_n}} \cdot I_{f_{k_n}} \quad (12)$$

Já as tensões de pós-falta de sequência 0 serão 0 já que o cálculo é similar ao da equação 12 e a corrente de falta de sequência 0 é 0.

Para calcular as correntes circunvizinhas de sequência, faz-se o mesmo procedimento, utilizando as mesmas equações 6, 7 e 8 de falta monofásica, exceto que deve-se tomar cuidado com as defasagens que devem ser aplicadas às barras e estas se alternam de sequência positiva para negativa.

## 2.4 Falta Bifásica à Terra

No caso de falta bifásica ligado ao terra, o cálculo das correntes de falta de sequência sofrem uma pequena alteração, esta sendo:

$$I_{f_{k_p}} = \frac{V_{pref}}{Z_{k_{k_p}} + \frac{(Z_{k_{k_n}} \cdot (Z_{k_{k_0}} \cdot 3 \cdot Z_{f_k}))}{3 \cdot Z_{f_k} + Z_{k_{k_n}} + Z_{k_{k_0}}}} \quad (13)$$

$$I_{f_{k_n}} = -\frac{I_{f_{k_p}} \cdot (Z_{k_{k_0}} + 3 \cdot Z_{f_k})}{3 \cdot Z_{f_k} + Z_{k_{k_n}} + Z_{k_{k_0}}} \quad (14)$$

$$I_{f_{k_0}} = -\frac{I_{f_{k_p}} \cdot Z_{k_{k_n}}}{3 \cdot Z_{f_k} + Z_{k_{k_n}} + Z_{k_{k_0}}} \quad (15)$$

O script desenvolvido retorna os seguintes valores para as correntes de falta de sequência:

```
Corrente de Falta de seq. + na barra 2 é: em PU,Graus: (14.64372, -69.8419)
Corrente de Falta de seq. + na barra 2 é: Módulo(kA),Graus: (2.45059, -69.8419)
Corrente de Falta de seq. - na barra 2 é: em PU,Graus: (10.707252, 110.4772)
Corrente de Falta de seq. - na barra 2 é: Módulo(kA),Graus: (1.7918, 110.4772)
Corrente de Falta de seq. 0 na barra 2 é: em PU,Graus: (3.937, 109.29)
Corrente de Falta de seq. 0 na barra 2 é: Módulo(kA),Graus: (0.6588, 109.29)
```

Para o cálculo das tensões de pós-falta de sequência utiliza-se as mesmas equações 11 e 12 do caso bifásico da seção 2.3, no entanto, no caso de bifásico ligado a terra a corrente de falta de sequência 0 não é 0 como foi apresentado no resultado acima, portanto:

$$V_{pos_0} = -Z_{k_{j_0}} \cdot I_{f_{k_0}} \quad (16)$$

As tensões de pós-falta em todas as barras e as contribuições de corrente nas linhas de transmissão circunvizinhas podem ser encontradas em anexo a este relatório. Para o cálculo das correntes circunvizinhas de sequência fez-se o mesmo procedimento da seção 2.2. Após todos os cálculos terem sido feitos, aplicou-se componente simétrico às tensões e correntes para se obter as relações por fase. Todos os resultados referentes à tensões de pós-falta, correntes de falta, circunvizinhas de sequência e fase se encontram em um arquivo PDF *TabelaTensoesCorrentesResultado.pdf* juntamente com o arquivo deste relatório Os resultados foram colocados em uma tabela que se encontram em anexo a este relatório.





Figura 3: Resistência de aterramento para uma corrente de falta de 30A na barra 7.

### 3.2 Resistência de falta para controlar tensão resultante na barra 2

Foi simulado a falta na barra 4 direto para o terra de forma a analisar qual era o afundamento na barra 2, que foi indicado na Fig. 5. Ao ajustar a resistência de falta da barra, de forma que o afundamento não fosse superior a 10% da tensão original, ou seja, 0.9PU. Tal valor foi atingido com uma resistencia de falta de 130  $\Omega$ .

