

IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DE CURTO-CIRCUITO ENTRE DIFERENTES PONTOS DO SISTEMA ELÉTRICO

MARIANA MACHADO

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE
JANEIRO, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO
GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

APROVADO POR:

PROF. ANTÔNIO CARLOS FERREIRA, PH.D.
(ORIENTADOR)

SERGIO PORTO ROMERO, D.SC.
(CO - ORIENTADOR)

PROF. SEBASTIÃO ÉRCULES MELO DE OLIVEIRA, D.Sc

JUAN IGNACIO PATRICIO ROSSI GONZALEZ, M. SC.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
DEZEMBRO 2010

RESUMO:

Este trabalho retrata a implementação de um algoritmo de solução para curto-circuito entre dois pontos distintos de uma rede elétrica no programa de análise de faltas ANAFAS, desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL.

O programa ANAFAS é um programa de análise de faltas utilizado em grande parte do setor elétrico e está apto a realizar estudos de curto-circuito em redes elétricas de pequeno, médio e grande portes tal qual o sistema elétrico brasileiro, por exemplo. Com esta implementação, o ANAFAS passa a poder solucionar também casos de curto-circuito que envolvem 2 pontos distintos do sistema.

O principal objetivo deste trabalho é descrever o método que foi implementado no programa ANAFAS para solucionar curtos-circuitos entre pontos e apresentar alguns resultados obtidos com o mesmo. Especial atenção deve ser dada quando o defeito envolve pontos com diferentes bases de tensão.

Os curtos-circuitos entre pontos só podem ocorrer em algumas situações específicas, devido à configuração física do sistema elétrico, pois para que este tipo de defeito ocorra, é imprescindível que haja contato entre fases de dois circuitos/barramentos distintos. Isto pode acontecer em regiões cujas linhas estejam fisicamente próximas, sendo paralelas ou se cruzando em algum ponto do sistema ou ainda em terminais de transformadores. Estes curtos-circuitos podem ser do tipo sólido ou através de impedância.

Este trabalho descreve as etapas do cálculo e algumas características da implementação realizada no programa, além da validação dos resultados obtidos através de cálculos manuais e do uso do programa ATP.

ÍNDICE

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 CURTO-CIRCUITO CONVENCIONAL | 4 |
| 1.2 CURTO-CIRCUITO ENTRE PONTOS | 5 |
| 2. METODOLOGIA | 7 |
| 2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS | 7 |
| 2.1.1 <i>Relação entre as Bases de Tensão (A)</i> | 8 |
| 2.1.2 <i>Matriz de Admitâncias de Barra (Y_{BARRA})</i> | 9 |
| 2.2 DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA | 14 |
| 2.2.1 <i>Curto-Circuito entre Pontos Trifásico Sólido</i> | 14 |
| 2.2.2 <i>Curto-Circuito entre Pontos Trifásico Através de Impedância</i> | 18 |
| 2.3 PROGRAMA ANAFAS | 21 |
| 2.3.1 <i>Expansão do Equivalente</i> | 22 |
| 3. IMPLEMENTAÇÃO | 24 |
| 4. RESULTADOS OBTIDOS | 28 |
| 4.1 SOLUÇÃO DO CURTO-CIRCUITO ENTRE PONTOS TRIFÁSICO SÓLIDO COM DIFERENTES BASES DE TENSÃO | 28 |
| 4.1.1 <i>Descrição do Sistema</i> | 29 |
| 4.1.2 <i>Solução Passo-a-Passo do Método Proposto</i> | 31 |
| 4.1.3 <i>Programa Anafas</i> | 34 |
| 4.1.4 <i>Programa ATP</i> | 40 |
| 4.2 SOLUÇÃO DO CURTO-CIRCUITO ENTRE PONTOS TRIFÁSICO ATRAVÉS DE IMPEDÂNCIA COM DIFERENTES BASES DE TENSÃO | 43 |
| 4.2.1 <i>Descrição do Sistema</i> | 44 |
| 4.2.2 <i>Solução Passo-a-Passo do Método Proposto</i> | 46 |
| 4.2.3 <i>Programa Anafas</i> | 49 |
| 4.2.4 <i>Programa ATP</i> | 55 |
| 4.3 SOLUÇÃO DO CURTO-CIRCUITO ENTRE PONTOS TRIFÁSICO SÓLIDO COM DIFERENTES REFERÊNCIAS ANGULARES | 58 |
| 4.3.1 <i>Descrição do Sistema</i> | 59 |
| 4.3.2 <i>Solução Passo-a-Passo do Método Proposto</i> | 60 |
| 4.3.3 <i>Programa Anafas</i> | 64 |
| 4.3.4 <i>Programa ATP</i> | 70 |
| 4.4 CURTO-CIRCUITO ENTRE PONTOS TRIFÁSICO ATRAVÉS DE IMPEDÂNCIA X SÓLIDO | 73 |
| 4.5 SOLUÇÃO DO CURTO-CIRCUITO ENTRE PONTOS MONOFÁSICO SÓLIDO EM UM SISTEMA DE GRANDE PORTE | 76 |
| 4.6 SOLUÇÃO DO CURTO-CIRCUITO ENTRE PONTOS TRIFÁSICO DO TIPO SÓLIDO EM UM SISTEMA DE GRANDE PORTE | 78 |
| 5. CONCLUSÕES | 83 |
| 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 85 |

1. INTRODUÇÃO

Devido ao crescimento da demanda por energia elétrica no Brasil nas últimas décadas, o sistema elétrico brasileiro se tornou bastante extenso e com muitas interligações fazendo com que sua operação e planejamento sejam muito complexos.

Um sistema elétrico das proporções do sistema brasileiro está sujeito a sofrer diversos tipos de falha, como curtos-circuitos e sobretensões, que podem ser causados por intempéries, falhas de isolamento ou até mesmo falhas humanas. Devido à sua extensão e complexidade, é praticamente impossível realizar estudos de análise de faltas sem a ajuda de um programa computacional como o ANAFAS.

O ANAFAS se dedica basicamente a solucionar casos de curtos-circuitos ditos convencionais, independentemente do agente causador da falta. Estes curtos-circuitos convencionais envolvem fases de um mesmo ponto do sistema e a terra e são classificados como monofásico, bifásico, bifásico-terra ou trifásico e ainda são diferenciados por serem sólidos ou através de impedância. Este trabalho faz parte de uma atualização do programa ANAFAS e irá tratar de um tipo específico de defeito, que será chamado de curto-circuito entre pontos.

O estudo convencional de análise de faltas envolve de 1 a 3 fases de um circuito em um determinado ponto, além da possibilidade de envolver a terra e pode ser realizado através da utilização do programa computacional ANAFAS. Estes estudos são importantes para ajustes do sistema de proteção, dimensionamento de equipamentos, análise de ocorrências, entre outras funções.

A partir dos resultados desses estudos é possível dimensionar os equipamentos para um determinado sistema, pois é imprescindível ter conhecimento do nível de curto-circuito que o equipamento tem que suportar. Este estudo é utilizado para compra de novos equipamentos e também para equipamentos já instalados, pois o crescimento da rede elétrica altera os níveis de curto-circuito.

Os ajustes do sistema de proteção consistem em ajustar os parâmetros dos relés, por exemplo, com o intuito de prover seletividade, sensibilidade e velocidade de atuação dos mesmos.

Este trabalho apresenta um tipo diferente da falta. Como comentado anteriormente, este novo tipo está sendo retratado aqui como curto-circuito entre pontos. Este nome está baseado na forma como a falta ocorre, envolvendo 2 pontos do sistema elétrico.

Cada um dos pontos envolvidos no curto-circuito entre pontos pertence a um circuito/barramento diferente e pode envolver de 1 a 3 fases de cada ponto. Estes dois pontos podem pertencer a linhas de transmissão e/ou distribuição ou podem ainda ser os terminais de um transformador, por exemplo. Devido ao envolvimento de 2 pontos distintos do sistema elétrico, existe a possibilidade de que cada ponto tenha um nível de tensão diferente, o que requer um tratamento especial quando os cálculos são realizados utilizando grandezas expressas por unidade (pu).

Como condição necessária, porém não suficiente para a ocorrência do curto-circuito entre pontos é imprescindível que os dois pontos envolvidos no defeito estejam fisicamente próximos e, por alguma causa, se toquem. Estes defeitos podem ser causados por intempéries, falhas de isolamento ou até mesmo falhas humanas da mesma forma como causam os curtos-circuitos convencionais.

Este trabalho está estruturado em seis capítulos com o intuito de facilitar sua compreensão da seguinte forma:

Este capítulo apresenta o problema, e mostra as principais diferenças entre o curto-circuito convencional e o curto-circuito entre pontos

O capítulo 2 trata a metodologia que deve ser aplicada para solução do curto-circuito entre pontos, além de apresentar as condições iniciais que devem ser consideradas para solução deste tipo de defeito.

O capítulo 3 retrata a implementação do algoritmo de solução do curto-circuito entre pontos no programa de análise de faltas do Cepel, ANAFAS. Faz ainda o detalhamento de cada tipo deste defeito que o programa está capacitado a solucionar.

O Capítulo 4 demonstra, através dos resultados obtidos a partir do programa ANAFAS e outros e ATP, que a implementação foi realizada com sucesso.

O capítulo 5 mostra as conclusões que foram tiradas a partir desta implementação e uma proposta para futuros trabalhos de final de curso.

O Capítulo 6 apresenta quais foram as referencias bibliográficas que foram utilizadas para realização deste trabalho.

1.1 *CURTO-CIRCUITO CONVENCIONAL*

Os sistemas elétricos consistem em diversos dispositivos e equipamentos elétricos que estão sujeitos a diferentes níveis de tensão e corrente. Por diversas vezes, estes sistemas também se encontram expostos aos fatores climáticos, como em uma subestação aberta, por exemplo. Devido às suas condições, os sistemas elétricos estão muito vulneráveis quando se trata da possibilidade de ocorrência de curto-circuito.

Um curto-circuito é caracterizado pela passagem de corrente elétrica com valores acima dos valores nominais, o que ocorre devido à redução da impedância como consequência de um defeito.

Um curto-circuito do tipo convencional ocorre envolvendo apenas um ponto do sistema, que pode envolver de 1 a 3 fases do circuito, além da possibilidade do envolvimento do terra. Este tipo de defeito é mais freqüente que um curto-circuito entre pontos.

Os curtos-circuitos convencionais podem ocorrer em qualquer parte do sistema elétrico, sem qualquer restrição, e podem ser causados por diferentes fatores. Algumas das causas são, por exemplo, quando um galho de árvore cai em uma linha, podendo envolver varias fases, ou então quando um poste cai no chão, fazendo com que os condutores toquem no chão diretamente ou através de algum objeto, o que caracterizaria um curto-circuito trifásico sólido ou através de impedância, respectivamente.

Os tipos de curto-circuito mais comuns e normalmente estudados são trifásico, bifásico, bifásico-terra e monofásico. Cada um destes tipos ainda pode ser classificado como curto-circuito sólido ou através de impedância. Estes curtos podem envolver de 1 a 3 fases de um único barramento, um único ponto de uma linha de transmissão/distribuição de algum equipamento. No entanto, para qualquer configuração, o curto-circuito convencional sempre acontece em um único ponto do sistema, independentemente de quantas fases estiverem envolvidas, pois fazem parte de uma única linha/barramento.

Com o intuito de simplificar a entrada de dados e a montagem das matrizes de admitância de barra (Y_{BARRA}) utilizam-se componentes simétricas na solução de curtos-

circuitos, no entanto, o programa ANAFAS realiza parte dos cálculos em componentes de fase.

A figura 1 representa um caso de curto-circuito convencional do tipo monofásico através de impedância:

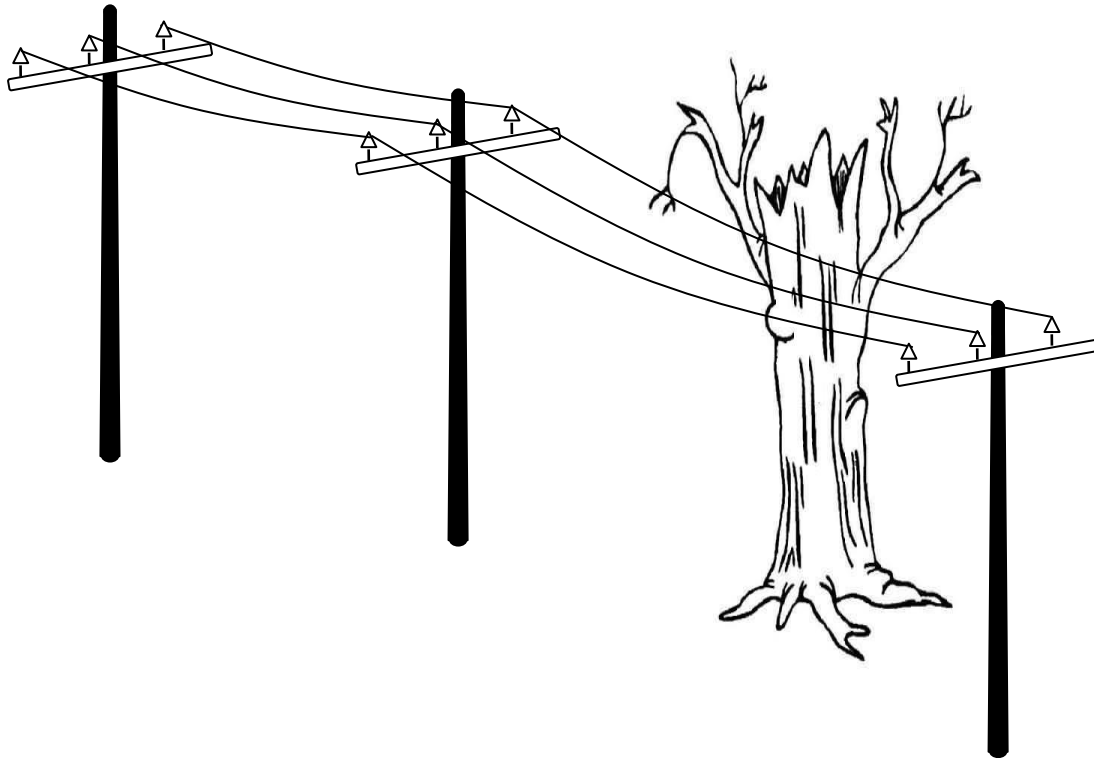


Figura 1 - Curto-circuito tradicional do tipo monofásico através de impedância.

1.2 *CURTO-CIRCUITO ENTRE PONTOS*

A principal diferença entre o curto-circuito convencional e o curto-circuito entre pontos é o número de pontos do sistema envolvido no defeito. O tipo convencional ocorre envolvendo um único ponto do sistema, independentemente de quantas fases estejam envolvidas no processo. Já o curto-circuito entre pontos ocorre envolvendo 2 pontos do

sistema, podendo ou não ter bases de tensão e/ou referências angulares distintas e também não depende do número de fases envolvidas no defeito.

Como condição primordial, porém não suficiente para ocorrência do curto-circuito entre pontos é imprescindível que dois circuitos estejam fisicamente próximos durante sua extensão ou que em algum momento se cruzem.

Caso esta condição inicial seja satisfeita, ainda é preciso que algum fator externo atue para a ocorrência da falta. Este fator externo pode ser devido a descargas atmosféricas ou galhos de árvores que caem sobre os condutores de dois circuitos diferentes, por exemplo.

Devido aos fatores necessários para sua ocorrência, este tipo de curto-circuito não é muito freqüente.

A figura 2 representa um caso de curto-circuito entre pontos do tipo monofásico sólido:

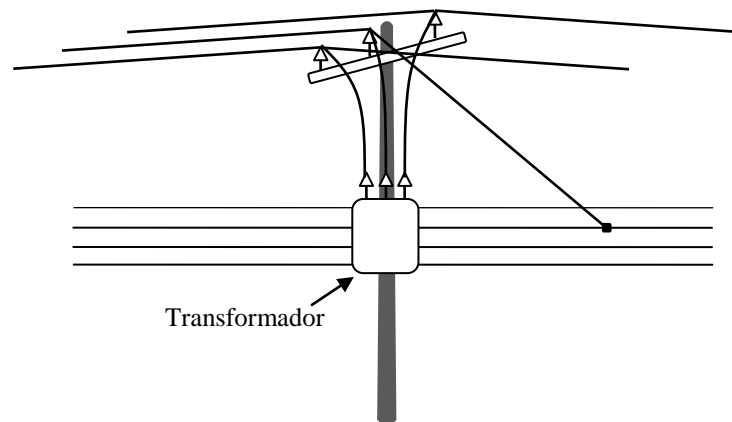


Figura 2 - Exemplo de caso de curto-circuito entre ponto monofásico do tipo sólido.

2. METODOLOGIA

Neste capítulo será apresentado o método de solução para casos de curto-circuito entre pontos desenvolvido com base no modelo de solução utilizado para casos de curto-circuito convencionais no programa ANAFAS. De fato, o método de solução existente foi adaptado para poder tratar também este novo tipo de defeito.

Com o intuito de simplificar, sem que haja perda de generalidade, o método apresentado neste capítulo é para solucionar apenas casos trifásicos de curto-circuito entre pontos, apesar do programa ANAFAS solucionar também os outros tipos (monofásico e bifásico).

A seguir, são apresentadas as considerações iniciais que fazem parte do método de solução. Estas considerações iniciais são válidas para quaisquer tipos de curto-circuito entre pontos.

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As considerações iniciais são condições genéricas, porém essenciais para solucionar casos de curto-circuito entre pontos, ou seja, são considerações que obrigatoriamente deverão ser observadas independentemente do tipo de curto-circuito entre pontos.

Estas considerações iniciais são quanto à relação entre as bases de tensão dos pontos envolvidos no caso e quanto à matriz de admitâncias de barra do sistema.

A relação entre as bases de tensão dos pontos envolvidos no caso é utilizada somente em casos de curto-circuito entre pontos, pois este tipo de defeito é o único que envolve dois pontos de dois circuitos/barramentos diferentes em um único curto. Esta relação está sendo designada neste trabalho pela letra A e pode apresentar qualquer valor positivo.

A matriz de admitâncias de barra é amplamente utilizada em estudos de curto-circuito tanto do tipo convencional quanto do tipo entre pontos. Esta matriz está sendo designada por Y_{BARRA} e é calculada por unidade (pu).

2.1.1 RELAÇÃO ENTRE AS BASES DE TENSÃO (A)

A relação entre as bases de tensão está sendo representada pela letra A neste trabalho e é necessária na solução de casos de curtos-circuitos entre pontos que utilizam grandezas em pu.

Esta relação A é utilizada para compatibilizar elementos das matrizes de admitância de barra, tensões e de injeções de corrente de pontos em curto com diferentes bases de tensão.

Esta relação pode ser representada pela figura 3 apresentada abaixo:

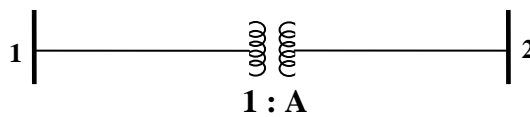


Figura 3 - Sistema com duas barras mostrando a relação A.

De acordo com a figura 3 pode-se definir uma equação para a relação entre as bases de tensão A .

$$A = \frac{V_2^{BASE}}{V_1^{BASE}}$$

Onde V_2^{BASE} é a base de tensão da barra 2 e V_1^{BASE} é a base de tensão da barra 1.

A relação A assumir qualquer valor positivo e pode ser interpretada de acordo com estes valores. Para casos em que A varia de zero a um ($0 < A < 1$) sabe-se que V_1^{BASE} é maior que V_2^{BASE} ($V_1^{BASE} > V_2^{BASE}$), para casos onde o valor de A é um ($A = 1$) sabe-se que V_1^{BASE} é

igual a V_2^{BASE} ($V_1^{BASE} = V_2^{BASE}$) e, finalmente, casos onde A é maior que um ($A > 1$) sabe-se que V_1^{BASE} é menor que V_2^{BASE} ($V_1^{BASE} < V_2^{BASE}$).

No caso de curto-circuito entre pontos do tipo sólido a relação A é utilizada para referir as admitâncias que estão em uma determinada base de tensão e potência (base 1) para uma outra base de tensão e potencia (base 2) durante o processo de solução de casos de curto-circuito entre pontos do tipo sólido, mostrado mais adiante.

2.1.2 MATRIZ DE ADMITÂNCIAS DE BARRA (Y_{BARRA})

A matriz de admitâncias de barra (Y_{BARRA}), que também é conhecida como matriz de admitâncias nodais, é muito importante para a análise e cálculo de defeitos em do sistemas elétricos. Esta matriz tem as seguintes características:

- Esparsa.
- Simétrica apenas quando não há transformador defasador (ΔY) no sistema.
- Os elementos da diagonal principal Y_{ii} são o somatório de todas as admitâncias ligadas à barra i .
- Os demais elementos Y_{ij} são formados como a admitância entre as barras i e j com o sinal negativo, acrescidos de um defasamento nos casos de trafos ΔY .
- O sistema pode ser descrito pela seguinte equação linear onde I e V são vetores de injeções de corrente e tensões pré-falta respectivamente.

$$I = Y_{BARRA}V$$

A figura 4 exemplifica a montagem da matriz Y_{BARRA} :

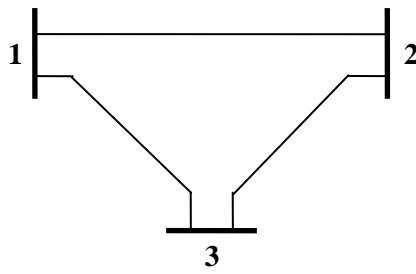


Figura 4 – Diagrama unifilar de um sistema com três barras.

O formato da matriz Y_{BARRA} é apresentado abaixo:

$$Y_{BARRA} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix}$$

As leis de formação da matriz de admitâncias de barra são:

- Termos da diagonal principal: somatório das admitâncias conectadas diretamente à barra referente aos índices (i e i) da matriz.
- Termo fora da diagonal principal: admitância entre as barras i e j referentes aos índices da matriz.

$$\begin{cases} Y_{ii} = \sum_{n=1}^m y_{in} \\ Y_{ij} = -y_{ij} \end{cases}$$

Onde:

- m é o número de barras do sistema.
- i simboliza a linha e j simboliza a coluna da matriz
- Caso não exista circuito conectando as barras i e j , o valor de y_{ij} será zero.

$$y_{ii} = 0$$

Podemos exemplificar a montagem da matriz de admitância de barra por meio de um exemplo prático:

O diagrama unifilar e os valores das impedâncias dos elementos do sistema são apresentados na Tabela 1, a seguir:

| | | | |
|----------------------|-----------------------------|----------|------|
| | Valores das reatâncias [pu] | | |
| | Gerador | X_{G1} | 0,10 |
| | | X_{G2} | 0,10 |
| | Transformador | X_{T1} | 0,20 |
| | | X_{T2} | 0,25 |
| Linha de Transmissão | X_{LT} | 0,40 | |

Tabela 1 – exemplo de montagem da matriz Y_{BARRA} .