### 3.3 Desconsiderando a Impedância Mútua Z0m

Foi simulado e observadas algumas alterações nas tensões das barras e nas contribuições das correntes devido à remoção da impedância mútua  $Z0m$ . Isso ocorre pois a impedância mútua faz parte do diagrama de sequência zero do circuito e portanto sua remoção tem impacto no Z-Barra de sequência zero. Como pode ser visto respectivamente nas barras 2, 4 e 5, nas Figuras 7, 8 e 9, respectivamente.

### 3.4 Transformadores TR02T1 e TR03T1 em Yy0

Percebeu-se a alteração nas tensões de barra devido à alteração do grupo fasorial dos transformadores que compõe o circuito. Em especial nos transformadores próximos à barra 5, que é a barra onde ocorre a falta. Apesar da alteração da configuração dos transformadores trazer mudanças no diagrama de sequência 0, a

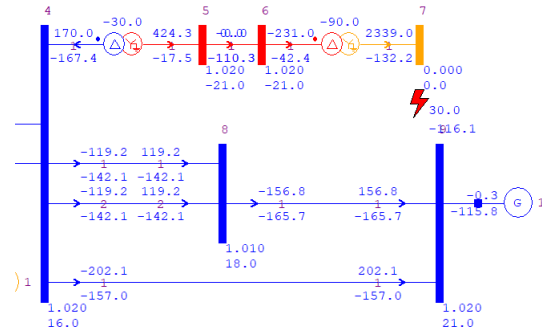
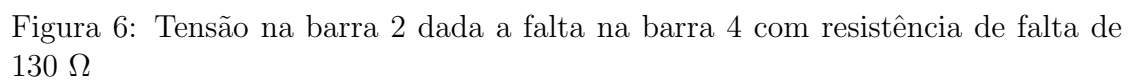


Figura 4: Corrente resultante com a configuração de resistência de aterramento de 13800.

falta bifásica não é alterada pela corrente de falta de sequência 0, portanto o maior motivo das alterações percebidas nas tensões das barras é a alteração do grupo fasorial. As tensões nas barras podem ser observadas nas Fig. 10 e comparadas com os valores das tensões pós-falta de fase A fornecida em anexo.



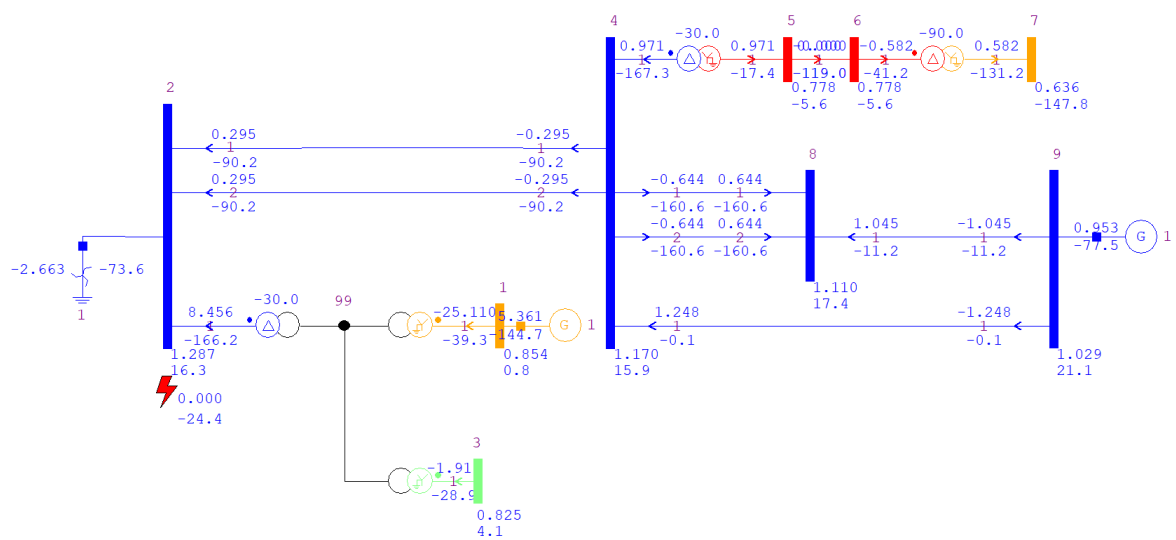


Figura 7: Simulação de falta na barra 2 sem impedância mútua.

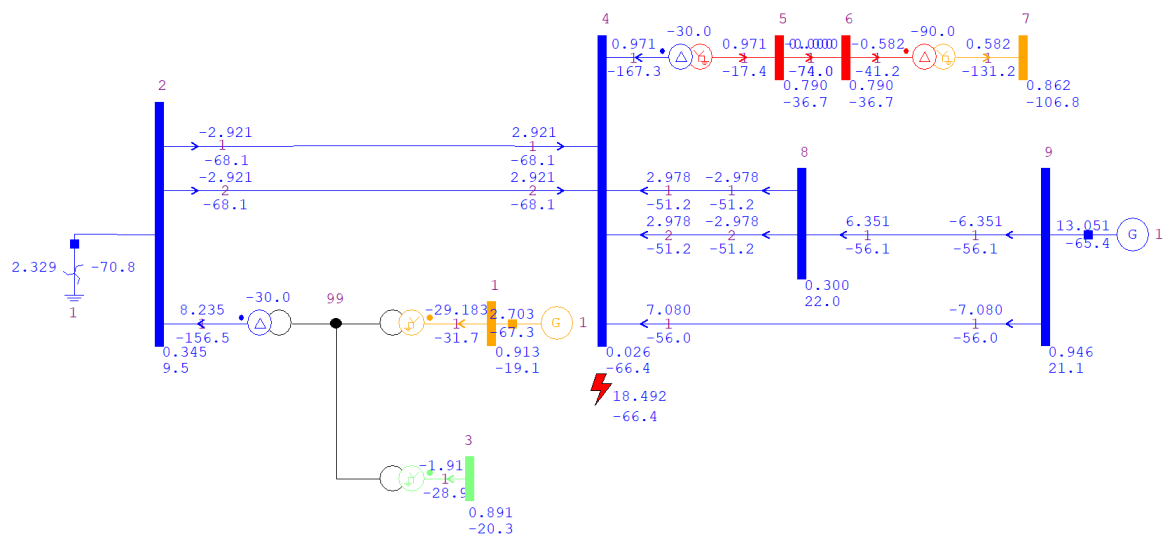


Figura 8: Simulação de falta na barra 4 sem impedância mútua.

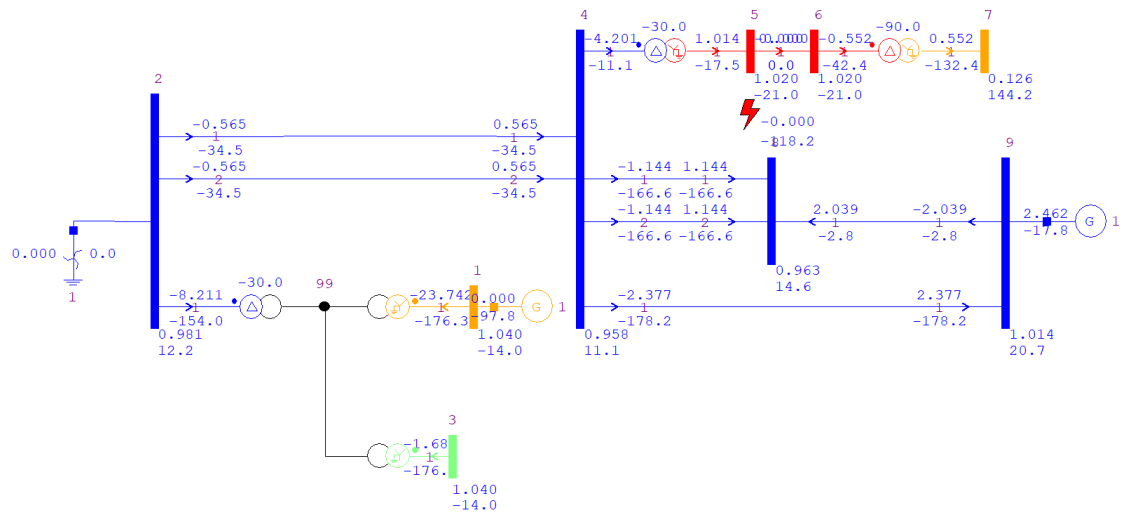


Figura 9: Simulação de falta na barra 5 sem impedância mútua.