Sabendo que a impedância, expressa em Ohm (Ω), é definida como resistência e reatância ($Z = R + jX$), podemos concluir que os valores especificados acima são referentes às impedâncias do sistema e que as respectivas resistências são nulas. No entanto, para a montagem da matriz de admitância de barra, como o nome já diz, é necessário que estes valores estejam especificados como admitância, expressa em Siemens (S) e definida como condutância e susceptância ($Y = G + jB$).

Sabendo que a admitância é o inverso da impedância, para converter os valores de impedância para admitância basta utilizar a seguinte fórmula:

$$Y = \frac{1}{Z}$$

Assim podemos calcular os valores das admitâncias expressos em pu, como é mostrado na Tabela 2:

| Elemento do sistema | Correspondentes em Admitância | [pu] |
|----------------------|-------------------------------|-------|
| Gerador | Y_{G1} | -j10 |
| | Y_{G2} | -j10 |
| Transformador | Y_{T1} | -j5 |
| | Y_{T2} | -j4 |
| Linha de Transmissão | Y_{LT} | -j2,5 |

Tabela 2 - Valores de Admitância expressas em pu.

Com os valores em admitância e ilustrando mais didaticamente o sistema através da Figura 5, é mais fácil começar a montagem da matriz.

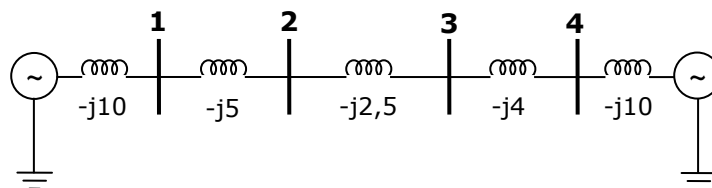


Figura 5 – Sistema elétrico utilizado para exemplificar a montagem da matriz de admitância de barra (Y_{BARRA}).

Podemos então calcular os valores da matriz de admitância de barra sabendo que a lei de formação é definida por :

$$\begin{cases} Y_{ii} = \sum_{n=1}^m y_{in} \\ Y_{ij} = -y_{ij} \end{cases}$$

O cálculo dos elementos da diagonal principal da matriz de admitância de barra é mostrado na Tabela 3:

| Diagonal Principal | |
|----------------------------|------------------|
| $Y_{11} = Y_{G1} + Y_{T1}$ | $Y_{11} = -j15$ |
| $Y_{22} = Y_{T1} + Y_{LT}$ | $Y_{22} = -j7,5$ |
| $Y_{33} = Y_{LT} + Y_{T2}$ | $Y_{33} = -j6,5$ |
| $Y_{44} = Y_{T2} + Y_{G2}$ | $Y_{44} = -j14$ |

Tabela 3 – Cálculo dos elementos da diagonal principal da matriz Y_{BARRA} .

O cálculo dos elementos fora da diagonal principal da matriz de admitância de barra é mostrado na Tabela 5:

| Elementos fora da diagonal principal | | | |
|---|-----------------|---|-----------------|
| $Y_{12} = Y_{T1}$ | $Y_{12} = j5$ | $Y_{31} \Rightarrow$ não possui ligação | $Y_{31} = 0$ |
| $Y_{13} \Rightarrow$ não possui ligação | $Y_{13} = 0$ | $Y_{32} = Y_{LT}$ | $Y_{32} = j2,5$ |
| $Y_{14} \Rightarrow$ não possui ligação | $Y_{14} = 0$ | $Y_{34} = Y_{T2}$ | $Y_{34} = j4$ |
| $Y_{21} = Y_{T1}$ | $Y_{21} = j5$ | $Y_{41} \Rightarrow$ não possui ligação | $Y_{41} = 0$ |
| $Y_{23} = Y_{LT}$ | $Y_{23} = j2,5$ | $Y_{42} \Rightarrow$ não possui ligação | $Y_{42} = 0$ |
| $Y_{24} \Rightarrow$ não possui ligação | $Y_{24} = 0$ | $Y_{43} = Y_{T2}$ | $Y_{43} = j4$ |

Tabela 4 - Cálculo dos elementos fora da diagonal principal da matriz Y_{BARRA} .

Com os elementos calculados acima, podemos montar a matriz de impedância de barra:

$$Y_{BARRA} = \begin{bmatrix} -j15 & j5 & 0 & 0 \\ j5 & -j7,5 & j2,5 & 0 \\ 0 & j2,5 & -j6,5 & j4 \\ 0 & 0 & j4 & -j14 \end{bmatrix} pu$$

2.2 DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA

Podem ocorrer diversos tipos de curto-circuito entre pontos, entretanto, por simplicidade e sem perda de generalidade, serão mostrados exemplos somente do tipo trifásico por envolverem apenas a seqüência positiva. No entanto, a implementação realizada no programa ANAFAS, contempla os demais tipos que serão retratados no *Capítulo 3*.

A solução de um caso de curto-circuito entre pontos trifásico é calculada utilizando somente a seqüência positiva das componentes simétricas ou Teorema de Fortescue. Portanto só é necessário o cálculo do equivalente de seqüência positiva da matriz de admitância nodal, sendo desnecessário o cálculo dos equivalentes em seqüência negativa e zero.

A solução do curto-circuito entre pontos é calculada para um sistema equivalente relativo apenas às barras envolvidas no curto. Para casos reais o ANAFAS calcula um equivalente da matriz de admitância de barra somente com as barras envolvidas no defeito, soluciona o caso em componentes de fase e então o expande novamente para calcular as correntes e tensões em outros pontos do sistema.

A seguir, serão apresentados os métodos de solução para dois tipos de curto-circuito entre pontos: sólido e através de impedância. O curto-circuito entre pontos através de impedância é aquele que ocorre quando há algum objeto entre os condutores envolvidos no defeito inserido alguma impedância na ligação, como por exemplo, um galho de árvore. Já o curto-circuito entre pontos sólido é aquele que acontece quando há contato direto entre os condutores envolvidos no caso.

2.2.1 CURTO-CIRCUITO ENTRE PONTOS TRIFÁSICO SÓLIDO

O curto-circuito entre pontos do tipo sólido é caracterizado pelo contato entre os condutores de circuitos distintos, sem que haja impedância de falta entre eles.

Como descrito anteriormente, se existe proximidade física entre circuitos, condição necessária, porém não suficiente para a ocorrência de casos de curto-circuito entre pontos, para que ocorra esta falta do tipo sólida, basta que, no mínimo, dois condutores de cada circuito se toquem sem que haja impedância de falta.

Casos de curto-circuito entre pontos do tipo sólido possuem corrente de curto mais severas, justamente pela impedância de falta ser nula ou desprezível.

Este tipo de falta pode ocorrer, por exemplo, quando em uma única torre de transmissão ou distribuição há mais de um circuito e, por algum motivo externo, os condutores de dois circuitos diferentes se tocam, como está ilustrado na figura 6.

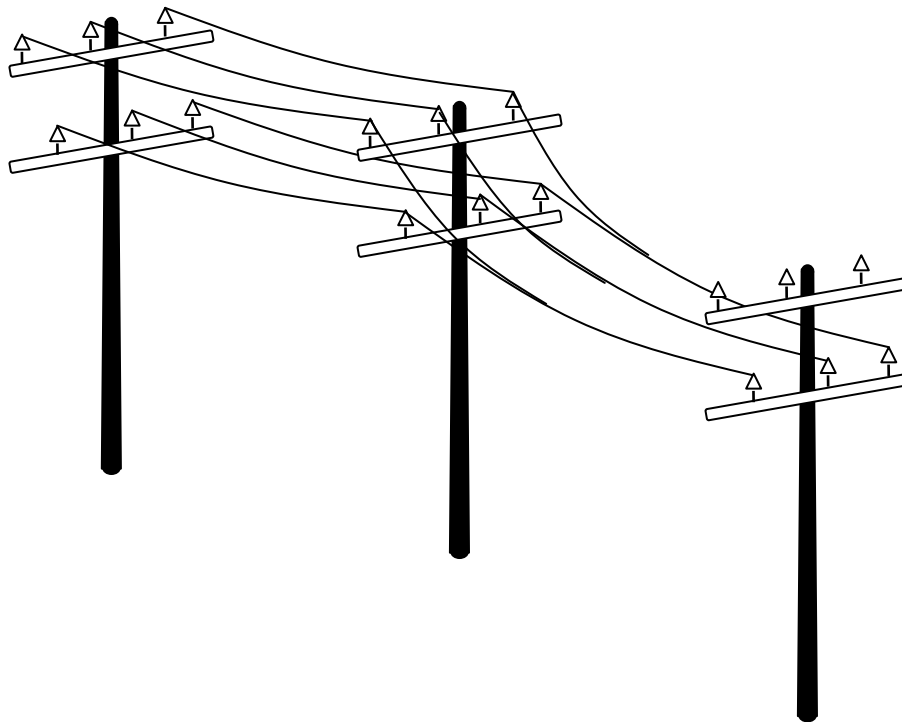


Figura 6 – exemplo de caso de curto-circuito entre pontos trifásico do tipo sólido.

Para o caso de curto-circuito entre pontos do tipo sólido envolvendo duas bases de tensão distintas, são previstas algumas características que podem ser observadas em seus resultados. Espera-se que os valores calculados referentes às tensões de curto, quando expressos em pu, possuam módulos distintos, no entanto, quando expressos em Volts possuam módulos iguais. Em ambos os casos, as tensões de curto devem possuir o mesmo

ângulo. De maneira análoga, os valores da corrente de curto, quando expressos em pu, devem possuir módulos distintos e quando expressos em Ampère módulos iguais. Para o caso da corrente de curto é esperado que possuam sentidos opostos, ou seja, defasados de 180°. Esta característica se deve ao fato de que no defeito sólido, as duas barras envolvidas se tocam sem a interferência de nenhuma impedância entre elas, ou seja, a impedância de falta é nula.

A seguir são mostrados os passos para a solução deste caso:

PASSO 01: Montar a matriz Y_{BARRA}^0 com valores por unidade (pu) de admitância.

$$Y_{BARRA}^0 = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}$$

$$\text{Para: } \begin{cases} Y_{ii} = \sum_{n=1}^m y_{in} \\ Y_{ij} = -y_{ij} \end{cases}$$

Onde:

- m é o numero de barras do sistema.
- i simboliza a linha e j simboliza a coluna da matriz
- $y_{ij} = 0$ caso não exista circuito conectando i e j .

PASSO 02: Calcular A (relação entre as bases de tensão).

$$A = \frac{V_2^{BASE}}{V_1^{BASE}}$$

PASSO 03: Calcular o vetor de injeção de correntes pré-falta I^0 dado por:

$$I^0 = Y_{BARRA}^0 V^0$$

Onde V^0 é o vetor de tensões pré-falta com valores por unidade (pu).

PASSO 04: Calcular Y'' :

OBS: Os passos 4 e 5 são utilizados para compatibilizar as grandezas relativas a barra 1 a base de tensão da barra 2. Esta compatibilização é necessária, pois as grandezas são expressas em pu e podem ter bases de tensão distintas.

Sabendo que $Y_{BARRA}^0 = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}$, então Y'' será:

$$Y'' = \begin{bmatrix} A^2 Y_{11} & A Y_{12} \\ A Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}$$

PASSO 05: Calcular I'' :

Sabendo que $I^0 = \begin{bmatrix} I_1^0 \\ I_2^0 \end{bmatrix}$, então I'' será:

$$I'' = \begin{bmatrix} A I_1^0 \\ I_2^0 \end{bmatrix}$$

PASSO 06: Colapsar a barra 1 na barra 2, criando os valores de $I_2^{COLAPSO}$ e $Y^{COLAPSO}$.

$$Y^{COLAPSO} = [A^2 Y_{11} + A Y_{12} + A Y_{21} + Y_{22}]$$

$$I_2^{COLAPSO} = [A I_1^0 + I_2^0]$$

PASSO 07: Calcular $V_2^{COLAPSO}$:

$$V_2^{COLAPSO} = (Y^{COLAPSO})^{-1} I_2^{COLAPSO}$$

PASSO 08: Calcular $V_1^{COLAPSO}$, tensão da barra 1 em pu:

$$V_1^{COLAPSO} = A V_2^{COLAPSO}$$

PASSO 09: Calcular o vetor V^{FINAL} sabendo que este é o vetor composto por $V_1^{COLPASO}$ e $V_2^{COLPASO}$ da seguinte forma:

$$V^{FINAL} = \begin{bmatrix} V_1^{COLPASO} \\ V_2^{COLPASO} \end{bmatrix}$$

PASSO 10: Calcular o vetor de corrente de curto I_{CC} dado por:

$$I_{CC} = -\Delta I = -(I^{FINAL} - I^0)$$

$$I_{CC} = I^0 - \underbrace{I^{FINAL}}_{Y^0 V^{FINAL}}$$

$$I_{CC} = I^0 - Y^0 V^{FINAL}$$

OBS: O vetor de injeções de corrente de compensação (ΔI) referente a este curto, que aplicado sobre o sistema equivalente original ($I^0 = Y^0 V^0$) faz com que as tensões nodais do mesmo assumam o valor de V^{FINAL} durante o curto.

2.2.2 CURTO-CIRCUITO ENTRE PONTOS TRIFÁSICO ATRAVÉS DE IMPEDÂNCIA

O caso de curto-circuito entre pontos através de impedância ocorre quando 01 (uma) ou mais fases de linhas de transmissão ou distribuição distintas se tocam, ou ainda quando há contato entre condutores de alta tensão e baixa tensão de um transformador. Este contato, neste caso, será sempre através que algum objeto, que pode ser, por exemplo, um galho de árvore ou um raio.

O caso de curto-circuito entre pontos através de impedância possui algumas características que podem ser observadas em seus resultados. Em casos que possuem bases de tensão distintas, espera-se que os valores calculados referentes às tensões de curto, V_I^{FINAL} e

V_2^{FINAL} , possuem módulos distintos tanto quando expressos em pu quanto quando expressos em Volts. Pode haver diferença angular entre as tensões de curto. Já para as correntes de curto, I_{CC}^1 e I_{CC}^2 , é esperado que seus valores, quando expressos em pu, possuem módulos distintos e quando expressos em Ampère, possuem módulos iguais. Em ambos os casos da corrente, é esperado que seus ângulos tenham sentidos opostos, ou seja, defasados de 180° .

Podemos representar o caso de curto-circuito entre pontos através de impedância através da figura 7, apresentada abaixo:

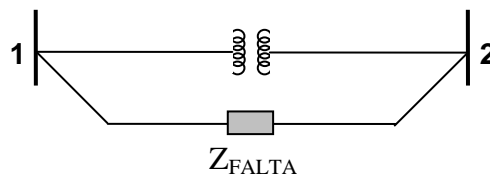


Figura 7 – Representação do caso de curto-circuito entre pontos através de impedância.

A seguir, são mostrados os passos propostos para solução do caso de curto-circuito entre pontos trifásico através de impedância:

PASSO 01: Montar a matriz Y_{BARRA}^0 com valores por unidade (pu) de admitância em regime permanente pré-falta, ou seja, sem considerar a impedância de falta.

$$Y_{BARRA}^0 = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}$$

$$\text{Para: } \begin{cases} Y_{ii} = \sum_{n=1}^m y_{in} \\ Y_{ij} = -y_{ij} \end{cases}$$

Onde:

- m é o numero de barras do sistema.
- i simboliza a linha e j simboliza a coluna da matriz
- $y_{ij} = 0$ caso não exista circuito conectando i e j .

PASSO 02: Calcular A (relação entre as bases de tensão).

$$A = \frac{V_2^{BASE}}{V_1^{BASE}}$$

PASSO 03: Calcular o vetor de injeção de corrente pré-falta I^0 dado por:

$$I^0 = Y_{BARRA}^0 V^0$$

Onde V^0 é o vetor de tensão pré-falta com valores por unidade (pu).

PASSO 04: Montar a matriz de admitâncias em pu para a impedância de falta, sabendo que:

$$y_{FALTA} = z_{FALTA}^{-1}$$

$$Y_{FALTA} = \begin{bmatrix} y_{FALTA} & -A y_{FALTA} \\ -A y_{FALTA} & A^2 y_{FALTA} \end{bmatrix}$$

OBS 01: Devido a matriz de admitâncias de barra relativa à impedância de falta ser expressa em pu, acaba possuindo a mesma estrutura de um trafo com relação de transformação diferente da nominal, pois desempenha este papel ao conectar pontos de diferentes bases de tensão sem ser um trafo.

OBS 02: Para a obtenção do valor de admitância de falta (y_{FALTA}) em pu, a base de tensão referente a barra 1 deve ser utilizada, devido a modelagem da relação de transformação do trafo diferente da nominal (citada na OBS 01) estar do lado da barra 2.

PASSO 05: Calcular Y_{TOTAL} , matriz de admitâncias do sistema com a impedância de falta:

$$Y_{TOTAL} = Y_{BARRA}^0 + Y_{FALTA}$$

PASSO 06: Calcular V^{FINAL} :

$$V^{FINAL} = Y_{TOTAL}^{-1} I^0$$

PASSO 07: Calcular o vetor de corrente de curto I_{CC} dado por:

$$I_{CC} = -\Delta I = -(I^{FINAL} - I^0)$$

$$I_{CC} = I^0 - \underbrace{I^{FINAL}}_{Y^0 V^{FINAL}}$$

$$I_{CC} = I^0 - Y^0 V^{FINAL}$$

OBS: O vetor de injeções de corrente de compensação (ΔI) referente a este curto, que aplicado sobre o sistema equivalente original ($I^0 = Y^0 V^0$) faz com que as tensões nodais do mesmo assumam o valor de V^{FINAL} durante o curto.

2.3 PROGRAMA ANAFAS

O programa de análise de faltas do Cepel, o ANAFAS, é amplamente utilizado por diversas empresas do setor elétrico brasileiro e é capacitado para solucionar sistemas de grandes dimensões, como o Sistema Interligado Nacional (SIN) cuja modelagem atual mantida pela ONS possui aproximadamente 10.000 barras.

No mundo real não acontecem somente curtos-circuitos trifásico localizados em barras, pelo contrário, curtos reais ocorrem em qualquer ponto da uma linha e com diversas configurações, envolvendo uma, duas ou três fases além do terra.

No caso de ocorrência de curto-circuito, do tipo convencional ou entre pontos, em algum ponto de uma linha qualquer, o programa considera este ponto como uma Barra Fictícia. Estas barras fictícias se comportam como barras normais, apesar de não existirem no

arquivo de dados, sendo criadas temporariamente apenas para efeito de cálculo no ponto indicado da linha pelo usuário.

O método de solução utilizado pelo programa ANAFAS para casos de curtos-circuitos, tanto convencionais quanto entre pontos, é calculado em componentes de fase ABC, o que garante a generalidade do método de solução.

Outro fato que tem que ser levado em consideração é que os casos reais possuem um grande número de barras e não somente as barras em curto. Por isso, na solução de um caso real com diversas barras, é calculado, antes do *Passo 01*, um equivalente com as barras envolvidas no defeito (duas barras para casos de curto-circuito entre pontos) e assim são calculados os valores das tensões (V^{FINAL}) e das correntes de curto-circuito (I_{CC}) apenas para estas barras.

Após o cálculo das tensões de curto (V^{FINAL}) e das correntes de curto (I_{CC}) é necessário expandir o sistema novamente para se obter as tensões e correntes de contribuição em qualquer ponto do sistema representado. Esta expansão será explicada a seguir.

2.3.1 EXPANSÃO DO EQUIVALENTE

Para solucionar casos de curto-circuito entre pontos, o ANAFAS calcula um sistema equivalente relativo apenas às barras envolvidas no curto e assim, calcula as tensões e correntes relativas as barras do equivalente. Para que seja possível calcular tensões correntes de contribuição em outros pontos do sistema é necessário que haja uma expansão deste equivalente calculado inicialmente.

Para calcular as tensões e correntes de contribuição em qualquer ponto do sistema basta saber os elementos da matriz de impedâncias de barra (Z_{BARRA}) referentes às colunas relativas às barras em curto (geralmente 1 ou 2 colunas). Elementos de uma coluna qualquer da matriz Z_{BARRA} podem ser facilmente obtidos a partir dos fatores LDU da matriz de admitâncias de barra (Y_{BARRA} fatorada).

Para se obter as correntes de contribuição em qualquer ponto do circuito é necessário ter conhecimento da tensão em suas barras terminais. Para a seqüência zero são necessárias também as tensões das barras terminais das linhas.

Sabendo-se que $I = YV$ e $Z = Y^{-1}$ então pode-se concluir que $V = ZI$. Caso haja uma variação da tensão haverá, conseqüentemente, uma variação na corrente:

$$\Delta V = Z \cdot \Delta I$$

Sabendo que a variação da corrente é igual a menos a corrente de curto-circuito, temos:

$$\Delta I = -I_{CC}$$

Assim, podemos associar as duas equações:

$$\Delta V = Z(-I_{CC})$$

As tensões de contribuição referentes às barras do sistema podem ser obtidas a partir da seguinte equação:

$$V^{FINAL} = V^0 + \Delta V$$

3. IMPLEMENTAÇÃO

O curto-circuito entre pontos foi implementado no programa computacional ANAFAS de acordo com o método detalhado no *capítulo 2*. De fato, esta implementação foi resultado de uma extensão do algoritmo de solução de curto já existente no programa.

Existem algumas especificações necessárias para o cálculo de curto-circuito entre pontos da mesma forma como ocorre para o curto-circuito convencional. Estas especificações consistem em quantas e quais fases estão envolvidas e se a falta é franca ou através de impedância. Estes tipos estão exemplificados a seguir:

- ◆ Curto-circuito entre pontos Monofásico: Este tipo de defeito envolve somente uma fase de cada linha e está sendo representado pela figura 8. A implementação feita no programa ANAFAS permite que os usuários apliquem este tipo de curto com as seguintes configurações:
 - Fase A da linha 1 com fase A da linha 2.
 - Fase B da linha 1 com fase B da linha 2.
 - Fase C da linha 1 com fase C da linha 2.