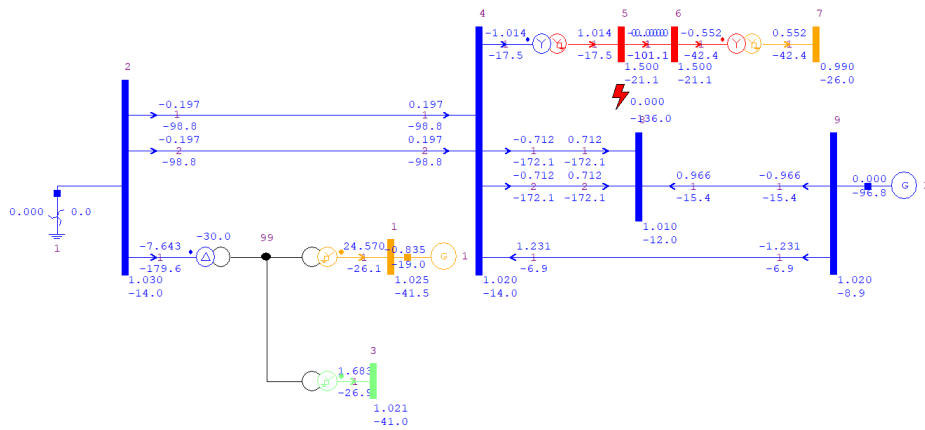


Figura 10: Falta na barra 5 com alteração da configuração dos transformadores TR02T1 e TR03T1

Ybarra									
(2.6709-99.8703j)	0j	0j	0j	0j	0j	0j	0j	0j	(-2.4756+94.6770j)
0j	(0.6030-11.6414j)	0j	(-0.6030+5.4350j)	0j	0j	0j	0j	0j	0j
0j	0j	(0.1211-6.6843j)	0j	0j	0j	0j	0j	0j	(-0.1211+6.6843j)
0j	(-0.6030+5.4350j)	0j	(2.3009-18.0038j)	0j	0j	0j	(-1.1431+9.0810j)	(-0.5547+3.4877j)	0j
0j	0j	0j	(0.9035-11.4125j)	(-0.9035+3.2692j)	0j	0j	0j	0j	0j
0j	0j	0j	(-0.9035+3.2692j)	(0.9035-3.2692j)	0j	0j	0j	0j	0j
0j	0j	0j	0j	0j	(-5.9594j)	0j	0j	0j	0j
0j	0j	0j	(-1.1431+9.0810j)	0j	0j	0j	(2.2605-13.5401j)	(-1.1173+4.4590j)	0j
0j	0j	0j	(-0.5547+3.4877j)	0j	0j	0j	(-1.1173+4.4590j)	(8.6329-98.6839j)	0j
(-2.4756+94.6770j)	0j	(-0.1211+6.6843j)	0j	0j	0j	0j	0j	0j	(2.8501-132.0482j)

Figura 11: YBarra de sequência 0 dado em PU.

Zbarra									
(0.0006+0.0352j)	0j	(0.0003+0.0266j)	0j		0j	0j	0j	0j	(0.0003+0.0266j)
0j	(0.0048+0.1099j)	0j	(0.0040+0.0516j)	0j	0j	0j	(0.0039+0.0354j)	(-6.5955e-05+0.00j)	0j
(0.0003+0.0266j)	0j	(0.0030+0.1776j)	0j	0j	0j	0j	0j	0j	(0.0003+0.0280j)
0j	(0.0040+0.0516j)	0j	(0.015+0.1094j)	0j	0j	0j	(0.01283+0.07503j)	(0.0002+0.0074j)	0j
0j	0j	0j	0j	(4.3538e-18+0.122j)	(4.3538e-18+0.122j)	0j	0j	0j	0j
0j	0j	0j	0j	(8.3160e-18+0.122j)	(0.07854+0.4069j)	0j	0j	0j	0j
0j	0j	0j	0j	0j	0.1678j	0j	0j	0j	0j
0j	(0.0039+0.0354j)	0j	(0.0128+0.075j)	0j	0j	0j	(0.0224+0.1243j)	(0.0003+0.0085j)	0j
0j	(-6.5955e-05+0.00j)	0j	(0.0002+0.0074j)	0j	0j	0j	(0.0003+0.0085j)	(0.0008+0.01071j)	0j
(0.0003+0.02661j)	0j	(0.0003+0.02807j)	0j	0j	0j	0j	0j	0j	(0.0003+0.0280j)