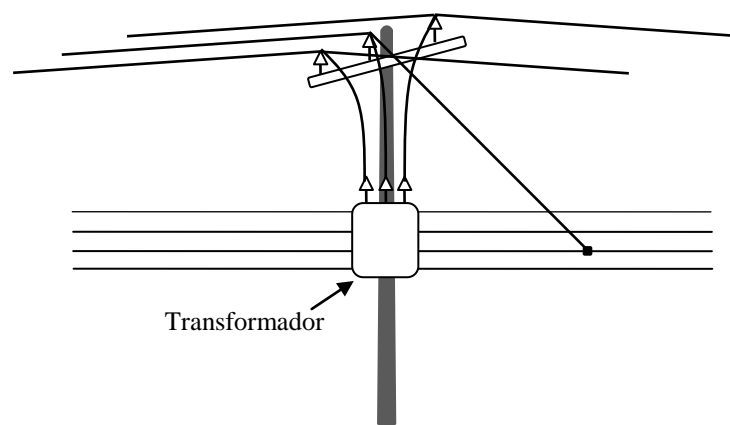


Figura 8 - Exemplo de curto circuito entre pontos Monofásico franco entre as fases B do circuito de alta tensão e B do circuito de baixa tensão.

- ◆ Curto-circuito entre pontos Bifásico: Este tipo de defeito envolve somente 2 fases de cada linha e está sendo representado pela figura 9. A implementação feita no programa ANAFAS permite que os usuários apliquem este tipo de curto com as seguintes configurações:

- Fase A da linha 1 com fase A da linha 2 e fase B da linha 1 com fase B da linha 2.
- Fase A da linha 1 com fase A da linha 2 e fase C da linha 1 com fase C da linha 2.
- Fase B da linha 1 com fase B da linha 2 e fase C da linha 1 com fase C da linha 2.

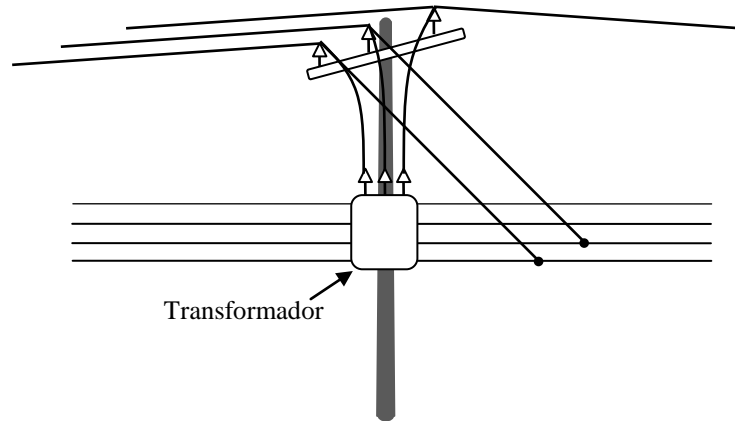


Figura 9 - exemplo de curto-circuito entre pontos bifásico entre as fases B da alta tensão e B da baixa tensão e C da alta tensão com fase C da baixa tensão

- ◆ Curto-circuito entre pontos Trifásico: Este tipo de defeito envolve as 3 fases de cada linha e está sendo representado pela figura 10. A implementação feita no programa ANAFAS permite que os usuários apliquem este tipo de curto com a seguinte configuração:

- Fase A da linha 1 com fase A da linha 2, fase B da linha 1 com fase B da linha 2 e fase C da linha 1 com fase C da linha 2.

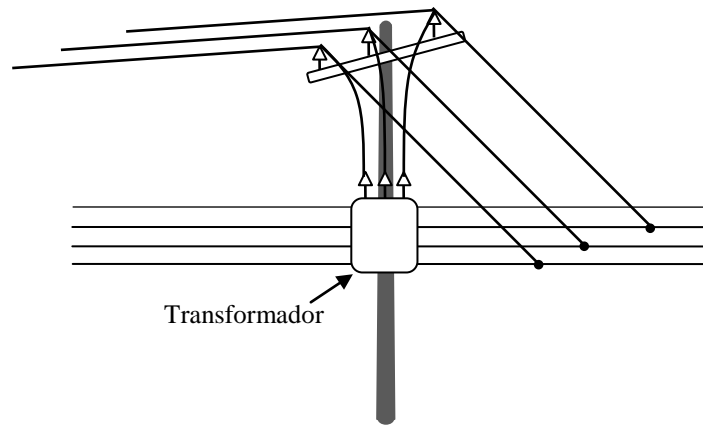


Figura 10 - exemplo de curto-circuito entre pontos trifásico entre as fases A da alta tensão com A da baixa tensão, B da alta tensão com B da baixa tensão e C da alta tensão com fase C da baixa tensão.

- ◆ Curto-circuito entre pontos através de impedância: Este tipo de defeito pode ser monofásico, bifásico ou trifásico, no entanto a figura 11 representa um caso monofásico:

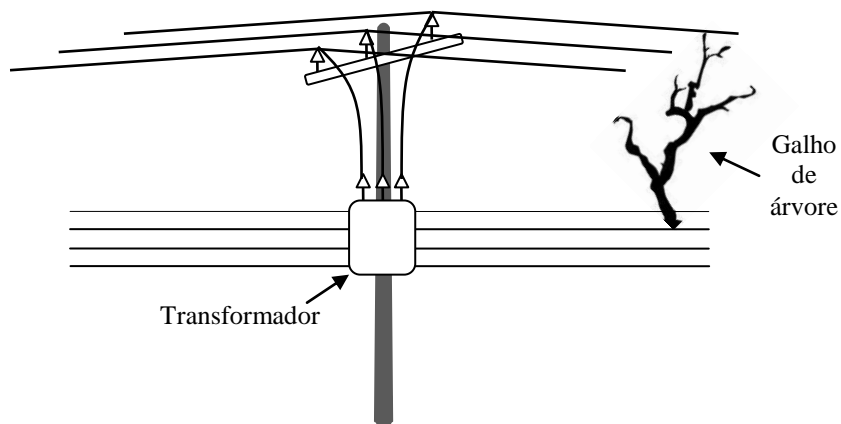


Figura 11 - Exemplo de caso de curto-circuito através de impedância envolvendo a fase A do circuito de alta tensão com a fase A do circuito de baixa tensão.

A partir da implementação do curto-circuito entre pontos através de impedância, composições entre quaisquer fases, com ou sem impedância de falta, podem também ser

simuladas. Esta implementação permite que os usuários simulem defeitos, com ou sem impedância, com as seguintes configurações:

- Fase A da linha 1 com fase A da linha 2.
- Fase A da linha 1 com fase B da linha 2.
- Fase A da linha 1 com fase C da linha 2.
- Fase B da linha 1 com fase A da linha 2.
- Fase B da linha 1 com fase B da linha 2.
- Fase B da linha 1 com fase C da linha 2.
- Fase C da linha 1 com fase A da linha 2.
- Fase C da linha 1 com fase B da linha 2.
- Fase C da linha 1 com fase C da linha 2.

4. RESULTADOS OBTIDOS

Este capítulo tem como principal objetivo comparar resultados de casos de curto-circuito entre pontos solucionados através do programa ANAFAS, o programa ATP e o método apresentado no capítulo 2 com o intuito de comprovar a eficácia do método utilizado e sua implementação no programa ANAFAS.

Com a finalidade de simplificar esta comparação, foram utilizados defeitos trifásicos e casos exemplos contendo apenas as barras envolvidas diretamente no defeito, o que não causou perda de generalidade, pois, como explicado no item 2.3, o programa ANAFAS apenas soluciona os casos de curto após calcular um equivalente com as barras envolvidas no defeito.

Para esta comparação foram empregados basicamente três tipos defeito, o caso de curto circuito entre pontos sólido com diferentes bases de tensão (item 4.1), curto-circuito entre pontos através de impedância com diferentes bases de tensão (item 4.2) e finalmente o curto-circuito entre pontos do tipo sólido envolvendo barras com diferentes referências angulares (item 4.3).

4.1 SOLUÇÃO DO CURTO-CIRCUITO ENTRE PONTOS TRIFÁSICO SÓLIDO COM DIFERENTES BASES DE TENSÃO

Para solucionar o curto-circuito entre pontos trifásico do tipo sólido com diferentes bases de tensão, três modos de solução distintos foram utilizados com o intuito de verificar a coerência de seus resultados.

Para esta comparação foram utilizados os seguintes modos de solução: o método apresentado no item 2.2.1 - Curto-Circuito entre Pontos Trifásico Sólido, a implementação realizada no programa ANAFAS e os resultados obtidos através do programa ATP.

Para esta comparação, foi utilizado um único sistema elétrico o qual será apresentado a seguir no item 4.1.1 - Descrição do Sistema.

Este tipo de defeito pode ocorrer quando duas linhas, que estejam fisicamente próximas, se tocam ou quando há algum defeito que provoque contato entre terminais de tensões distintas de um transformador. Em ambos os casos, o sistema pode ser modelado como se houvesse um transformador (com impedância Z_T) entre as barras envolvidas no defeito.

Como previsto no capítulo 2, o caso de curto-circuito entre pontos do tipo sólido possui algumas características que devem ser esperadas em seus resultados. Espera-se que os valores calculados referentes às tensões de curto, quando expressos em pu, possuam módulos distintos, no entanto, quando expressos em Volts, possuam módulos iguais e, em ambos os casos, espera-se que a diferença angular entre as tensões de curto seja nula, ou seja, possuam o mesmo ângulo. De maneira análoga, os valores da corrente de curto, quando expressos em pu, devem possuir módulos distintos e, quando expressos em Ampère, espera-se que possuam módulos iguais. Para as correntes de curto também é esperado que possuam sentidos opostos, ou seja, ângulos defasados de 180° . Esta característica se deve ao fato de que no defeito sólido, as duas barras envolvidas se tocam sem a interferência de nenhuma impedância entre elas, ou seja, a impedância de falta é nula e, conseqüentemente, não há diferença de potencial entre os pontos envolvidos no defeito.

4.1.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

Como caso base para solução de curto-circuito entre pontos trifásico do tipo sólido foi utilizado o sistema representado pela Figura 12:

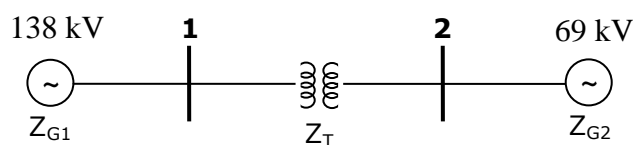


Figura 12 - Caso base para curto-circuito entre pontos trifásico do tipo sólido.

Para o sistema representado acima, tem-se os seguintes valores de impedância e admitância apresentados em pu na Tabela 5:

| Elementos do Sistema | Impedância | [pu] | Correspondentes em Admitância | [pu] |
|----------------------|------------|--------|-------------------------------|---------|
| Gerador | Z_{G1} | $j0,5$ | Y_{G1} | $-j2,0$ |
| | Z_{G2} | $j1,0$ | Y_{G2} | $-j1,0$ |
| Transformador | Z_T | $j1,0$ | Y_{T1} | $-j1,0$ |

Tabela 5 - Valores de impedâncias e admitâncias expressos em pu dos elementos do sistema.

A modelagem do sistema, com valores de impedâncias e admitâncias expressos em pu, é mostrada pela Figura 13:

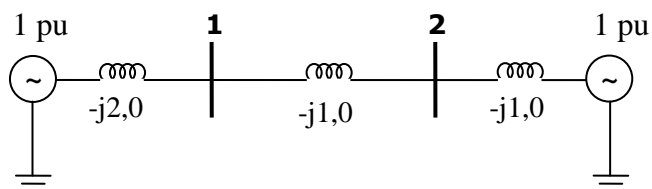


Figura 13 – Diagrama unifilar do sistema com valores de admitâncias expressos em pu.

4.1.2 SOLUÇÃO PASSO-A-PASSO DO MÉTODO PROPOSTO

O método de solução apresentado no item 2.2.1 - Curto-Circuito entre Pontos Trifásico Sólido está sendo utilizado para se obter a primeira solução para o sistema apresentado acima. Os passos do método de solução estão sendo seguidos conforme foi mostrado em sua descrição.

PASSO 01: Montar a matriz Y_{BARRA}^0 com valores por unidade (pu) de admitância.

$$Y_{BARRA}^0 = \begin{bmatrix} -j3 & j1 \\ j1 & -j2 \end{bmatrix}$$

PASSO 02: Calcular A (relação entre as bases de tensão).

$$A = \frac{V_2^{BASE}}{V_1^{BASE}}$$

$$A = \frac{69 \text{ k}}{138 \text{ k}}$$

$$A = \frac{1}{2}$$

PASSO 03: Calcular o vetor de injeção de correntes pré-falta I^0 dado por:

$$I^0 = Y_{BARRA}^0 V^0$$

Onde V^0 é o vetor de tensões pré-falta com valores por unidade (pu).

$$I^0 = \begin{bmatrix} -j3 & j1 \\ j1 & -j2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \angle 0 \\ 1 \angle 0 \end{bmatrix}$$

$$I^0 = \begin{bmatrix} 2 \angle -90 \\ 1 \angle -90 \end{bmatrix}$$

PASSO 04: Calcular Y'' :

$$Y'' = \begin{bmatrix} A^2 Y_{11} & A Y_{12} \\ A Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}$$

$$Y'' = \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{2}\right)^2 (-j3) & \left(\frac{1}{2}\right) j1 \\ \left(\frac{1}{2}\right) j1 & -j2 \end{bmatrix}$$

$$Y'' = \begin{bmatrix} -j\frac{3}{4} & j\frac{1}{2} \\ j\frac{1}{2} & -j2 \end{bmatrix}$$

PASSO 05: Calcular I'' .

Sabendo que $I^0 = \begin{bmatrix} I_1^0 \\ I_2^0 \end{bmatrix}$, então I'' será:

$$I'' = \begin{bmatrix} A I_1^0 \\ I_2^0 \end{bmatrix}$$

$$I'' = \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{2}\right) (2\angle -90) \\ 1\angle -90 \end{bmatrix}$$

$$I'' = \begin{bmatrix} 1\angle -90 \\ 1\angle -90 \end{bmatrix}$$

PASSO 06: Colapsar a barra 1 na barra 2, criando os valores de $Y^{COLAPSO}$ e $I_2^{COLAPSO}$.

$$\begin{array}{l}
 Y^{COLAPSO} = [A^2 Y_{11} + A Y_{12} + A Y_{21} + Y_{22}] \\
 Y^{COLAPSO} = \left[-j \frac{3}{4} + j \frac{1}{2} + j \frac{1}{2} + -j2 \right] \\
 Y^{COLAPSO} = \left[-j \frac{3}{4} + j \frac{1}{2} + j \frac{1}{2} + -j2 \right] \\
 Y^{COLAPSO} = \left[-j \frac{7}{4} \right]
 \end{array}
 \left\| \begin{array}{l}
 I_2^{COLAPSO} = [A I_1^0 + I_2^0] \\
 I_2^{COLAPSO} = [(1\angle -90) + (1\angle -90)] \\
 I_2^{COLAPSO} = [2\angle -90]
 \end{array} \right.$$

PASSO 07: Calcular $V_2^{COLAPSO}$:

$$V_2^{COLAPSO} = (Y^{COLAPSO})^{-1} I_2^{COLAPSO}$$

$$V_2^{COLAPSO} = \left(-j \frac{7}{4} \right)^{-1} (2\angle -90)$$

$$V_2^{COLAPSO} = \frac{8}{7} \angle 0^\circ \approx (1,143 \angle 0^\circ)$$

PASSO 08: Calcular $V_1^{COLAPSO}$, tensão da barra 1 em pu:

$$V_1^{COLAPSO} = A V_2^{COLAPSO}$$

$$V_1^{COLAPSO} = \frac{1}{2} (1,143 \angle 0^\circ)$$

$$V_1^{COLAPSO} = (0,571 \angle 0^\circ)$$

PASSO 09: Calcular o vetor V^{FINAL} sabendo que este é o vetor composto por $V_1^{COLAPSO}$ e $V_2^{COLAPSO}$ da seguinte forma:

$$V^{FINAL} = \begin{bmatrix} V_1^{COLAPSO} \\ V_2^{COLAPSO} \end{bmatrix}$$

$$V^{FINAL} = \begin{bmatrix} 0,571\angle 0^\circ \\ 1,143\angle 0^\circ \end{bmatrix}$$

PASSO 10: Calcular o vetor de corrente de curto I_{CC} dado por:

$$I_{CC} = I^0 - Y^0 V^{FINAL}$$

$$I_{CC} = \begin{bmatrix} 2\angle -90 \\ 1\angle -90 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -j3 & j1 \\ j1 & -j2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,571\angle 0^\circ \\ 1,143\angle 0^\circ \end{bmatrix}$$

$$I_{CC} = \begin{bmatrix} 1,43\angle -90 \\ 0,715\angle 90 \end{bmatrix}$$

4.1.3 PROGRAMA ANAFAS

A partir das modificações realizadas no programa ANAFAS, tornou-se possível solucionar casos de curto-circuito entre pontos com sua utilização.

Com o objetivo de testar a implementação realizada, o caso apresentado no item 4.2.1 - Descrição do Sistema foi introduzido no ANAFAS e a solução do curto-circuito entre pontos trifásico do tipo sólido envolvendo as barras 1 e 2 foi obtida.

A partir dos resultados obtidos através do método apresentado neste trabalho (item 4.1.2 - Solução Passo-a-Passo) e através do programa ANAFAS pode-se confirmar a coerência entre ambos.

O caso descrito no item 4.2.1 - Descrição do Sistema, pode ser representado a partir do diagrama unifilar gerado através do programa ANAFAS apresentado pela Figura 14.

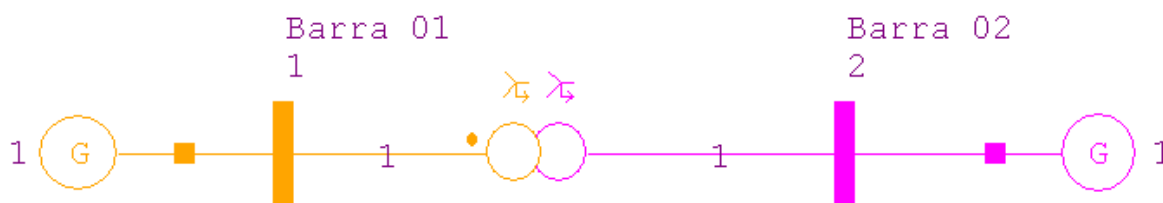


Figura 14 – Diagrama Unifilar do programa ANAFAS

Após a ocorrência do curto, o programa ANAFAS gera um relatório com dados sobre as tensões e correntes de curto e sobre as tensões e correntes de contribuição ambos em módulo e ângulo. O ANAFAS permite que esses dados sejam apresentados nas unidades quilo Volt (kV) e Ampère (A) para tensões e correntes respectivamente, ou por unidade (pu) para ambas as grandezas.

O relatório gerado pelo programa ANAFAS após a ocorrência do curto-circuito entre pontos trifásico do tipo sólido apresentado a seguir:

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
 ANAFAS - Programa de Análise de Falhas Simultâneas Pag. 1

caso usuario de Mari

SAPRE - REDE:<vazia> CASO:<trabalho>
 DESCRICAO DA FALTA COMPOSTA DE 1 DEFEITO

1) Curto serie trifasico entre as barras 1 (Barra 01) e 2 (Barra 02)

T E N S O E S E C O R R E N T E S D E C U R T O

| | | | | Barra 1 (Barra 01) | | | | | | | |
|------------|-------|--------|------|---------------------|------|------|--------|--------|------|-------|-------|
| TENSAO(pu) | | | | CORRENTE(pu) | | | | | | | |
| mod. | ang. | mod. | ang. | mod. | ang. | mod. | ang. | mod. | ang. | mod. | ang. |
| A | 0.571 | 0.0 | Z | 0.000 | 0.0 | A | 1.429 | -90.0 | Z | 0.000 | 0.0 |
| B | 0.571 | -120.0 | P | 0.571 | 0.0 | B | -1.429 | -30.0 | P | 1.429 | -90.0 |
| C | 0.571 | 120.0 | N | 0.000 | 0.0 | C | -1.429 | -150.0 | N | 0.000 | 0.0 |

| | | Barra 2 (Barra 02) | | | | | | | |
|---|-------|---------------------|---------|---------------|------|--------|--------|----------|-------|
| | | TENSAO(pu) | | CORRENTE(pu) | | | | | |
| | mod. | ang. | mod. | ang. | mod. | ang. | mod. | ang. | |
| A | 1.143 | 0.0 | Z 0.000 | 0.0 | A | -0.714 | -90.0 | Z 0.000 | 0.0 |
| B | 1.143 | -120.0 | P 1.143 | 0.0 | B | 0.714 | -30.0 | P -0.714 | -90.0 |
| C | 1.143 | 120.0 | N 0.000 | 0.0 | C | 0.714 | -150.0 | N 0.000 | 0.0 |

T E N S O E S E C O R R E N T E S D E C O N T R I B U I C A O

Bar. 1 (Barra 01) TEN.(pu)

| | mod. | ang. | mod. | ang. |
|---|-------|--------|---------|------|
| A | 0.571 | 0.0 | Z 0.000 | 0.0 |
| B | 0.571 | -120.0 | P 0.571 | 0.0 |
| C | 0.571 | 120.0 | N 0.000 | 0.0 |

Bar. 0 (-REFERENCIA-) TEN.(pu)

| | mod. | ang. | mod. | ang. |
|---|-------|--------|---------|------|
| A | 1.000 | 0.0 | Z 0.000 | 0.0 |
| B | 1.000 | -120.0 | P 1.000 | 0.0 |
| C | 1.000 | 120.0 | N 0.000 | 0.0 |

Cir. 1G() CORR.(pu) p/ 1

| | mod. | ang. | mod. | ang. |
|---|--------|--------|---------|-------|
| A | 0.857 | -90.0 | Z 0.000 | 0.0 |
| B | -0.857 | -30.0 | P 0.857 | -90.0 |
| C | -0.857 | -150.0 | N 0.000 | 0.0 |

Bar. 2 (Barra 02) TEN.(pu)

| | mod. | ang. | mod. | ang. |
|---|-------|--------|---------|------|
| A | 1.143 | 0.0 | Z 0.000 | 0.0 |
| B | 1.143 | -120.0 | P 1.143 | 0.0 |
| C | 1.143 | 120.0 | N 0.000 | 0.0 |

Cir. 1T() CORR.(pu) p/ 1

| | mod. | ang. | mod. | ang. |
|---|--------|--------|---------|-------|
| A | 0.571 | -90.0 | Z 0.000 | 0.0 |
| B | -0.571 | -30.0 | P 0.571 | -90.0 |
| C | -0.571 | -150.0 | N 0.000 | 0.0 |

Bar. 2 (Barra 02) TEN.(pu)

| | mod. | ang. | mod. | ang. |
|---|-------|--------|---------|------|
| A | 1.143 | 0.0 | Z 0.000 | 0.0 |
| B | 1.143 | -120.0 | P 1.143 | 0.0 |
| C | 1.143 | 120.0 | N 0.000 | 0.0 |

Bar. 0 (-REFERENCIA-) TEN.(pu)

| | mod. | ang. | mod. | ang. |
|---|-------|--------|---------|------|
| A | 1.000 | 0.0 | Z 0.000 | 0.0 |
| B | 1.000 | -120.0 | P 1.000 | 0.0 |
| C | 1.000 | 120.0 | N 0.000 | 0.0 |

Cir. 1G() CORR.(pu) p/ 2

| | mod. | ang. | mod. | ang. |
|---|--------|--------|----------|-------|
| A | -0.143 | -90.0 | Z 0.000 | 0.0 |
| B | 0.143 | -30.0 | P -0.143 | -90.0 |
| C | 0.143 | -150.0 | N 0.000 | 0.0 |

Neste relatório, conforme pode ser observado são exibidas, as fases ABC e as componentes simétricas para todas as correntes e tensões calculadas, no entanto, para a comparação dos resultados, iremos utilizar somente a fase A, visto que o caso analisado é um curto trifásico, portanto equilibrado.

Pode-se observar que os resultados das correntes e tensões de curto da fase A referentes às barras 1 e 2 do relatório exibido acima estão coerentes com os valores calculados através do método demonstrado neste trabalho.

Se considerarmos que as tensões de entrada do sistema são tensão senoidais equilibradas e defasadas entre si em 120° e o curto aplicado trifásico, é possível obter os valores para as fases B e C apenas defasando em -120° e $+120^\circ$ em relação a fase A respectivamente.

Após a aplicação do curto-circuito entre pontos do tipo trifásico sólido envolvendo as barras 1 e 2, pode-se obter diagrama unifilar de curto representado pela figura 15, no qual são exibidas também as correntes (em módulo e ângulo) e tensões (módulo) de curto nas barras envolvidas e correntes (em módulo e ângulo) e tensões (módulo) de contribuição no sistema. Neste caso, os valores apresentados no diagrama são referentes a fase A, no entanto, o programa ANAFAS pode exibir resultados de qualquer uma das fases ou ainda das componentes simétricas.

A figura 15 representa o diagrama unifilar de curto obtido através do ANAFAS:

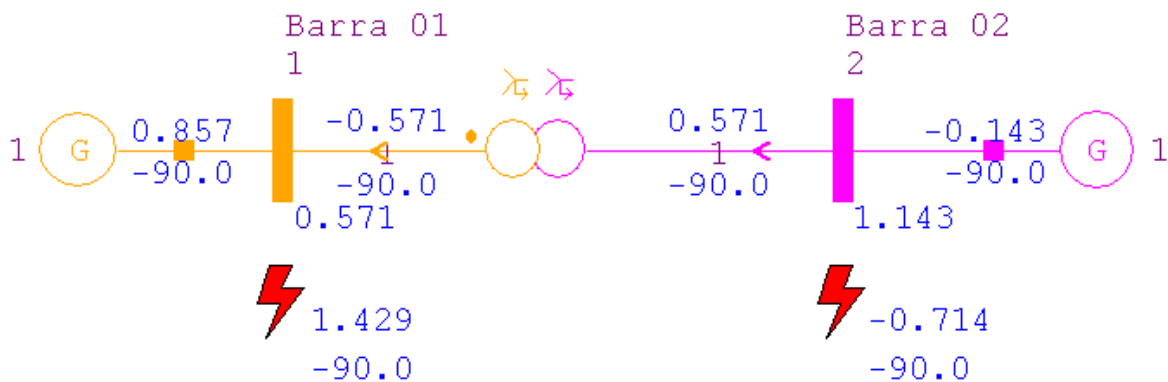


Figura 15 – Diagrama unifilar de curto com valores de tensões e correntes expressos em pu.

A partir dos resultados das tensões de curto, expressos em pu e em quilo Volts (kV) e das correntes de curto expressas em pu e Ampère (A), pode-se comprovar os resultados

esperados descritos no item 4.1 - Solução do Curto-Circuito entre Pontos Trifásico Sólido com Diferentes Bases de Tensão.

Como descrito anteriormente, para casos de curto-circuito entre pontos trifásico do tipo sólido espera-se que os valores calculados referentes às tensões de curto, quando expressos em pu, possuam módulos distintos e, quando expressos em Volts, possuam módulos iguais. Independentemente da unidade de medida utilizada para expressar os valores das tensões de curto, é esperado que a diferença angular entre elas seja nula, ou seja, possuam o mesmo ângulo. De maneira análoga, os valores da corrente de curto, quando expressos em pu, devem possuir módulos distintos e, quando expressos em Ampère, é esperado que possuam módulos iguais. Novamente independentemente da unidade de medida utilizada para expressar os valores das correntes de curto, é esperado que essas correntes possuam sentidos opostos, ou seja, ângulos defasados de 180°.

As características esperadas podem ser verificadas ao se comparar os valores das tensões e correntes de curto obtidos através do método proposto e os valores referentes à fase A, expressos em pu e em quilo Volts/Ampère, obtidos através do ANAFAS.

O comportamento esperado para o caso de curto-circuito entre pontos trifásico sólido com diferentes bases de tensão pode ser observado quando comparadas as Figuras 15 e 16.

Para que os valores de tensões e correntes possam ser expressos em Volts e Ampère é preciso que sejam especificados valores de relativos às bases de potência e tensão para que seja possível definir as bases de corrente.

As tensões de base já foram apresentadas na descrição do caso como sendo $V_{BASE1} = 138$ kV (base de tensão referente a barra 1) e $V_{BASE2} = 69$ kV (base de tensão referente a barra 2). Como inicialmente não havia necessidade, a base de potência só foi determinada neste momento como sendo 100 MVA. Este valor foi intencionalmente escolhido, pois este também é o valor default para a base de potência do programa ANAFAS.

Para os valores de base de tensão e potência descritos acima, o diagrama unifilar de curto, representado pela figura 16, foi gerado pelo ANAFAS com os valores de tensões de curto expressos em quilo Volts (kV) do tipo fase-neutro, e valores de correntes de curto expressos em Ampère (A):

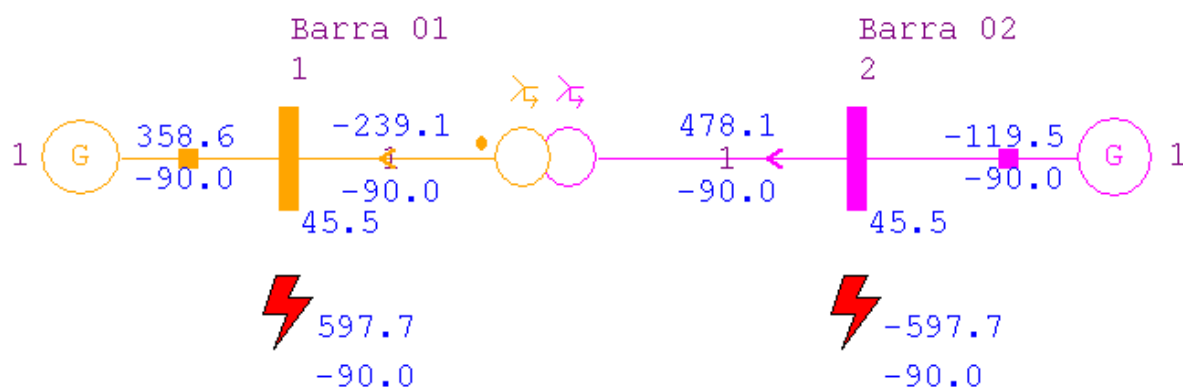


Figura 16 - Diagrama unifilar de curto com valores de tensões e correntes expressos em quilo Volts (kV) e Ampère (A) respectivamente.

A parte do relatório gerado através do programa ANAFAS que mostra as tensões e correntes de curto expressas em quilo Volts (kV) e Ampère (A), respectivamente é apresentado a seguir:

caso usuario de Mari

DESCRICAO DA FALTA COMPOSTA DE 1 DEFEITO

- 1) Curto serie trifasico entre as barras 1 (Barra 01) e 2 (Barra 02) .

T E N S O E S E C O R R E N T E S D E C U R T O

| Barra 1 (Barra 01) | | | | | | | | | | | |
|---------------------|------|--------|---|------|---------------|------|-------|--------|------|-----|-------|
| TENSAO(kV) | | | | | CORRENTE(A) | | | | | | |
| | mod. | ang. | | ang. | | mod. | ang. | | ang. | | |
| A | 45.5 | 0.0 | Z | 0.0 | A | 598 | -90.0 | Z | 0 | 0.0 | |
| B | 45.5 | -120.0 | P | 45.5 | 0.0 | B | -598 | -30.0 | P | 598 | -90.0 |
| C | 45.5 | 120.0 | N | 0.0 | 0.0 | C | -598 | -150.0 | N | 0 | 0.0 |

| Barra 2 (Barra 02) | | | | | | | | | | | |
|---------------------|------|--------|---|------|---------------|------|------|--------|------|------|-------|
| TENSAO(kV) | | | | | CORRENTE(A) | | | | | | |
| | mod. | ang. | | ang. | | mod. | ang. | | ang. | | |
| A | 45.5 | 0.0 | Z | 0.0 | 0.0 | A | -598 | -90.0 | Z | 0 | 0.0 |
| B | 45.5 | -120.0 | P | 45.5 | 0.0 | B | 598 | -30.0 | P | -598 | -90.0 |
| C | 45.5 | 120.0 | N | 0.0 | 0.0 | C | 598 | -150.0 | N | 0 | 0.0 |

4.1.4 PROGRAMA ATP

O programa ATP foi uma das ferramentas utilizadas para solucionar o caso de curto-circuito entre pontos do tipo sólido. Seus resultados podem ser comparados com os resultados obtidos anteriormente para comprovar a coerência entre a implementação realizada no programa ANAFAS e o método apresentado neste trabalho.

O diagrama unifilar que descreve o caso de curto-circuito entre pontos trifásico do tipo sólido gerado através do programa ATP é apresentado pela Figura 17:

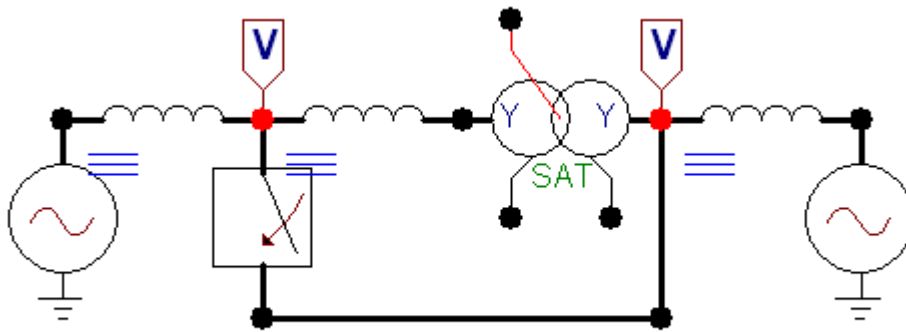


Figura 17 - Diagrama unifilar gerado através do programa ATP

Os resultados obtidos através do programa ATP permitem uma visualização das formas de onda das tensões nos pontos envolvidos no defeito, antes e após sua ocorrência. Para este caso, os pontos envolvidos são as barras 1 e 2.

As formas de onda das tensões das barras 1 e 2, apresentadas na Figura 18, obtida através do programa ATP, são referentes a tensões de pico com valores fase-neutro. Outra característica que pode ser observada é que as formas de onda das tensões são referentes ao regime permanente, não sendo apresentadas tensões de regime transitório, que ocorrem durante o defeito. As formas de onda das tensões antes e após o curto são apresentadas pela Figura 18, a seguir:

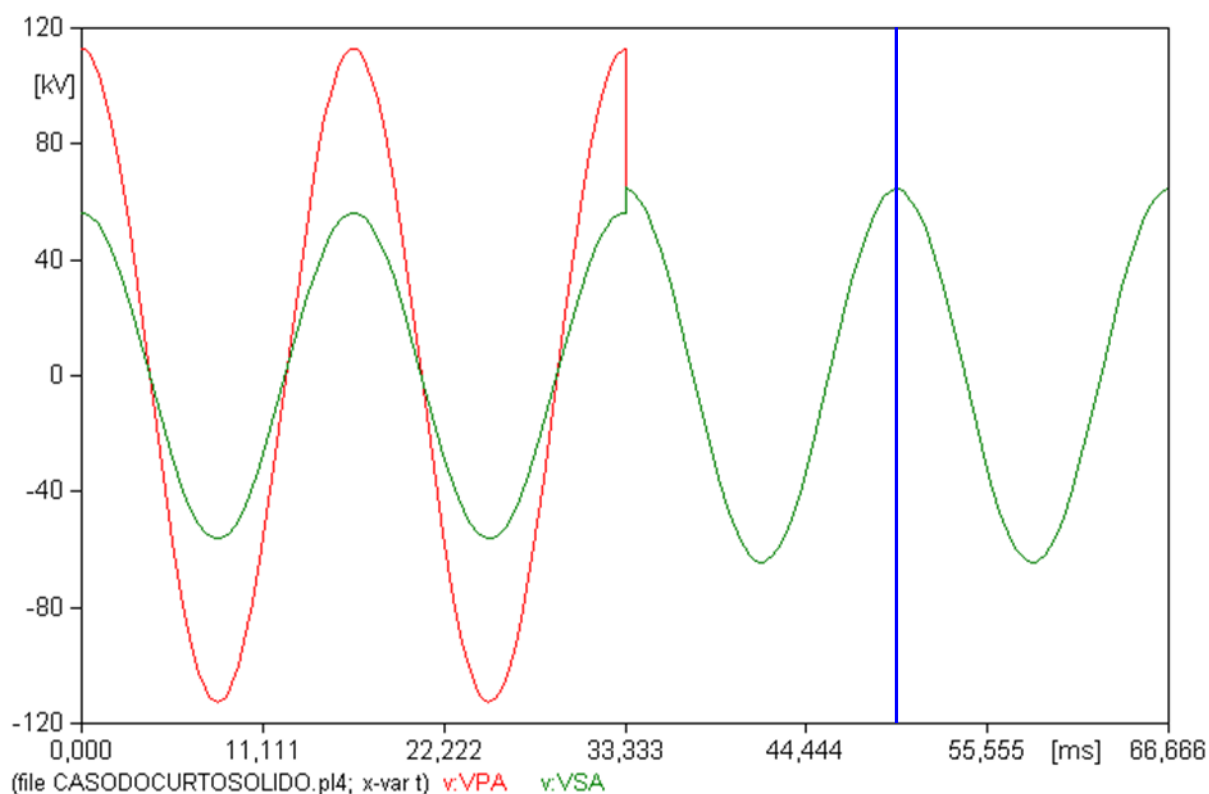


Figura 18 - Formas de onda das tensões referentes às barras 1 e 2 antes e após a ocorrência do defeito.

Na Figura 18, obtida a partir do ATP, a onda na cor vermelha está representando a tensão na barra 1 e a onda na cor verde representa a tensão na barra 2. É possível observar que, antes da ocorrência do defeito ($t < 33,33$ ms) as duas tensões possuem módulos distintos e diferença angular nula, após a ocorrência do defeito ($t > 33,33$ ms) as tensões nas barras 1 e 2 passam a ter mesmo módulo e continua com diferença angular nula, como discutido anteriormente. Também é possível observar um afundamento na tensão da barra 1 (lado de alta tensão) e um aumento na tensão da barra 2 (lado de baixa tensão).

Outra característica do programa ATP que deve ser observada é que os valores das tensões são especificados no tempo referentes a valores do tipo fase-neutro. Devido a este fato, os valores pré-falta das tensões nas barras 1 e 2 que estão apresentados na Figura 18 são diferentes dos valores apresentados no item 4.1.1 - Descrição do Sistema ($V_{\text{BARRA-1}} = 138$ kV e $V_{\text{BARRA-2}} = 69$ kV), pois estes valores são especificados como RMS do tipo fase-fase.

Para relacionar os valores de pico com RMS e fase-fase com fase-neutro existem as seguintes relações de transformação:

$$V_{PICO} = \sqrt{2}V_{RMS}$$

$$V_{FASE-NEUTRO} = \frac{V_{FASE-FASE}}{\sqrt{3}}$$

Sabendo as relações de transformação, é possível comprovar que os valores das tensões de entrada no programa ATP estão de acordo com os valores descritos anteriormente em cada barra da seguinte forma:

| | | |
|--|--|---|
| <p>Barra 1</p> $V_{FASE-FASE}^{RMS} = 138 \text{ kV}$ $V_{FASE-NEUTRO}^{PICO} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} 138 \text{ kV}$ $V_{FASE-NEUTRO}^{PICO} = 112,68 \text{ kV}$ | | <p>Barra 2</p> $V_{FASE-FASE}^{RMS} = 69 \text{ kV}$ $V_{FASE-NEUTRO}^{PICO} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} 69 \text{ kV}$ $V_{FASE-NEUTRO}^{PICO} = 56,34 \text{ kV}$ |
|--|--|---|

As tensões de curto podem ser medidas após a ocorrência do curto ($t > 33,33 \text{ ms}$) através do cursor que está representado na Figura 18 na cor azul. Os valores medidos através deste cursor são mostrados na Figura 19:



Figura 19 - Valores de pico das tensões de curto referentes às barras 1 e 2.

Sabendo que o ATP apresenta seus valores de tensão referentes aos valores de pico do tipo fase-neutro e que para compará-los aos resultados obtidos anteriormente é necessário que

sejam transformados para valores especificados como RMS do tipo fase-neutro basta utilizar a relação de transformação apresentada anteriormente:

$$V_{RMS} = \frac{V_{PICO}}{\sqrt{2}}$$
$$V_{RMS} = \frac{64,383 \text{ kV}}{\sqrt{2}}$$
$$V_{RMS} = 45,53 \text{ kV}$$

Sabendo que os valores das tensões de curto para as barras 1 e 2 são iguais e que o resultado obtido através do programa ATP é coerente com os demais resultados, é possível reafirmar a correção do método apresentado neste trabalho e da implementação realizada no programa ANAFAS.

4.2 SOLUÇÃO DO CURTO-CIRCUITO ENTRE PONTOS TRIFÁSICO ATRAVÉS DE IMPEDÂNCIA COM DIFERENTES BASES DE TENSÃO

Assim como no caso de curto-circuito trifásico do tipo sólido, para solucionar o caso de curto-circuito entre pontos trifásico através de impedância com diferentes bases de tensão estão sendo utilizados 3 modos distintos.com o intuito de possibilitar uma comparação entre os métodos e a coerência de seus resultados

O primeiro a ser exibido será o método apresentado neste trabalho no item 2.2.2 - Curto-Circuito entre Pontos Trifásico Através de Impedância, o segundo será o resultado obtido através da implementação realizada no programa ANAFAS e o terceiro será o resultado obtido através do programa ATP.

O sistema utilizado como base para solução do caso de curto-circuito entre pontos através de impedância está sendo apresentado a seguir no item 4.2.1 - Descrição do Sistema. Este caso foi solucionado através de 3 métodos distintos.

Este tipo de defeito ocorre quando algum objeto provoca o contato entre duas linhas, que estejam fisicamente próximas ou quando algum objeto permite contato entre terminais de tensões distintas de um transformador. O curto-circuito entre pontos através de impedância também pode ocorrer quando a distância entre os condutores de dois circuitos distintos é menor que a distância mínima de isolamento sem que ocorra o contato entre eles. Em todos os casos, o sistema pode ser modelado como se houvesse um transformador (com impedância Z_T) em paralelo com a impedância de falta (Z_{FALTA}) entre as barras envolvidas no defeito.

Como previsto no capítulo 2, o caso de curto-circuito entre pontos através de impedância possui algumas características que devem ser esperadas em seus resultados. Para casos que possuam bases de tensão distintas, espera-se que os valores calculados referentes às tensões de curto possuam módulos distintos quando expressos em Volts, devido à queda de tensão causada pela impedância de falta (Z_{FALTA}) e, conseqüentemente, os valores expressos em pu também serão diferentes. Assim como acontece no caso do módulo da tensão, a defasagem angular entre as tensões de curto é devido à impedância de falta (Z_{FALTA}). No caso das correntes de curto, é esperado que seus valores, quando expressos em Ampère, apresentem módulos iguais e, quando expressos em pu, possuam módulos distintos devido às diferentes bases de tensão. Em ambos os casos da corrente, é esperado que seus ângulos tenham sentidos opostos, ou seja, defasados de 180° .

4.2.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

Como caso base para solução de curto-circuito entre pontos trifásico através de impedância foi utilizado o sistema apresentado pela figura 20, a seguir:

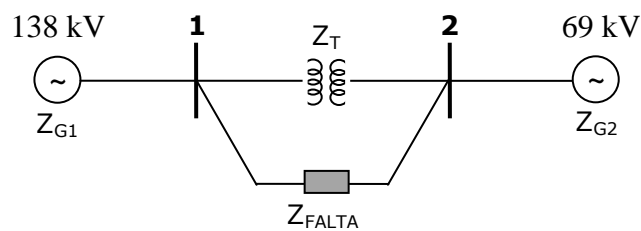


Figura 20 - diagrama unifilar do sistema utilizado para simular curto-circuito entre pontos trifásico através de Impedância

Para o sistema representado acima, tem-se os seguintes valores de impedância e admitância apresentados em pu calculados na Tabela 6:

| Elementos do Sistema | Impedância | [pu] | Correspondentes em Admitância | [pu] |
|----------------------|-------------|--------|-------------------------------|---------|
| Gerador | Z_{G1} | $j0,5$ | Y_{G1} | $-j2,0$ |
| | Z_{G2} | $j1,0$ | Y_{G2} | $-j1,0$ |
| Transformador | Z_T | $j1,0$ | Y_{T1} | $-j1,0$ |
| Impedância de Falta | Z_{FALTA} | $j0,1$ | Y_{FALTA} | $-j10$ |

Tabela 6 - Valores de impedâncias e admitâncias dos elementos do sistema expressos em pu

A modelagem do circuito para esta tipo de defeito é feita, a principio, como se não houvesse impedância de falta (Z_{FALTA}), que somente é levada em consideração após a montagem da matriz Y^0_{BARRA} . Esta modelagem pode ser representada pelas figuras 21 e 22 respectivamente.

A seguir, é mostrado o diagrama unifilar que representa o caso base para a montagem da matriz Y^0_{BARRA} representado pela Figura 21.

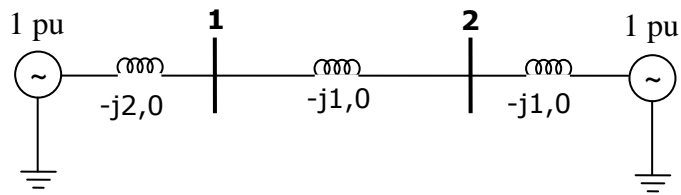


Figura 21 - Caso base que serve para a montagem da matriz Y^0_{BARRA}

O diagrama unifilar que representa o sistema com a impedância de falta para a montagem da matriz $Y_{TOTAL} = Y^0_{BARRA} + Y_{FALTA}$ está sendo representado pela Figura 22.