Figura 12: ZBarra de sequência 0 dado em PU.

Zbarra (sequência negativa)									
(0.0028+0.0376j)	(0.0023+0.0229j)	(0.0026+0.03402j)	(0.0014+0.01438j)	(0.0014+0.0143j)	(0.0014+0.01438j)	(0.0014+0.01438j)	(0.001+0.0102j)	(8.01288e-05+0.00j)	(0.0026+0.0340j)
(0.0023+0.0229j)	(0.0029+0.04038j)	(0.00257774273534j)	(0.0017+0.02529j)	(0.0017+0.02529j)	(0.00177+0.02529j)	(0.0017+0.02529j)	(0.0012+0.0180j)	(7.9044e-05+0.002j)	(0.0025+0.02722j)
(0.0026+0.0340j)	(0.0025+0.0272j)	(0.0055+0.1898j)	(0.0015+0.01705j)	(0.0015+0.0170j)	(0.0015+0.01705j)	(0.0015+0.01705j)	(0.0011+0.0121j)	(8.2714e-05+0.001j)	(0.0027+0.0403j)
(0.0014+0.0143j)	(0.0017+0.0252j)	(0.0015+0.0170j)	(0.0024+0.03169j)	(0.0024+0.03169j)	(0.0024+0.03169j)	(0.0024+0.03169j)	(0.0017+0.0226j)	(0.00011+0.0025j)	(0.0015+0.0170j)
(0.0014+0.0143j)	(0.0017+0.0252j)	(0.0015+0.0170j)	(0.0024+0.03169j)	(0.0024+0.03169j)	(0.0024+0.1544j)	(0.0024+0.1544j)	(0.0017+0.0226j)	(0.00011+0.0025j)	(0.0015+0.0170j)
(0.0014+0.0143j)	(0.0017+0.0252j)	(0.0015+0.0170j)	(0.0024+0.03169j)	(0.0024+0.03169j)	(0.0094+0.2399j)	(0.0094+0.2399j)	(0.0017+0.0226j)	(0.00011+0.0025j)	(0.0015+0.0170j)
(0.0014+0.0143j)	(0.0017+0.0252j)	(0.0015+0.0170j)	(0.0024+0.03169j)	(0.0024+0.03169j)	(0.0094+0.2399j)	(0.0094+0.4077j)	(0.0017+0.0226j)	(0.00011+0.0025j)	(0.0015+0.0170j)
(0.0010+0.0102j)	(0.0012+0.0180j)	(0.0011+0.01219j)	(0.0017+0.02266j)	(0.0017+0.0226j)	(0.0017+0.0226j)	(0.00176+0.02266j)	(0.0028+0.0343j)	(0.00013+0.0027j)	(0.0011+0.0121j)
(8.0128e-05+0.001j)	(7.9044e-05+0.002j)	(8.2714e-05+0.001j)	(0.0001+0.0025j)	(0.0001+0.0025j)	(0.0001+0.0025j)	(0.0001+0.0025j)	(0.00013+0.002j)	(0.0001+0.0032j)	(8.2714e-05+0.0013j)
(0.0026+0.03402j)	(0.0025+0.02722j)	(0.0027+0.0403j)	(0.0015+0.01705j)	(0.0015+0.01705j)	(0.0015+0.01705j)	(0.0015+0.01705j)	(0.0011+0.01219j)	(8.2714e-05+0.001j)	(0.0027+0.04033j)

Figura 13: Matriz ZBarra de sequência negativa dado em PU.