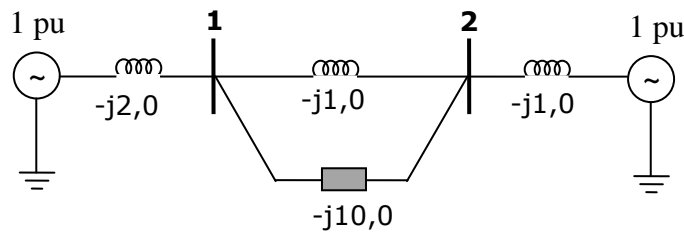


Figura 22 - Caso base com impedância de falta. Somatório da matriz $Y^0_{BARRA} + Y_{FALTA}$

4.2.2 SOLUÇÃO PASSO-A-PASSO DO MÉTODO PROPOSTO

PASSO 01: Montar a matriz Y^0_{BARRA} com valores por unidade (pu) de admitância em regime permanente pré-falta, ou seja, sem considerar a impedância de falta.

$$Y^0_{BARRA} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}$$

$$Y^0_{BARRA} = \begin{bmatrix} -j3 & j1 \\ j1 & -j2 \end{bmatrix}$$

PASSO 02: Calcular A (relação entre as bases de tensão).

$$A = \frac{V_2^{BASE}}{V_1^{BASE}}$$

$$A = \frac{69 \text{ k}}{138 \text{ k}}$$

$$A = \frac{1}{2}$$

PASSO 03: Calcular o vetor de injeção de corrente pré-falta I^0 dado por:

$$I^0 = Y^0 V^0$$

Onde V^0 é o vetor de tensão pré-falta com valores por unidade (pu).

$$V^0 = \begin{bmatrix} 1 \angle 0^\circ \\ 1 \angle 0^\circ \end{bmatrix}$$

$$I^0 = \begin{bmatrix} -j3 & j1 \\ j1 & -j2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \angle 0^\circ \\ 1 \angle 0^\circ \end{bmatrix}$$

$$I^0 = \begin{bmatrix} 2 \angle -90^\circ \\ 1 \angle -90^\circ \end{bmatrix}$$

PASSO 04: Montar a matriz de admitâncias em pu para a impedância de falta, sabendo que:

$$y_{FALTA} = z_{FALTA}^{-1}$$

$$y_{FALTA} = -j10$$

$$Y_{FALTA} = \begin{bmatrix} y_{FALTA} & -A y_{FALTA} \\ -A y_{FALTA} & A^2 y_{FALTA} \end{bmatrix}$$

$$Y_{FALTA} = \begin{bmatrix} -j10 & -\left(\frac{1}{2}\right) (-j10) \\ -\left(\frac{1}{2}\right) (-j10) & \left(\frac{1}{2}\right)^2 (-j10) \end{bmatrix}$$

$$Y_{FALTA} = \begin{bmatrix} -j10 & j5 \\ j5 & -j2,5 \end{bmatrix}$$

PASSO 05: Calcular Y_{TOTAL} , matriz de admitâncias do sistema com a impedância de falta:

$$Y_{TOTAL} = Y_{BARRA}^0 + Y_{FALTA}$$

$$Y_{TOTAL} = \begin{bmatrix} -j3 & j1 \\ j1 & -j2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -j10 & j5 \\ j5 & -j2,5 \end{bmatrix}$$

$$Y_{TOTAL} = \begin{bmatrix} -j13 & j6 \\ j6 & -j4,5 \end{bmatrix}$$

PASSO 06: Calcular V^{FINAL} :

$$V^{FINAL} = Y_{TOTAL}^{-1} I^0$$

$$V^{FINAL} = \begin{bmatrix} -j13 & j6 \\ j6 & -j4,5 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 2\angle -90^\circ \\ 1\angle -90^\circ \end{bmatrix}$$

$$V^{FINAL} = \begin{bmatrix} 0,667\angle 0^\circ \\ 1,111\angle 0^\circ \end{bmatrix}$$

PASSO 07: Calcular o vetor de corrente de curto I_{CC} dado por:

$$I_{CC} = I^0 - Y^0 V^{FINAL}$$

$$I_{CC} = \begin{bmatrix} 2\angle -90^\circ \\ 1\angle -90^\circ \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -j3 & j1 \\ j1 & -j2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,667\angle 0^\circ \\ 1,111\angle 0^\circ \end{bmatrix}$$

$$I_{CC} = \begin{bmatrix} 1,111\angle -90^\circ \\ 0,555\angle 90^\circ \end{bmatrix}$$

4.2.3 PROGRAMA ANAFAS

Após as modificações realizadas no programa ANAFAS, que possibilitaram a solução de casos de curto-circuito entre pontos, os resultados do caso de curto-circuito entre pontos trifásico através de impedância foram ser coletados com o intuito de compará-los com os casos solucionados através do método apresentado neste trabalho.

Para tal, o caso apresentado no item 4.2.1 - Descrição do Sistema foi introduzido no ANAFAS e a solução do curto-circuito entre pontos trifásico através de impedância foi obtido.

A partir dos resultados obtidos através do método apresentado neste trabalho e através do programa ANAFAS pode-se confirmar a coerência entre ambos os métodos.

O caso descrito no item 4.2.1 - Descrição do Sistema, pode ser representado a partir do diagrama unifilar gerado através do programa ANAFAS pela Figura 23.

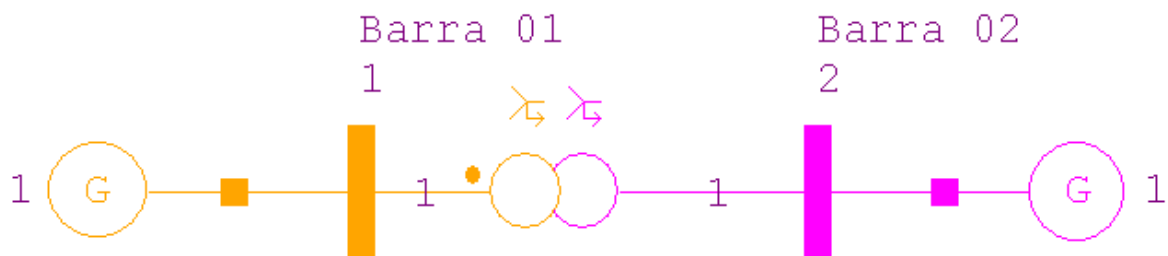


Figura 23 – Diagrama unifilar gerado através do programa ANAFAS

Após a ocorrência do curto, o programa ANAFAS gera um relatório com dados sobre as tensões e correntes de curto e sobre as tensões e correntes de contribuição ambos em módulo e ângulo. O ANAFAS permite que esses dados sejam apresentados nas unidades quilo Volt (kV) e Ampère (A) para tensões e correntes respectivamente, ou por unidade (pu) para ambas as grandezas.

O relatório gerado pelo programa ANAFAS após a ocorrência do curto-circuito entre pontos trifásico através de impedância pode ser observado a seguir:

caso usuario de Mari

DESCRICA0 DA FALTA COMPOSTA DE 1 DEFEITO

1) Curto serie atraves de impedâncias entre as barras 1 (Barra 01) e 2 (Barra 02) .

| | AA | AB | AC | BA | BB | BC | CA | CB | CC |
|-------|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|------|
| R(pu) | 0.00 | ***** | ***** | ***** | 0.00 | ***** | ***** | ***** | 0.00 |
| X(pu) | 0.10 | ***** | ***** | ***** | 0.10 | ***** | ***** | ***** | 0.10 |

T E N S O E S E C O R R E N T E S D E C U R T O

| Barra 1 (Barra 01) | | | | Barra 1 (Barra 01) | | | |
|---------------------|--------|------------|------|---------------------|--------|---------------|-------|
| TENSAO(pu) | | TENSAO(pu) | | CORRENTE(pu) | | CORRENTE(pu) | |
| mod. | ang. | mod. | ang. | mod. | ang. | mod. | ang. |
| A 0.667 | 0.0 | Z 0.000 | 0.0 | A 1.111 | -90.0 | Z 0.000 | 0.0 |
| B 0.667 | -120.0 | P 0.667 | 0.0 | B -1.111 | -30.0 | P 1.111 | -90.0 |
| C 0.667 | 120.0 | N 0.000 | 0.0 | C -1.111 | -150.0 | N 0.000 | 0.0 |

| Barra 2 (Barra 02) | | | | Barra 2 (Barra 02) | | | |
|---------------------|--------|------------|------|---------------------|--------|---------------|-------|
| TENSAO(pu) | | TENSAO(pu) | | CORRENTE(pu) | | CORRENTE(pu) | |
| mod. | ang. | mod. | ang. | mod. | ang. | mod. | ang. |
| A 1.111 | 0.0 | Z 0.000 | 0.0 | A -0.556 | -90.0 | Z 0.000 | 0.0 |
| B 1.111 | -120.0 | P 1.111 | 0.0 | B 0.556 | -30.0 | P -0.556 | -90.0 |
| C 1.111 | 120.0 | N 0.000 | 0.0 | C 0.556 | -150.0 | N 0.000 | 0.0 |

T E N S O E S E C O R R E N T E S D E C O N T R I B U I C A O

| Bar. 1 (Barra 01) TEN.(pu) | | | |
|-----------------------------|--------|---------|------|
| mod. | ang. | mod. | ang. |
| A 0.667 | 0.0 | Z 0.000 | 0.0 |
| B 0.667 | -120.0 | P 0.667 | 0.0 |
| C 0.667 | 120.0 | N 0.000 | 0.0 |

| Bar. 0 (-REFERENCIA-) TEN.(pu) | | | | Cir. 1G() CORR.(pu) p/ 1 | | | |
|--------------------------------|--------|---------|------|----------------------------|--------|---------|-------|
| mod. | ang. | mod. | ang. | mod. | ang. | mod. | ang. |
| A 1.000 | 0.0 | Z 0.000 | 0.0 | A 0.667 | -90.0 | Z 0.000 | 0.0 |
| B 1.000 | -120.0 | P 1.000 | 0.0 | B -0.667 | -30.0 | P 0.667 | -90.0 |
| C 1.000 | 120.0 | N 0.000 | 0.0 | C -0.667 | -150.0 | N 0.000 | 0.0 |

| Bar. 2 (Barra 02) TEN.(pu) | | | | Cir. 1T() CORR.(pu) p/ 1 | | | |
|-----------------------------|--------|---------|------|----------------------------|--------|---------|-------|
| mod. | ang. | mod. | ang. | mod. | ang. | mod. | ang. |
| A 1.111 | 0.0 | Z 0.000 | 0.0 | A 0.444 | -90.0 | Z 0.000 | 0.0 |
| B 1.111 | -120.0 | P 1.111 | 0.0 | B -0.444 | -30.0 | P 0.444 | -90.0 |
| C 1.111 | 120.0 | N 0.000 | 0.0 | C -0.444 | -150.0 | N 0.000 | 0.0 |

| Bar. 2 (Barra 02) TEN.(pu) | | | |
|-----------------------------|--------|---------|------|
| mod. | ang. | mod. | ang. |
| A 1.111 | 0.0 | Z 0.000 | 0.0 |
| B 1.111 | -120.0 | P 1.111 | 0.0 |
| C 1.111 | 120.0 | N 0.000 | 0.0 |

| Bar. 0 (-REFERENCIA-) TEN.(pu) | | | | Cir. 1G() CORR.(pu) p/ 2 | | | |
|--------------------------------|--------|---------|------|----------------------------|--------|----------|-------|
| mod. | ang. | mod. | ang. | mod. | ang. | mod. | ang. |
| A 1.000 | 0.0 | Z 0.000 | 0.0 | A -0.111 | -90.0 | Z 0.000 | 0.0 |
| B 1.000 | -120.0 | P 1.000 | 0.0 | B 0.111 | -30.0 | P -0.111 | -90.0 |
| C 1.000 | 120.0 | N 0.000 | 0.0 | C 0.111 | -150.0 | N 0.000 | 0.0 |

Neste relatório, conforme pode ser observado, são exibidas em componentes ABC e componentes simétricas, todas as correntes e tensões calculadas, no entanto, para a comparação dos resultados, iremos utilizar somente a seqüência positiva ou a fase A, visto que o caso analisado é um curto trifásico, portanto simétrico.

Pode-se observar que os resultados das correntes e tensões de curto da fase A referentes às barras 1 e 2 do relatório exibido acima estão coerentes com os valores calculados através do método apresentado neste trabalho.

Se considerarmos que as tensões de entrada do sistema são tensões senoidais equilibradas e defasadas entre si em 120° e o curto aplicado trifásico, é possível obter os valores para as fases B e C apenas defasando em -120° e +120° em relação a fase A respectivamente.

Após a aplicação do curto-circuito entre pontos trifásico envolvendo as barras 1 e 2, pode-se obter diagrama unifilar de curto representado pela figura 24, no qual são exibidas também as correntes (em módulo e ângulo) e tensões (módulo) de curto nas barras envolvidas e correntes (em módulo e ângulo) e tensões (módulo) de contribuição no sistema. Neste caso, os valores apresentados no diagrama são referentes à fase A, no entanto o programa ANAFAS pode exibir resultados de qualquer uma das fases da ou ainda das componentes simétricas.

A seguir é apresentada a Figura 24, que representa o diagrama unifilar de curto gerado pelo ANAFAS:

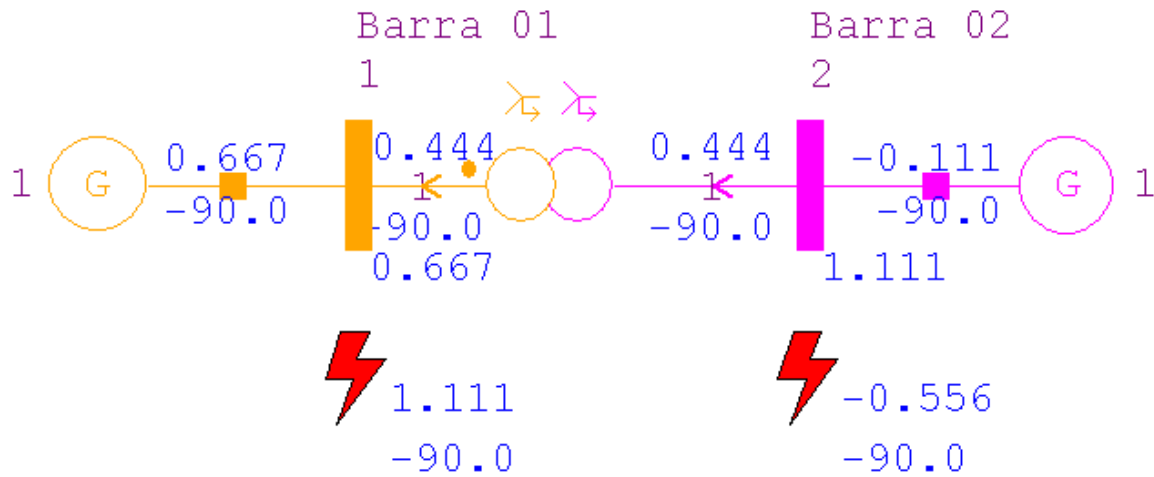


Figura 24 – Diagrama unifilar de curto com correntes e tensões expressas em pu.

A partir dos resultados das tensões de curto, expressos em pu e em Volts e das correntes de curto expressas em pu e Ampère, pode-se comprovar os resultados esperados descritos no item 4.2 - Solução do Curto-Circuito entre Pontos trifásico através de Impedância com diferentes Bases de Tensão.

Como descrito anteriormente, para os casos de curto-circuito entre pontos trifásico através de impedância, que possuam bases de tensão distintas, espera-se que os valores calculados referentes às tensões de curto possuam módulos distintos tanto quando expressos em pu quanto quando expressos em Volts. É esperado também que a diferença angular entre as tensões de curto esteja coerente com a impedância de falta. De maneira análoga, é esperado para as correntes de curto que seus valores, quando expressos em pu, possuam módulos distintos e quando expressos em Ampère, possuam módulos iguais. Independentemente da unidade de medida utilizada para expressar os valores das corrente de curto, é esperado que seus ângulos tenham sentidos opostos, ou seja, sejam defasados de 180°.

As características esperadas podem ser verificadas ao se comparar os valores das tensões de curto e correntes de curto obtidos através do método proposto e os valores

referentes à seqüência positiva, expressos em pu e em Volts/Ampère, obtidos através do ANAFAS.

Os resultados esperados podem ser observados quando comparadas as figuras 24 e 25.

Para que os valores de tensões e correntes possam ser expressos em Volts e Ampère é preciso que sejam especificados valores de potencia e tensão base já que estão expressos em pu a principio. As tensões de base já foram apresentadas na descrição do caso como sendo $V_{BASE1} = 138$ kV (base de tensão referente a barra 1) e $V_{BASE2} = 69$ kV (base de tensão referente a barra 2). A base de potência foi determinada como 100 MVA. Este valor de base de potência também é o valor default do programa ANAFAS.

Para os valores de bases de tensão e potência descritos acima, o diagrama unifilar de curto, representado pela Figura 25 abaixo, foi gerado pelo ANAFAS e é exibido com valores de tensões de curto, expressos em Volts (kV), do tipo fase-neutro e valores de correntes de curto expressos em Ampère (A):

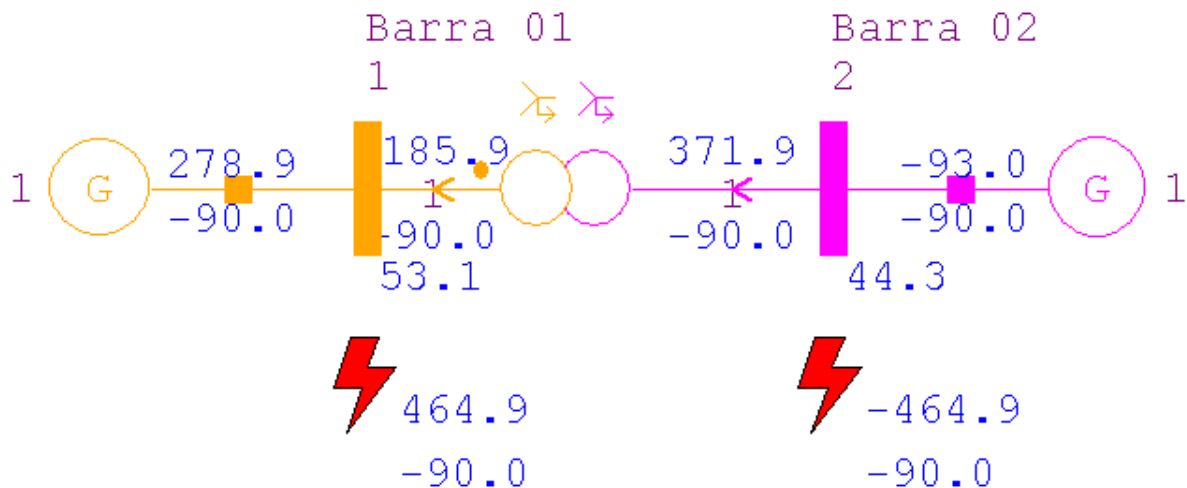


Figura 25 - Diagrama Unifilar de curto com valores de tensões expressos em quilo Volts (kV) e correntes expressos em Ampère (A).

É válido ressaltar que, para esta configuração e este tipo de defeito, na impedância de falta (Y_{FALTA}) a corrente de curto sai da barra de maior potencial (barra 01) para a barra de

menor potencial (barra 02), já no trafo, ocorre o inverso, a corrente sai da barra de menor potencial (barra 02) para a barra de maior potencial (barra 01). Este fato pode ser observado na figura 26, a seguir:

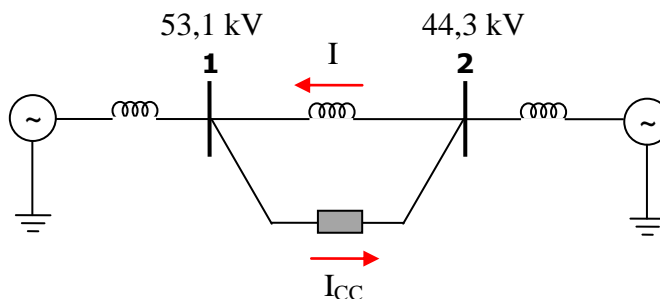


Figura 26 – Diagrama unifilar demonstrando o sentido da corrente de curto.

A parte do relatório gerado através do programa ANAFAS que mostra as tensões e correntes de curto expressas em Volts e Ampère, respectivamente é apresentado a seguir:

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
ANAFAS - Programa de Análise de Falta Simultâneas Pag. 1

caso usuario de Mari

DESCRICAO DA FALTA COMPOSTA DE 1 DEFEITO

1) Curto serie atraves de impedâncias entre as barras 1 (Barra 01) e 2 (Barra 02) .

| | AA | AB | AC | BA | BB | BC | CA | CB | CC |
|-------|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|------|
| R(pu) | 0.00 | ***** | ***** | ***** | 0.00 | ***** | ***** | ***** | 0.00 |
| X(pu) | 0.10 | ***** | ***** | ***** | 0.10 | ***** | ***** | ***** | 0.10 |

T E N S O E S E C O R R E N T E S D E C U R T O

| | | | | | Barra 1 (Barra 01) | | | | | | |
|------------|------|--------|------|------|---------------------|------|------|--------|------|-----|-------|
| | | | | | CORRENTE(A) | | | | | | |
| TENSAO(kV) | | | | | | | | | | | |
| mod. | ang. | mod. | ang. | mod. | ang. | mod. | ang. | mod. | ang. | | |
| A | 53.1 | 0.0 | Z | 0.0 | 0.0 | A | 465 | -90.0 | Z | 0 | 0.0 |
| B | 53.1 | -120.0 | P | 53.1 | 0.0 | B | -465 | -30.0 | P | 465 | -90.0 |
| C | 53.1 | 120.0 | N | 0.0 | 0.0 | C | -465 | -150.0 | N | 0 | 0.0 |

| | | Barra 2 (Barra 02) | | | | | | | | | | |
|---|------|---------------------|------|------|-----|------|------|---------------|------|------|-------|------|
| | | TENSAO(kV) | | | | | | CORRENTE(A) | | | | |
| | mod. | ang. | mod. | ang. | | mod. | ang. | mod. | ang. | | mod. | ang. |
| A | 44.3 | 0.0 | Z | 0.0 | 0.0 | A | -465 | -90.0 | Z | 0 | 0.0 | |
| B | 44.3 | -120.0 | P | 44.3 | 0.0 | B | 465 | -30.0 | P | -465 | -90.0 | |
| C | 44.3 | 120.0 | N | 0.0 | 0.0 | C | 465 | -150.0 | N | 0 | 0.0 | |

4.2.4 PROGRAMA ATP

O programa ATP foi uma das ferramentas utilizadas para solucionar o caso de curto-circuito entre pontos do tipo sólido. Seus resultados podem ser comparados com os resultados obtidos anteriormente para comprovar a coerência entre a implementação realizada no programa ANAFAS e o método apresentado neste trabalho.

O diagrama unifilar que descreve o caso de curto-circuito entre pontos através de impedância no programa ATP é apresentado pela Figura 27, a seguir:

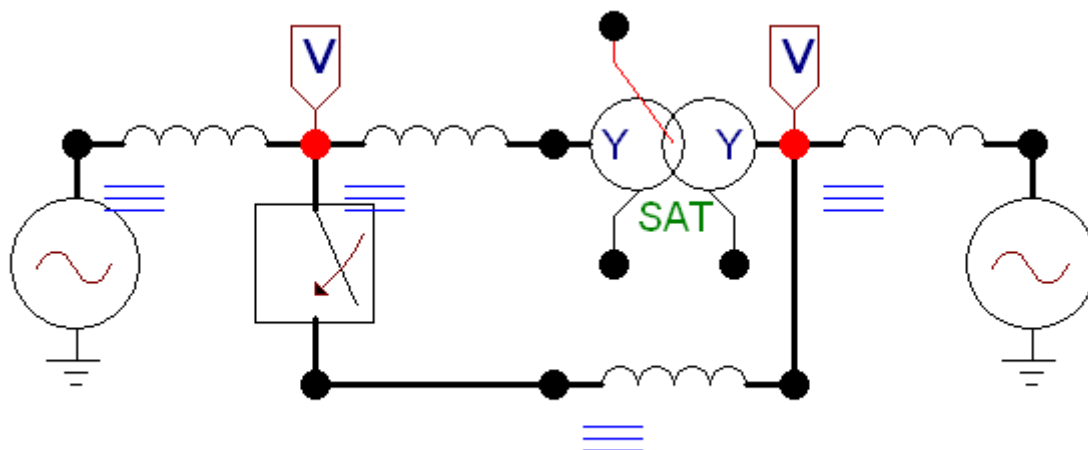


Figura 27 - Diagrama unifilar gerado através do programa ATP

Os resultados obtidos através do programa ATP permitem uma visualização das formas de onda das tensões nos pontos envolvidos no defeito, antes e após sua ocorrência. Para este caso, os pontos envolvidos são as barras 1 e 2.

As tensões das barras 1 e 2, apresentadas na figura 28, obtida através do programa ATP, são referentes a tensões de pico com valores fase-neutro. Outra característica que pode ser observada é que as formas de onda das tensões são referentes ao regime permanente, não sendo apresentadas tensões de regime transitório, que ocorrem durante o defeito. As formas de onda das tensões antes e após o defeito são representadas pela Figura 28, a seguir:

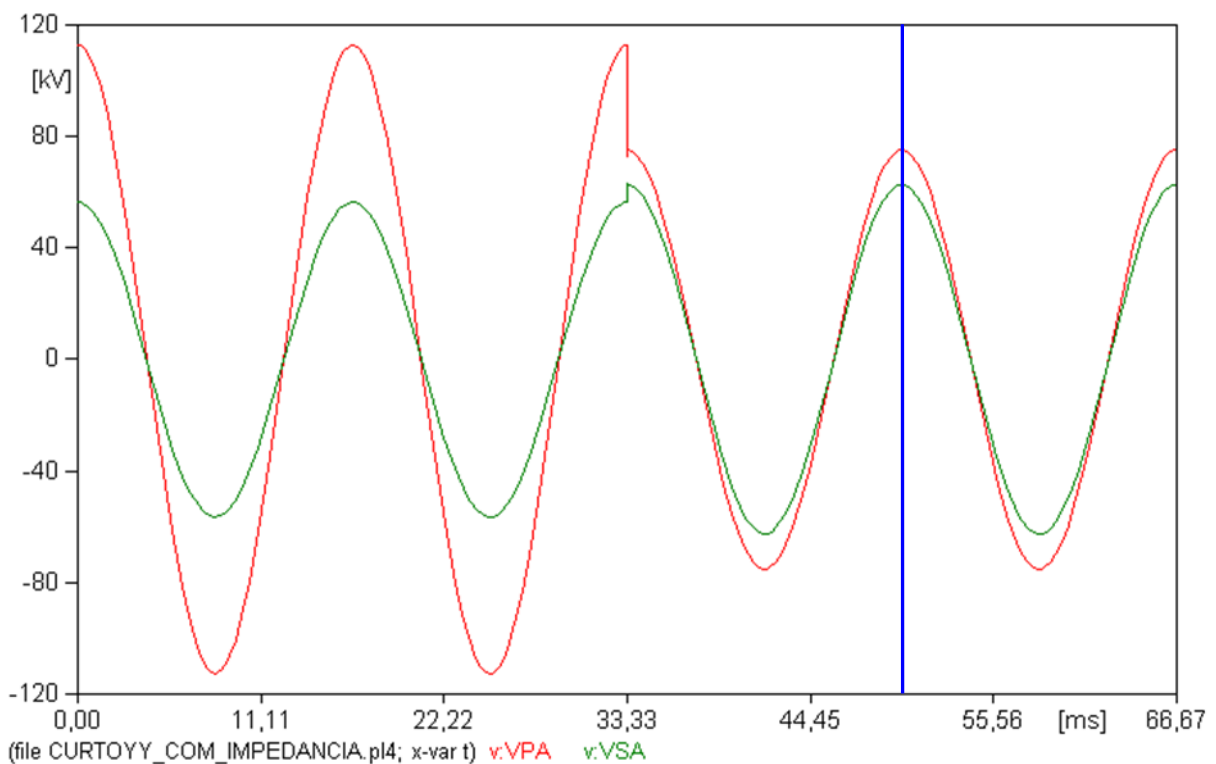


Figura 28 - Formas de onda das tensões referentes às barras 1 e 2 antes e após a ocorrência do defeito.

Na figura 28, a onda na cor vermelha está representando a tensão na barra 1 e a onda na cor verde representa a tensão na barra 2. É possível observar que, antes da ocorrência do defeito ($t < 33,33$ ms) as duas tensões possuem módulos distintos e diferença angular nula, após a ocorrência do defeito ($t > 33,33$ ms) as tensões nas barras 1 e 2 continuam tendo módulos distintos e diferença angular nula, porém com um afundamento na tensão da barra 1

(lado de alta tensão) e um aumento na tensão da barra 2 (lado de baixa tensão), como discutido anteriormente.

Outra característica do programa ATP que deve ser observada é os valores das tensões são especificados no tempo referentes a valores do tipo fase-neutro. Devido a este fato, os valores pré-falta das tensões nas barras 1 e 2, que estão apresentados na figura 28, são diferentes dos valores apresentados no item 4.2.1 - Descrição do Sistema, onde $V_{\text{BARRA-1}} = 138 \text{ kV}$ e $V_{\text{BARRA-2}} = 69 \text{ kV}$, pois estes valores são especificados como RMS do tipo fase-fase. Uma rápida demonstração que pode comprovar que os valores das tensões de entrada apresentados no ATP e na descrição do sistema estão coerentes é mostrada a seguir:

| Barra 1 | | Barra 2 |
|---|--|--|
| $V_{\text{FASE-FASE}}^{\text{RMS}} = 138 \text{ kV}$ | | $V_{\text{FASE-FASE}}^{\text{RMS}} = 69 \text{ kV}$ |
| $V_{\text{FASE-NEUTRO}}^{\text{PICO}} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} 138 \text{ kV}$ | | $V_{\text{FASE-NEUTRO}}^{\text{PICO}} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} 69 \text{ kV}$ |
| $V_{\text{FASE-NEUTRO}}^{\text{PICO}} = 112,68 \text{ kV}$ | | $V_{\text{FASE-NEUTRO}}^{\text{PICO}} = 56,34 \text{ kV}$ |

As tensões de curto podem ser medidas após a ocorrência do curto ($t > 33,33 \text{ ms}$) através do cursor que está representado na figura 28 na cor azul. Os valores medidos através deste cursor são mostrados na figura 29, a seguir:

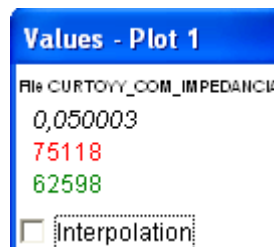



Figura 29 - Valores das tensões de curto de pico referentes às barras 1 e 2.

Sabendo que o ATP apresenta seus valores de tensão referentes aos valores de pico do tipo fase-neutro e que para compará-los aos resultados obtidos anteriormente é necessário que sejam transformados para valores especificados como RMS do tipo fase-neutro basta utilizar a relação de transformação apresentada anteriormente:

$$V_{RMS} = \frac{V_{PICO}}{\sqrt{2}}$$

| | | |
|--|--|--|
| <p>Barra 1</p> $V_{RMS} = \frac{75,118 \text{ kV}}{\sqrt{2}}$ $V_{RMS} = 53,12 \text{ kV}$ |  | <p>Barra 2</p> $V_{RMS} = \frac{62,598 \text{ kV}}{\sqrt{2}}$ $V_{RMS} = 44,26 \text{ kV}$ |
|--|--|--|

Sabendo que os valores das tensões de curto referentes às barras 1 e 2 estão coerentes com os resultados obtido através do demais métodos, pode-se confirmar a correção do método apresentado neste trabalho e da implementação realizada no programa ANAFAS.

4.3 SOLUÇÃO DO CURTO-CIRCUITO ENTRE PONTOS TRIFÁSICO SÓLIDO COM DIFERENTES REFERÊNCIAS ANGULARES

Assim como nos casos apresentados anteriormente, para o caso de curto-circuito entre pontos do tipo sólido com diferentes referências angulares foram utilizados 3 modos diferentes de solução, com o intuito de possibilitar uma comparação entre os métodos e a coerência de seus resultados.

Os três modos de solução que foram utilizados são: o método passo-a-passo apresentado no item 2.2.1 - Curto-Circuito entre Pontos Trifásico Sólido, a solução obtida através do programa ANAFAS (usando a implementação proposta neste trabalho) e a solução obtida através do programa ATP.

De fato, o caso de curto com diferentes referências angulares não passa de um caso de curto-circuito entre pontos do tipo sólido, a única diferença será na montagem da matriz Y^0_{BARRA} , que terá o defasamento do transformador na sua montagem.

Para esta comparação, um único sistema elétrico foi utilizado como caso base para solução do caso de curto-circuito entre pontos sólido com diferentes referências angulares, o qual será descrito no item 4.3.1 - Descrição do Sistema.

Estas diferenças angulares são causadas pela existência de transformadores com ligação $Y\Delta$ ou ΔY entre os dois pontos envolvidos no defeito. Para transformadores conectados em $Y\Delta$ ou ΔY as tensões no seu secundário são defasadas em relação às tensões no primário em $+30^\circ$ ou -30° , dependendo do seu tipo de conexão.

4.3.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

A figura 30 representa um sistema com duas barras que possuem a mesma base de tensão, no entanto, ligadas por um transformador conectado em ΔY , o que proporciona uma defasagem angular da tensão no secundário em relação ao primário de -30° .

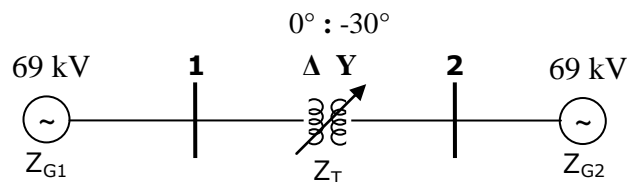


Figura 30 - Caso base para curto-circuito entre pontos trifásico com diferentes referências angulares.

Para o sistema representado pela Figura 30, tem-se os seguintes valores de impedância e admitância expressos em pu e apresentados na Tabela 7:

| Elementos do Sistema | Impedância | [pu] | Correspondentes em Admitância | [pu] |
|----------------------|------------|--------|-------------------------------|----------|
| Gerador | Z_{G1} | $j2,0$ | Y_{G1} | $-j0,5$ |
| | Z_{G2} | $j1,0$ | Y_{G2} | $-j1,0$ |
| Transformador | Z_T | $j4,0$ | Y_{T1} | $-j0,25$ |

Tabela 7 – Valores de impedâncias e admitâncias do sistema expressos em pu.

De fato, o que acontece nesse tipo de defeito é o contato entre as barras 1 e 2, provocando o curto-circuito entre pontos do tipo sólido, porém estas barras possuem referências angulares distintas, o que distingue este tipo de defeito. A modelagem do circuito é feita em pu e ilustrada pela Figura 31:

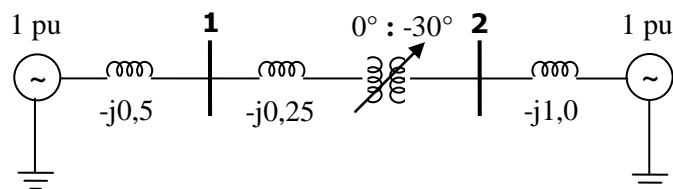


Figura 31 – Diagrama unifilar com valores de admitâncias expressos em pu.

4.3.2 SOLUÇÃO PASSO-A-PASSO DO MÉTODO PROPOSTO

O método de solução apresentado no item 2.2.1 - Curto-Circuito entre Pontos Trifásico Sólido está sendo utilizado para se obter a primeira solução para o sistema apresentado acima.

Os passos do método de solução estão sendo seguidos conforme foi mostrado em sua descrição.

PASSO 01: Montar a matriz Y_{BARRA}^0 com valores por unidade (pu) de admitância e com o defasamento angular incluído.

$$Y_{BARRA}^0 = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}$$

$$Y_{BARRA}^0 = \begin{bmatrix} 0,75\angle -90^\circ & 0,25\angle 120^\circ \\ 0,25\angle 60^\circ & 1,25\angle -90^\circ \end{bmatrix}$$

PASSO 02: Calcular A (relação entre as bases de tensão).

$$A = \frac{69 \text{ kV}}{69 \text{ kV}}$$

$$A = 1$$

PASSO 03: Calcular o vetor de injeção de correntes pré-falta I^0 dado por:

$$I^0 = Y_{BARRA}^0 V^0$$

Onde V^0 é o vetor de tensões pré-falta com valores por unidade (pu).

$$I^0 = \begin{bmatrix} 0,75\angle -90^\circ & 0,25\angle 120^\circ \\ 0,25\angle 60^\circ & 1,25\angle -90^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1\angle 0^\circ \\ 1\angle -30^\circ \end{bmatrix}$$

$$I^0 = \begin{bmatrix} 0,5\angle -90^\circ \\ 1\angle -120^\circ \end{bmatrix}$$

PASSO 04: Calcular Y'' :

Sabendo que $Y_{BARRA}^0 = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}$, então Y'' será:

$$Y'' = \begin{bmatrix} A^2 Y_{11} & A Y_{12} \\ A Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}$$

Como as bases de tensão são iguais, a relação entre ela vale 1 e $Y'' = Y^0_{\text{BARRA}}$.

$$Y'' = \begin{bmatrix} 0,75 \angle -90^\circ & 0,25 \angle 120^\circ \\ 0,25 \angle 60^\circ & 1,25 \angle -90^\circ \end{bmatrix}$$

PASSO 05: Calcular I'' .

Sabendo que $I^0 = \begin{bmatrix} I_1^0 \\ I_2^0 \end{bmatrix}$, então I'' será:

$$I'' = \begin{bmatrix} A I_1^0 \\ I_2^0 \end{bmatrix}$$

Como as bases de tensão são iguais, a relação entre ela vale 1 e $I'' = I^0$.

$$I'' = \begin{bmatrix} 0,5 \angle -90^\circ \\ 1 \angle -120^\circ \end{bmatrix}$$

PASSO 06: Colapsar a barra 1 na barra 2, criando os valores de I_2^{COLAPSO} e Y^{COLAPSO} .

$$Y^{\text{COLAPSO}} = [A^2 Y_{11} + A Y_{12} + A Y_{21} + Y_{22}]$$

$$Y^{\text{COLAPSO}} = [0,75 \angle -90^\circ + 0,25 \angle 120^\circ + 0,25 \angle 60^\circ + 1,25 \angle -90^\circ]$$

$$Y^{\text{COLAPSO}} = [1,567 \angle -90^\circ]$$

$$I_2^{\text{COLAPSO}} = [A I_1^0 + I_2^0]$$

$$I_2^{\text{COLAPSO}} = [0,5 \angle -90^\circ + 1 \angle -120^\circ]$$

$$I_2^{\text{COLAPSO}} = [1,455 \angle -110,1^\circ]$$

PASSO 07: Calcular $V_2^{COLAPSO}$:

$$V_2^{COLAPSO} = (Y^{COLAPSO})^{-1} I_2^{COLAPSO}$$

$$V_2^{COLAPSO} = (1,567\angle -90^\circ)^{-1} (1,455\angle -110,1^\circ)$$

$$V_2^{COLAPSO} = 0,928\angle -20,1^\circ$$

PASSO 08: Calcular $V_1^{COLAPSO}$, tensão da barra 1 em pu:

$$V_1^{COLAPSO} = A V_2^{COLAPSO}$$

$$V_1^{COLAPSO} = 1 (0,928\angle -20,1^\circ)$$

$$V_1^{COLAPSO} = 0,928\angle -20,1^\circ$$

PASSO 09: Calcular o vetor V^{FINAL} sabendo que este é o vetor composto por $V_1^{COLAPSO}$ e $V_2^{COLAPSO}$ da seguinte forma:

$$V^{FINAL} = \begin{bmatrix} V_1^{COLAPSO} \\ V_2^{COLAPSO} \end{bmatrix}$$

$$V^{FINAL} = \begin{bmatrix} 0,928\angle -20,1^\circ \\ 0,928\angle -20,1^\circ \end{bmatrix}$$

PASSO 10: Calcular o vetor de corrente de curto I_{CC} dado por:

$$I_{CC} = I^0 - Y^0 V^{FINAL}$$

$$I_{CC} = \begin{bmatrix} 0,5\angle -90^\circ \\ 1\angle -120^\circ \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0,75\angle -90^\circ & 0,25\angle 120^\circ \\ 0,25\angle 60^\circ & 1,25\angle -90^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,928\angle -20,1^\circ \\ 0,928\angle -20,1^\circ \end{bmatrix}$$

$$I_{CC} = \begin{bmatrix} 0,289\angle -15,03^\circ \\ 0,289\angle 165,07^\circ \end{bmatrix}$$

4.3.3 PROGRAMA ANAFAS

A partir das modificações realizadas no programa ANAFAS, que tornou possível a solução de diversos casos de curto-circuito entre pontos através de sua utilização, foi possível comprovar os resultados obtidos, para o caso apresentado no item 4.3.1 - Descrição do Sistema.

A partir da comparação dos resultados obtidos através do método apresentado neste trabalho e através do programa ANAFAS pode-se confirmar a coerência entre ambos os métodos.

O diagrama unifilar, correspondente ao caso descrito no item 4.3.1 - Descrição do Sistema, gerado a partir do programa ANAFAS é apresentado pela Figura 32, a seguir:

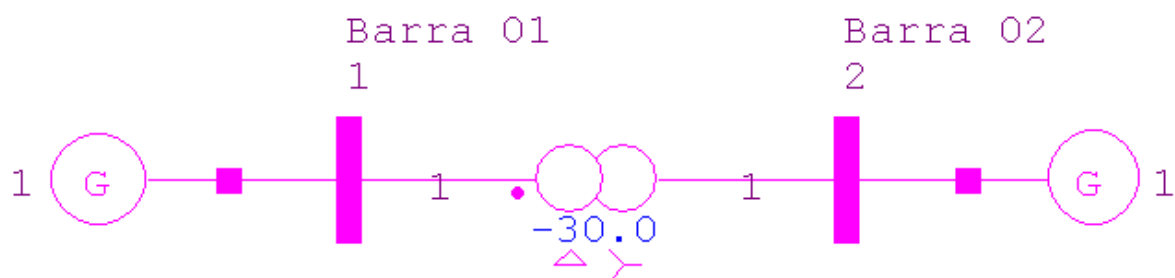


Figura 32 – Diagrama unifilar do caso.

Após a ocorrência do curto, o programa ANAFAS gera um relatório com dados sobre as tensões e correntes de curto e sobre as tensões e correntes de contribuição ambos em módulo e ângulo. O ANAFAS permite que esses dados sejam apresentados nas unidades quilo Volt (kV) e Ampère (A) para tensões e correntes respectivamente, ou por unidade (pu) para ambas as grandezas.

Neste caso, o pu foi escolhido como a unidade dos valores de tensões e correntes apresentados no relatório gerado pelo ANAFAS após a ocorrência do curto-circuito entre

pontos trifásico com diferentes referências angulares. Este relatório pode ser observado a seguir:

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
 ANAFAS - Programa de Análise de Falhas Simultâneas Pag. 1

caso usuario de Mari

SAPRE - REDE:<vazia> CASO:<trabalho>

DESCRICAO DA FALTA COMPOSTA DE 1 DEFEITO

1) Curto serie trifasico entre as barras 1 (Barra 01) e 2 (Barra 02)

T E N S O E S E C O R R E N T E S D E C U R T O

| Barra 1 (Barra 01) | | | | | | | | | | | |
|---------------------|-------|--------|------|---------------|-------|------|--------|--------|------|-------|-------|
| TENSAO(pu) | | | | CORRENTE(pu) | | | | | | | |
| mod. | ang. | mod. | ang. | mod. | ang. | mod. | ang. | mod. | ang. | | |
| A | 0.928 | -20.1 | Z | 0.000 | 0.0 | A | 0.289 | -15.0 | Z | 0.000 | 0.0 |
| B | 0.928 | -140.1 | P | 0.928 | -20.1 | B | 0.289 | -135.0 | P | 0.289 | -15.0 |
| C | 0.928 | 99.9 | N | 0.000 | 0.0 | C | -0.289 | -75.0 | N | 0.000 | 0.0 |

| Barra 2 (Barra 02) | | | | | | | | | | | |
|---------------------|-------|--------|------|---------------|-------|------|--------|--------|------|--------|-------|
| TENSAO(pu) | | | | CORRENTE(pu) | | | | | | | |
| mod. | ang. | mod. | ang. | mod. | ang. | mod. | ang. | mod. | ang. | | |
| A | 0.928 | -20.1 | Z | 0.000 | 0.0 | A | -0.289 | -15.0 | Z | 0.000 | 0.0 |
| B | 0.928 | -140.1 | P | 0.928 | -20.1 | B | -0.289 | -135.0 | P | -0.289 | -15.0 |
| C | 0.928 | 99.9 | N | 0.000 | 0.0 | C | 0.289 | -75.0 | N | 0.000 | 0.0 |

T E N S O E S E C O R R E N T E S D E C O N T R I B U I C A O

Bar. 1 (Barra 01) TEN.(pu)

| mod. | ang. | mod. | ang. | | |
|------|-------|--------|------|-------|-------|
| A | 0.928 | -20.1 | Z | 0.000 | 0.0 |
| B | 0.928 | -140.1 | P | 0.928 | -20.1 |
| C | 0.928 | 99.9 | N | 0.000 | 0.0 |

Bar. 0 (-REFERENCIA-) TEN.(pu) Cir. 1G() CORR.(pu) p/ 1

| mod. | ang. | mod. | ang. | mod. | ang. | mod. | ang. | | | | |
|------|-------|--------|------|-------|------|------|--------|--------|---|-------|-------|
| A | 1.000 | 0.0 | Z | 0.000 | 0.0 | A | 0.172 | -21.9 | Z | 0.000 | 0.0 |
| B | 1.000 | -120.0 | P | 1.000 | 0.0 | B | 0.172 | -141.9 | P | 0.172 | -21.9 |
| C | 1.000 | 120.0 | N | 0.000 | 0.0 | C | -0.172 | -81.9 | N | 0.000 | 0.0 |

Bar. 2 (Barra 02) TEN.(pu) Cir. 1T() CORR.(pu) p/ 1

| mod. | ang. | mod. | ang. | mod. | ang. | mod. | ang. | | | | |
|------|-------|-------|------|-------|------|------|-------|------|---|-------|-----|
| A | 0.928 | -20.1 | Z | 0.000 | 0.0 | A | 0.120 | -5.1 | Z | 0.000 | 0.0 |

| | | | | | | | | | | | |
|---|-------|--------|---|-------|-------|---|--------|--------|---|-------|------|
| B | 0.928 | -140.1 | P | 0.928 | -20.1 | B | 0.120 | -125.1 | P | 0.120 | -5.1 |
| C | 0.928 | 99.9 | N | 0.000 | 0.0 | C | -0.120 | -65.1 | N | 0.000 | 0.0 |

| | | | | | |
|------|---------------|----------|------|-------|-------|
| Bar. | 2 (Barra 02) | TEN.(pu) | | | |
| | mod. | ang. | mod. | ang. | |
| A | 0.928 | -20.1 | Z | 0.000 | 0.0 |
| B | 0.928 | -140.1 | P | 0.928 | -20.1 |
| C | 0.928 | 99.9 | N | 0.000 | 0.0 |

| | | | | | | | | | | | |
|------|------------------|----------|------|-------|-------|-----------------|--------|--------|---|--------|------|
| Bar. | 0 (-REFERENCIA-) | TEN.(pu) | | Cir. | 1G() | CORR.(pu) p/ 2 | | | | | |
| | mod. | ang. | mod. | ang. | mod. | ang. | mod. | ang. | | | |
| A | 1.000 | -30.0 | Z | 0.000 | 0.0 | A | -0.181 | -1.8 | Z | 0.000 | 0.0 |
| B | 1.000 | -150.0 | P | 1.000 | -30.0 | B | -0.181 | -121.8 | P | -0.181 | -1.8 |
| C | 1.000 | 90.0 | N | 0.000 | 0.0 | C | 0.181 | -61.8 | N | 0.000 | 0.0 |

Neste relatório, conforme pode ser observado, são exibidas as fases A, B e C e as componentes simétricas, no entanto, para a comparação dos resultados, iremos utilizar somente a fase A, visto que o curto é trifásico, portanto equilibrado.

Pode-se observar que os resultados das correntes e tensões de curto da fase A referentes às barras 1 e 2 do relatório exibido acima estão coerentes com os valores calculados através do método demonstrado neste trabalho.

Se considerarmos que as tensões de entrada do sistema são tensão senoidais equilibradas e defasadas entre si em 120° e o curto trifásico aplicado, é possível obter os valores para as fases B e C apenas defasando em -120° e $+120^\circ$ em relação a fase A respectivamente.

Após a aplicação do curto-circuito entre pontos sólido do tipo trifásico com diferentes referências angulares envolvendo as barras 1 e 2, o ANAFAS gera um diagrama unifilar de curto, no qual são exibidas também as correntes (em módulo e ângulo) e tensões (módulo) de curto nas barras envolvidas e correntes (em módulo e ângulo) e tensões (módulo) de contribuição no sistema. Neste caso, os valores apresentados no diagrama são referentes à fase A e estão expressos em pu. No entanto, o programa ANAFAS pode exibir qualquer uma das fases ou ainda das componentes simétricas.

A figura 33 representa o diagrama unifilar de curto gerado pelo ANAFAS:

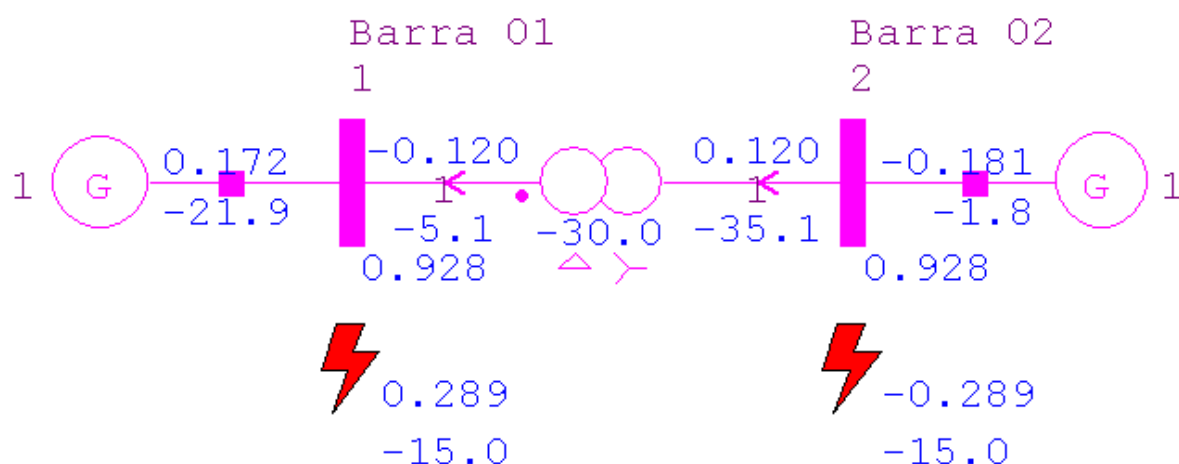


Figura 33 – Diagrama unifilar de curto correntes e tensões em pu.

Pode-se observar que houve uma pequena queda de tensão nos pontos em curto e seus ângulos ficaram definidos entre 0° e 30° ($V_{CC} = 0,928 \angle -20,1^\circ pu$).

Como descrito anteriormente algumas características que são esperadas para os casos de curto-circuito entre pontos trifásico sólido com diferentes bases de tensão também devem ser esperadas para os casos de curto-circuito entre pontos trifásico sólido com diferentes referências angulares.

Para casos de curto com diferentes referências angulares, dos quais as bases de tensão sejam iguais, é esperado que os valores calculados referentes às tensões de curto, quando expressos em pu ou em Volts possuam módulos iguais. Independentemente da unidade na qual a tensão é expressa, é esperado que a diferença angular entre as tensões de curto seja nula. De maneira análoga, os valores das correntes de curto, quando expressos em pu ou em Ampère, devem possuir módulos iguais defasados de 180° , ou seja, é esperado que as correntes de curto tenham sentidos opostos. A igualdade entre os módulos das correntes de curto e os módulos das tensões de curto, quando expressos em pu, acontece devido a igualdade entre as bases de tensão e, conseqüentemente, a relação A ser igual a 1.

Para casos de curto com diferentes referências angulares, dos quais as bases de tensão sejam distintas, é esperado que os valores calculados referentes às tensões de curto, quando expressos em pu, possuam módulos distintos e, quando expressos em Volts possuam módulos iguais. Independentemente da unidade na qual a tensão é expressa, é esperado que a diferença angular entre as tensões de curto seja nula. De maneira análoga, os valores das correntes de

curto, quando expressos em pu, devem possuir módulos distintos e, quando expressos em Ampère, possuam módulos iguais. Outra característica importante é que as correntes de curto devem possuir sentidos opostos, ou seja, ângulos defasados de 180°. Exatamente como ocorre para o caso de curto-circuito entre pontos trifásico sólido com diferentes bases de tensão.

As características esperadas podem ser verificadas ao se comparar os valores das tensões de curto e correntes de curto obtidos através do método proposto e os valores referentes à fase A, expressos em pu e em Volts/Ámpere, obtidos através do ANAFAS.

O comportamento esperado para o caso de curto-circuito entre pontos trifásico sólido com diferentes referências angulares, no qual as bases de tensão são iguais, pode ser observado quando comparadas as figuras 33 e 34.

Para que os valores de tensões e correntes possam ser expressos em Volts e Ampère é preciso que sejam especificados valores de relativos as bases de potência e tensão para que seja possível definir uma base de impedância, já que, inicialmente, as impedâncias foram expressas em pu.

As tensões de base já foram apresentadas na descrição do caso como sendo $V_{BASE1} = 69 \text{ kV}$ (base de tensão referente a barra 1) e $V_{BASE2} = 69 \text{ kV}$ (base de tensão referente a barra 2). Como inicialmente não havia necessidade, a base de potência só foi determinada neste momento como sendo 100 MVA. Este valor foi intencionalmente escolhido pois este também é o valor default para a base de potência do programa ANAFAS.

Para os valores de bases de tensão e potência descritos acima, a figura 34 representa o diagrama unifilar de curto foi gerado pelo ANAFAS com os valores de tensões de curto, expressos em quilo Volts (kV), do tipo fase-neutro e valores de correntes de curto expressos em Ampère (A):

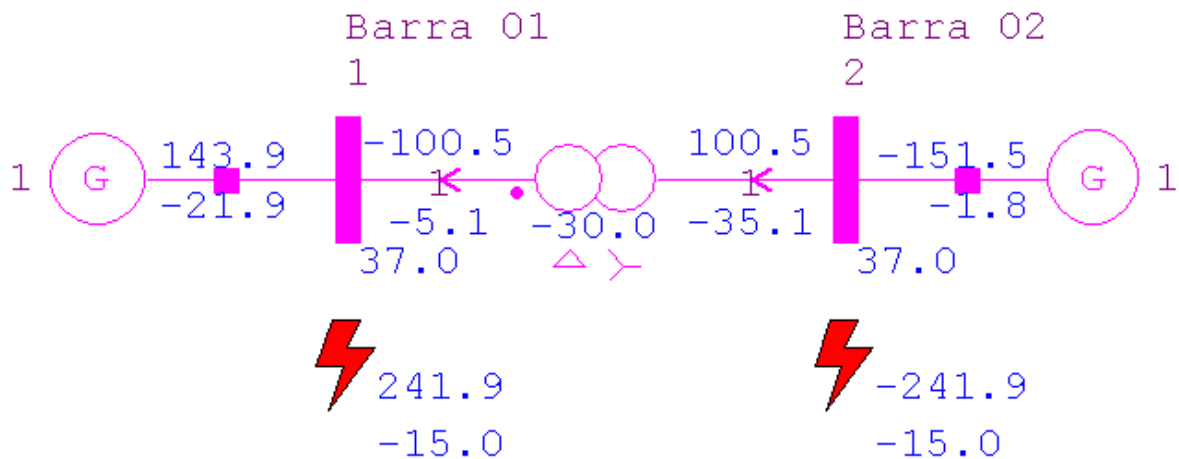


Figura 34 - diagrama unifilar de curto com correntes em Ampère (A) e tensões em quilo Volts (kV).

O relatório gerado pelo programa ANAFAS após a ocorrência do curto-circuito entre pontos trifásico com diferentes referências angulares pode ser observado a seguir:

caso usuario de Mari

DESCRICAO DA FALTA COMPOSTA DE 1 DEFEITO

1) Curto serie trifasico entre as barras 1 (Barra 01) e 2 (Barra 02)

T E N S O E S E C O R R E N T E S D E C U R T O

| Barra 1 (Barra 01) | | | | | | | | | | | |
|---------------------|------|--------|------|------|---------------|------|------|--------|---|-----|-------|
| TENSAO(kV) | | | | | CORRENTE(A) | | | | | | |
| mod. | ang. | | mod. | ang. | mod. | ang. | mod. | ang. | | | |
| A | 37.0 | -20.1 | Z | 0.0 | 0.0 | A | 242 | -15.0 | Z | 0 | 0.0 |
| B | 37.0 | -140.1 | P | 37.0 | -20.1 | B | 242 | -135.0 | P | 242 | -15.0 |
| C | 37.0 | 99.9 | N | 0.0 | 0.0 | C | -242 | -75.0 | N | 0 | 0.0 |

| Barra 2 (Barra 02) | | | | | | | | | | | |
|---------------------|------|--------|------|------|---------------|------|------|--------|---|------|-------|
| TENSAO(kV) | | | | | CORRENTE(A) | | | | | | |
| mod. | ang. | | mod. | ang. | mod. | ang. | mod. | ang. | | | |
| A | 37.0 | -20.1 | Z | 0.0 | 0.0 | A | -242 | -15.0 | Z | 0 | 0.0 |
| B | 37.0 | -140.1 | P | 37.0 | -20.1 | B | -242 | -135.0 | P | -242 | -15.0 |
| C | 37.0 | 99.9 | N | 0.0 | 0.0 | C | 242 | -75.0 | N | 0 | 0.0 |

4.3.4 PROGRAMA ATP

O programa ATP foi uma das ferramentas utilizadas para solucionar o caso de curto-circuito entre pontos do tipo sólido. Seus resultados podem ser comparados com os resultados obtidos anteriormente para comprovar a coerência entre a implementação realizada no programa ANAFAS e o método apresentado neste trabalho.

O diagrama unifilar que descreve o caso de curto-circuito entre pontos com diferentes referências angulares no programa ATP é apresentado pela Figura 35, a seguir:

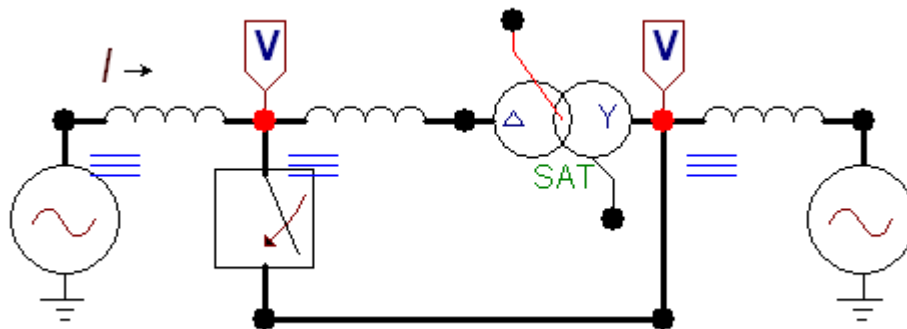


Figura 35 - Diagrama unifilar gerado através do programa ATP

Os resultados obtidos através do programa ATP permitem uma visualização das formas de onda das tensões nos pontos envolvidos no defeito, antes e após sua ocorrência. Para este caso, os pontos envolvidos são as barras 1 e 2.

As tensões das barras 1 e 2, apresentadas na figura 36, são referentes a tensões de pico com valores fase-neutro. Outra característica que pode ser observada é que as formas de onda das tensões são referentes ao regime permanente, não sendo apresentadas tensões de regime transitório, que ocorrem durante o defeito. As formas de onda das tensões antes e após o curto são apresentadas pela Figura 36:

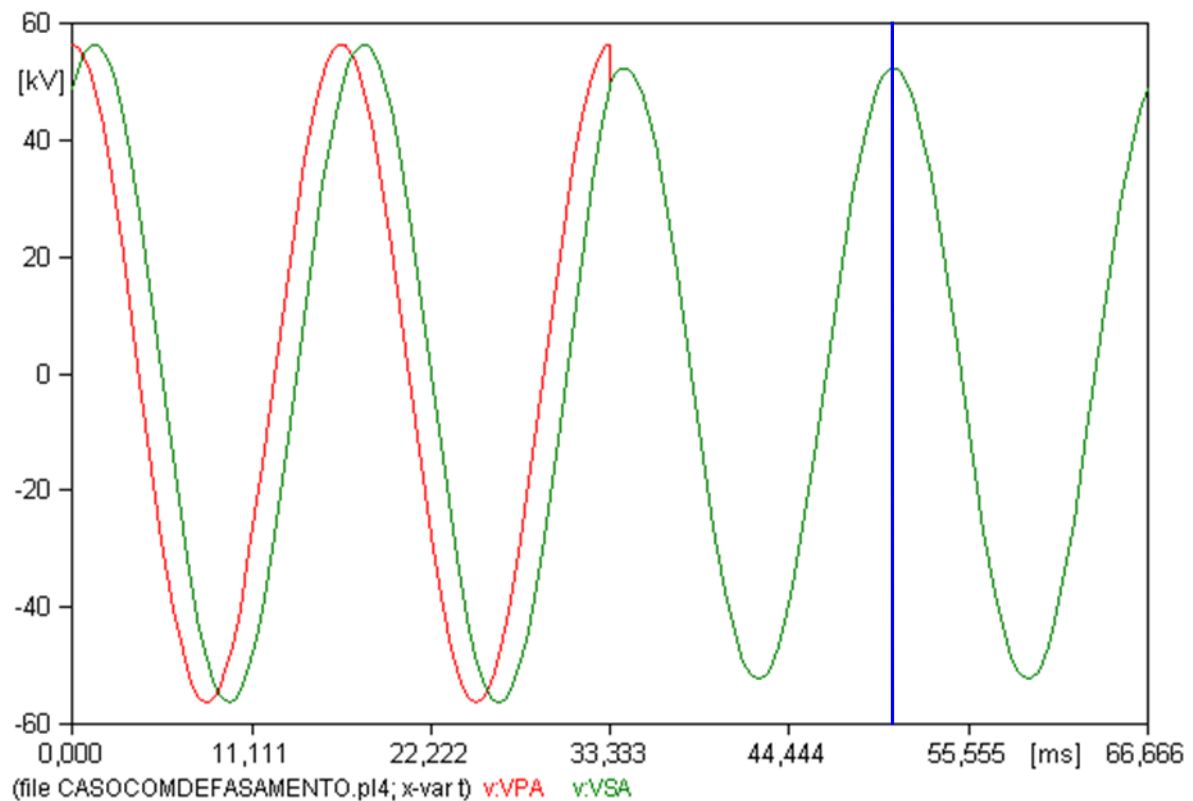


Figura 36 - Formas de onda das tensões referentes às barras 1 e 2 antes e após a ocorrência do defeito.

Na figura 36, a onda na cor vermelha está representando a tensão na barra 1 e a onda na cor verde representa a tensão na barra 2. É possível observar que, antes da ocorrência do defeito ($t < 33,33$ ms) as duas tensões possuem módulos iguais e diferença angular de 30° , após a ocorrência do defeito ($t > 33,33$ ms) as tensões nas barras 1 e 2 permanecem com tensões iguais, porem diferentes das iniciais e apresentam uma diferença angular nula, como discutido anteriormente.

Outra característica do programa ATP que deve ser observada é os valores são especificados no tempo referentes a valores do tipo fase-neutro. Devido a este fato, os valores pré-falta das tensões nas barras 1 e 2 que estão apresentados na figura 36 são diferentes dos valores apresentados no item 4.3.1 - Descrição do Sistema, onde $V_{\text{BARRA-1}} = 69$ kV e $V_{\text{BARRA-2}} = 69$ kV, pois estes valores são especificados como RMS do tipo fase-fase. Uma rápida demonstração que pode comprovar que os valores das tensões de entrada apresentados no ATP e na descrição do sistema estão coerentes é mostrada a seguir:

$$V_{FASE-FASE}^{RMS} = 69 \text{ kV}$$

$$V_{FASE-NEUTRO}^{PICO} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} 69 \text{ kV}$$

$$V_{FASE-NEUTRO}^{PICO} = 56,34 \text{ kV}$$

As tensões de curto podem ser medidas após a ocorrência do curto ($t > 33,33 \text{ ms}$) através do cursor que está representado na figura 36 pela cor azul. Os valores medidos através deste cursor são mostrados na Figura 37, abaixo:

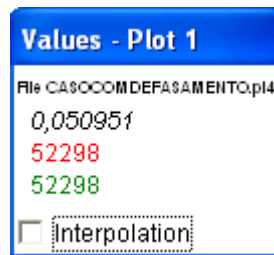


Figura 37 - Valores das tensões de curto de pico referentes às barras 1 e 2.

Sabendo que o ATP apresenta seus valores de tensão referentes aos valores de pico do tipo fase-neutro e para compará-los aos resultados obtidos anteriormente é necessário que sejam transformados para valores especificados como RMS do tipo fase-neutro basta utilizar a relação de transformação apresentada anteriormente:

$$V_{RMS} = \frac{V_{PICO}}{\sqrt{2}}$$

$$V_{RMS} = \frac{52,298 \text{ kV}}{\sqrt{2}}$$

$$V_{RMS} = 36,98 \text{ kV}$$

Sabendo que os valores das tensões de curto para as barras 1 e 2 são iguais e que o resultado obtido através do programa ATP é coerente com os demais resultados, é possível

confirmar a correção do método apresentado neste trabalho e da implementação realizada no programa ANAFAS.

4.4 *CURTO-CIRCUITO ENTRE PONTOS TRIFÁSICO ATRAVÉS DE IMPEDÂNCIA X SÓLIDO*

A diferença básica entre os curtos-circuitos entre pontos trifásicos do tipo sólido e através de impedância é que, no primeiro caso, há o contato entre os condutores dos circuitos envolvidos no defeito sem que haja nenhuma impedância entre eles e, para o segundo caso, há a presença de uma impedância entre os circuitos. Esta diferença acaba conferindo uma série de características esperadas distintas, como visto anteriormente.

Para o caso de curto-circuito entre pontos trifásico do tipo sólido, que possuam bases de tensão distintas, é esperado que os valores das tensões de curto, quando expressas em pu tenham módulos distintos, porém, quando expressas em Volts, possuam módulos iguais e, em ambos os casos, a diferença angular entre elas seja nula. Também é esperado que os valores das correntes de curto, quando expressos em pu, possuam módulos distintos e, quando expressas em Ampère, possuam módulos iguais, no entanto, é esperado que as correntes de curto tenham sentidos opostos (ângulos defasados de 180°).

Para o caso de curto-circuito entre pontos trifásico através de impedância, que possuam bases de tensão distintas, é esperado que os valores referentes às tensões de curto possuam módulos distintos tanto quando expressos em pu quanto quando expressos em Volts, devido à queda de tensão causada pela impedância de falta (Z_{FALTA}). Assim como acontece no caso do módulo da tensão, a defasagem angular entre as tensões de curto também é devido à impedância de falta (Z_{FALTA}). No caso das correntes de curto, é esperado que seus valores, quando expressos em Ampère, apresentem módulos iguais e, quando expressos em pu, possuam módulos distintos e, em ambos os casos da corrente, é esperado que seus ângulos tenham sentidos opostos, ou seja, defasados de 180° .

De fato, casos de curto-circuito entre pontos trifásico através de impedância no qual a impedância envolvida no defeito é consideravelmente pequena se assemelham muito a casos de curto-circuito entre pontos trifásico do tipo sólido. Para entender melhor esta afirmação, pode-se considerar que os casos de defeitos do tipo sólido podem ser modelados como se houvesse uma impedância nula conectando os circuitos envolvidos no curto. Sabendo que os casos de defeito através de impedância são modelados através de uma impedância que conecta os circuitos envolvidos no curto, já é possível identificar as semelhanças entre a modelagem dos casos.

Estas semelhanças aumentam quando a impedância que conecta os circuitos nos casos de defeito através de impedância tende a zero, ou seja, casos de curto-circuito trifásico através de impedância, nos quais a impedância de falta é consideravelmente pequena, se assemelham muito aos casos de curto-circuito trifásico do tipo sólido.

Para possibilitar esta comparação, o caso base utilizado em ambos os defeitos em questão, curto do tipo sólido e através de impedância, foi novamente utilizado. Desta vez, o defeito aplicado neste caso base foi o curto através de impedância com uma impedância de falta consideravelmente pequena ($Z_{FALTA} = 0,001 \text{ pu}$) com o auxílio do programa ANAFAS.

Apesar de casos de curto-circuito entre pontos trifásico através de impedância possuírem algumas características específicas esperadas para seus resultados, neste caso, quando o defeito ocorre com uma impedância de falta tendendo a zero, os resultados obtidos refletem quase que perfeitamente, os resultados que devem ser esperados quando ocorre o defeito do tipo sólido, o que comprova a aproximação de um caso de defeito através de impedância para um caso de defeito sólido quando a impedância de falta tende a zero.

O diagrama unifilar de curto gerado através do programa ANAFAS que mostra as tensões e correntes de curto expressas em quilo Volts (kV) e Ampère (A) está representado pela Figura 38, a seguir:

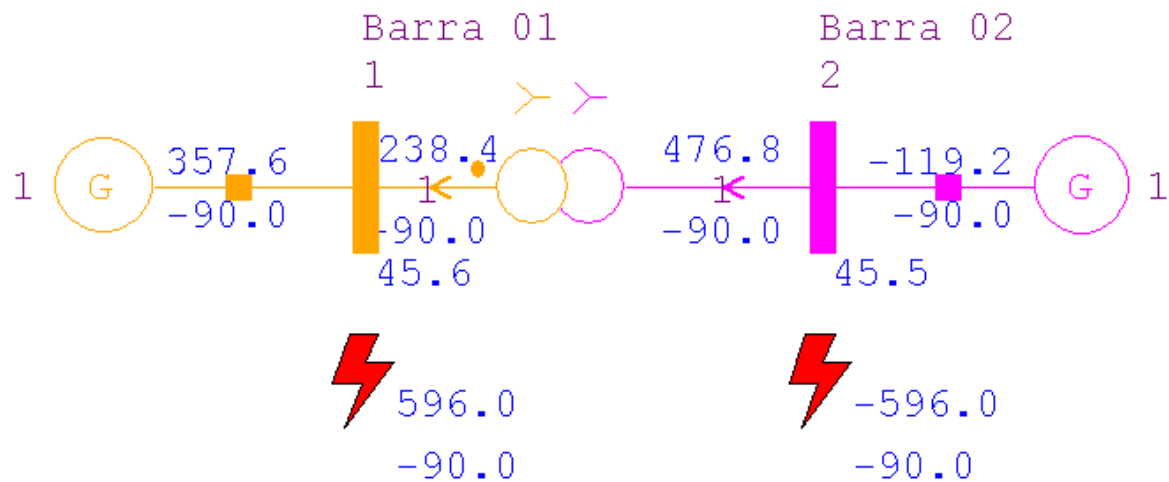


Figura 38 – Diagrama unifilar de curto com tensões expressas em quilo Volts (kV) e correntes em Ampère (A)

Pode-se observar, a partir da Figura 38, que o resultado para este caso foi praticamente o mesmo obtido para o caso de curto-circuito trifásico do tipo sólido, representado pela Figura 16, estudado a partir do mesmo caso base.

Com o intuito de simplificar o relatório gerado pelo ANAFAS, foi selecionada apenas a parte que mostra as correntes e tensões de curto nas barras envolvidas no defeito. O comportamento descrito acima pode ser observado neste relatório:

caso usuario de Mari

DESCRICAO DA FALTA COMPOSTA DE 1 DEFEITO

1) Curto serie atraves de impedancias entre as barras 1 (Barra 01) e 2 (Barra 02).

| | AA | AB | AC | BA | BB | BC | CA | CB | CC |
|-------|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|------|
| R(pu) | 0.00 | ***** | ***** | ***** | 0.00 | ***** | ***** | ***** | 0.00 |
| X(pu) | 0.00 | ***** | ***** | ***** | 0.00 | ***** | ***** | ***** | 0.00 |

T E N S O E S E C O R R E N T E S D E C U R T O

| | | | | Barra 1 (Barra 01) | | | | | | | |
|---|------|--------|---|--------------------|------|------|------|---------------|------|------|-------|
| | | | | TENSAO(kV) | | | | CORRENTE(A) | | | |
| | mod. | ang. | Z | mod. | ang. | mod. | ang. | Z | mod. | ang. | |
| A | 45.6 | 0.0 | Z | 0.0 | 0.0 | A | 596 | -90.0 | Z | 0 | 0.0 |
| B | 45.6 | -120.0 | P | 45.6 | 0.0 | B | -596 | -30.0 | P | 596 | -90.0 |

| Barra | | | | | 2 (Barra 02) | | | | | | |
|------------|------|--------|---|------|---------------|------|------|--------|------|------|-------|
| TENSAO(kV) | | | | | CORRENTE(A) | | | | | | |
| | mod. | ang. | | ang. | | mod. | ang. | | ang. | | |
| C | 45.6 | 120.0 | N | 0.0 | 0.0 | C | -596 | -150.0 | N | 0 | 0.0 |
| A | 45.5 | 0.0 | Z | 0.0 | 0.0 | A | -596 | -90.0 | Z | 0 | 0.0 |
| B | 45.5 | -120.0 | P | 45.5 | 0.0 | B | 596 | -30.0 | P | -596 | -90.0 |
| C | 45.5 | 120.0 | N | 0.0 | 0.0 | C | 596 | -150.0 | N | 0 | 0.0 |

4.5 SOLUÇÃO DO CURTO-CIRCUITO ENTRE PONTOS MONOFÁSICO SÓLIDO EM UM SISTEMA DE GRANDE PORTE

Com o objetivo de estudar casos de curto-circuito entre pontos em sistemas de grande porte, foi utilizada uma configuração do Sistema Interligado Nacional, mantida pelo ONS, com o auxílio do programa ANAFAS.

Para esta análise a ferramenta utilizada foi o programa ANAFAS, onde foi aplicado o curto-circuito entre pontos monofásico sólido com diferentes bases de tensão nos terminais de um transformador de 13,8/138 kV do sistema elétrico brasileiro.

Assim como para outros tipos de curto, para o caso de curto-circuito entre pontos monofásico do tipo sólido algumas características devem ser esperadas em seus resultados. Para o defeito monofásico sólido, aplicado nas fases A de ambos os pontos, são esperados valores de tensões de curto iguais nas fases A, quando expressos em Volts e distintos quando expressos em pu e correntes de curto iguais quando expressos em Ampère, porém com sentidos opostos, ou seja, defasadas de 180°. Para as fases B e C, como ocorre nos casos de defeito monofásico convencional, suas correntes de curto devem ser zero e suas tensões de curto devem sofrer pequenas variações em relação a seus valores pré-falta.

Após a aplicação do defeito, é possível obter os valores das correntes e tensões de curto expressos em pu ou em Ampère (A) e quilo Volts (kV), respectivamente. É válido lembrar que as tensões nominais dos geradores são expressas em valores RMS do tipo fase-fase e as tensões de saída são expressas em valores RMS do tipo fase-neutro.

Neste caso, o diagrama unifilar de curto, representado pela Figura 39, apresenta as tensões expressas em quilo Volts (kV) e as correntes expressas em Ampère (A):

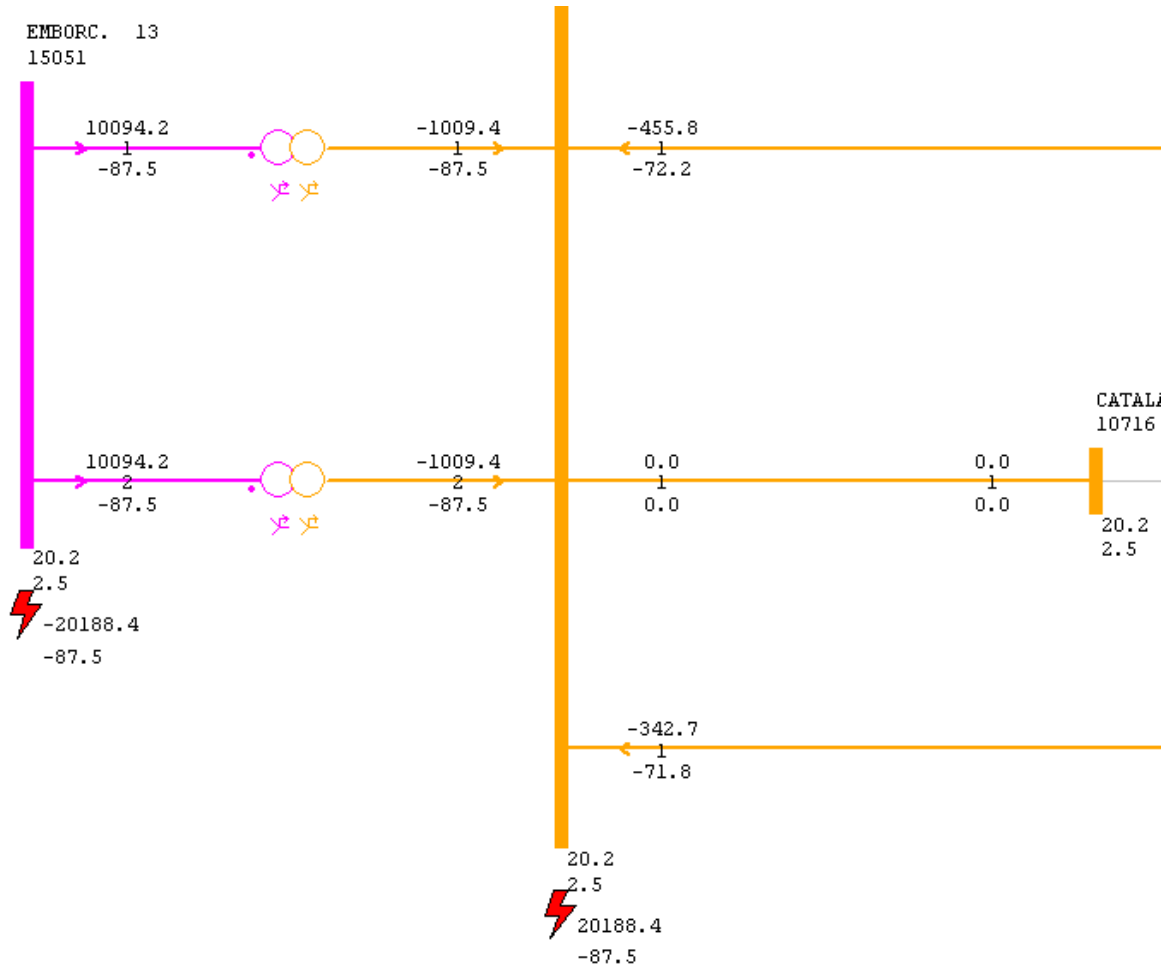


Figura 39 – Parte do diagrama unifilar do sistema elétrico brasileiro, no qual são mostradas as barras envolvidas no caso de curto-circuito entre pontos monofásico sólido.

Apesar do relatório gerado pelo programa ANAFAS, conter informações a respeito dos valores de tensões e correntes de curto e de tensões e correntes de contribuição, por questão de simplificação, estão sendo apresentados somente os valores referentes às tensões e correntes de curto, nos quais o comportamento deste tipo de defeito pode ser observado.

Nota-se que houve sobretensão na fase A do barramento de baixa tensão do trafo (13,8 kV) enquanto no lado de alta tensão (138 kV) houve forte um afundamento de tensão, o que acarreta que um fluxo de corrente pelo trafo saindo do lado de baixa para o lado de alta.

* ONS * SISTEMA INTERLIGADO * CONF SET/2009 VERSÃO 17/11/2009 * BR0909A.ANA *

SAPRE - REDE:<vazia> CASO:CS 500-440

DESCRICA0 DA FALTA COMPOSTA DE 1 DEFEITO

1) Curto serie monofasico entre as fases A das barras 15051 (EMBORC. 13) e 15052 (EMBORC. 138) .

T E N S O E S E C O R R E N T E S D E C U R T O

| Barra 15051 (EMBORC. 13) | | | | | | | | | | |
|---------------------------|------|--------|---|------|---------------|------|--------|-------|---|-------------|
| TENSAO(kV) | | | | | CORRENTE(A) | | | | | |
| | mod. | ang. | | | | mod. | ang. | | | |
| A | 20.2 | 2.5 | Z | 4.7 | 3.1 | A | -20188 | -87.5 | Z | -6729 -87.5 |
| B | 7.6 | -113.5 | P | 11.7 | 1.6 | B | 0 | 0.0 | P | -6729 -87.5 |
| C | 7.5 | 113.9 | N | 3.8 | 4.9 | C | 0 | 0.0 | N | -6729 -87.5 |

| Barra 15052 (EMBORC. 138) | | | | | | | | | | |
|----------------------------|------|--------|---|------|---------------|------|-------|-------|---|------------|
| TENSAO(kV) | | | | | CORRENTE(A) | | | | | |
| | mod. | ang. | | | | mod. | ang. | | | |
| A | 20.2 | 2.5 | Z | 13.5 | -179.3 | A | 20188 | -87.5 | Z | 6729 -87.5 |
| B | 76.0 | -113.5 | P | 56.7 | 0.5 | B | 0 | 0.0 | P | 6729 -87.5 |
| C | 74.8 | 113.9 | N | 23.0 | 178.7 | C | 0 | 0.0 | N | 6729 -87.5 |

4.6 SOLUÇÃO DO CURTO-CIRCUITO ENTRE PONTOS TRIFÁSICO DO TIPO SÓLIDO EM UM SISTEMA DE GRANDE PORTE

Com o propósito de estudar casos de curto-circuito entre pontos em sistemas de grande porte em que a possibilidade de ocorrência exista de fato, foi utilizado o mapa geo-elétrico fornecido pelo ONS que representa o Sistema Interligado Nacional (SIN). Com o auxílio do mapa geo-elétrico foi possível identificar pontos de cruzamento de linhas, nos quais existe a possibilidade de acontecimento deste tipo de defeito.

Para realizar este estudo, foi escolhido um único ponto de cruzamento. Este ponto está localizado entre as linhas de transmissão que interligam Ribeirão Preto a S.Bárbara D'Oeste e Araraquara a Poços de Caldas. Pode-se observar que este ponto de cruzamento ocorre a aproximadamente 40% de ambas as linhas. Outra informação importante a respeito deste

sistema é a tensão nominal de cada linha, que é 440 kV para a linha que interliga Ribeirão Preto a S.Bárbara e 500 kV para a linha que interliga Araraquara a Poços de Caldas.

A região onde estão localizadas as linhas utilizadas neste estudo está sendo mostrada na figura 40, que faz parte do mapa geo-elétrico fornecido pelo ONS.

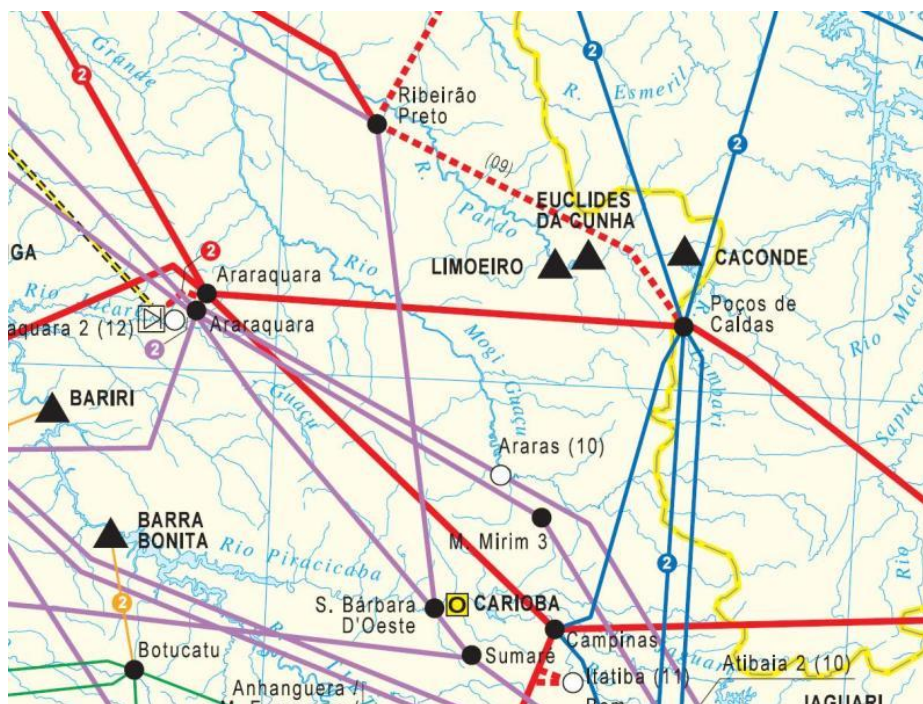


Figura 40 - Parte do mapa geo-elétrico do ONS onde há cruzamento entre linhas do sistema elétrico.

A partir do mesmo caso base do sistema brasileiro utilizado no item anterior, mantido pelo ONS, foi possível identificar as barras em questão, Ribeirão Preto, S.Bárbara, Araraquara e Poços de Caldas e suas respectivas linhas de transmissão e aplicar o curto-circuito entre pontos trifásico do tipo sólido. Para dar mais realidade ao estudo, o curto foi aplicado a 40% de cada uma das linhas.

Após a aplicação do defeito, é possível obter os valores das correntes e tensões de curto expressos em pu ou em Ampère (A) e Volts (kV) respectivamente. É válido lembrar que as tensões nominais dos geradores são expressas em valores RMS do tipo fase-fase e as tensões de saída são expressas em valores RMS do tipo fase-neutro.

A figura 41 representa o diagrama unifilar de curto, gerado pelo ANAFAS, com valores de tensões e correntes de curto expressas em pu:

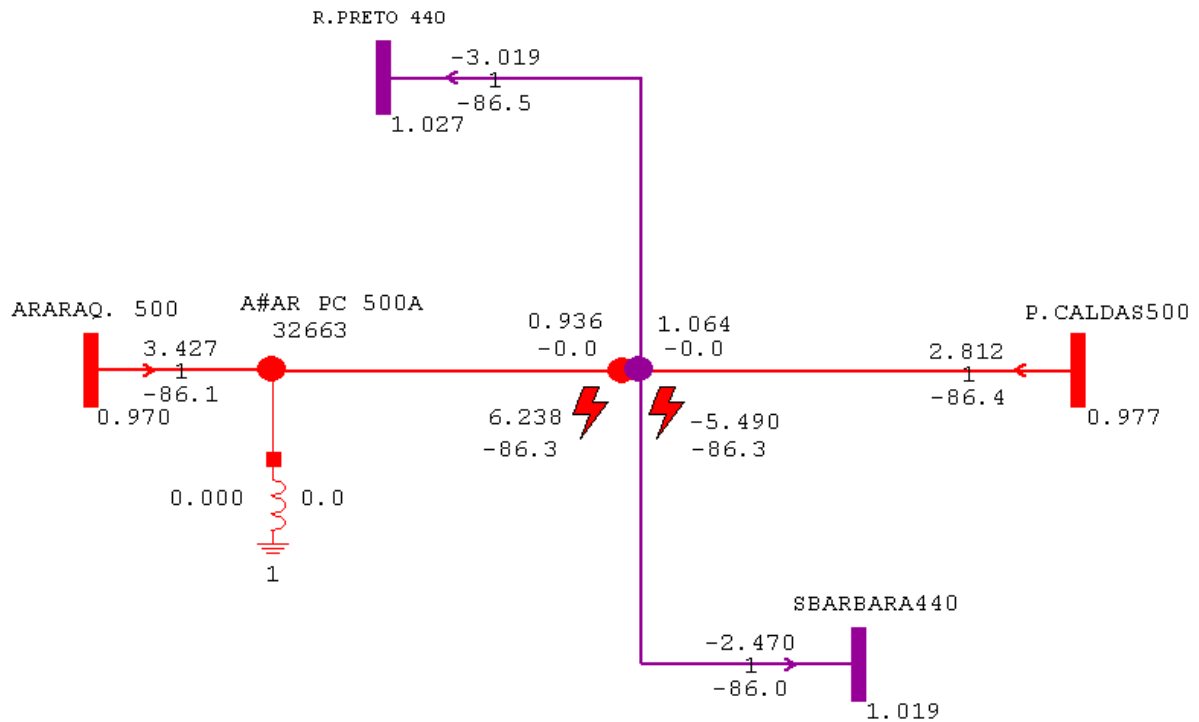


Figura 41 – Diagrama unifilar de curto gerado pelo ANAFAS com tensões e correntes expressas em pu.

Observa-se que ocorre uma leve subtensão da linha de 500 kV e uma leve sobretensão na linha de 440 kV.

Sabendo que os casos de defeitos sólidos possuem certas características que devem esperadas para seus resultados, pode-se analisar a coerência dos resultados obtidos através do programa ANAFAS com o resultado esperado para este tipo de defeito.

Os resultados esperados para as tensões de curto é que quando expressas em Volts módulos e ângulos iguais e, quando expressas em pu, tenham módulos diferentes e ângulos iguais. No caso das correntes de curto, os resultados esperados são que, quando expressas em Ampère tenham módulos iguais e sejam defasadas de 180° e, quando expressas em pu, tenham módulos distintos e também defasadas de 180°.

Com o intuito de comprovar o comportamento característico do defeito sólido, a Figura 42 representa o mesmo diagrama unifilar de curto da Figura 41, porém com valores de tensões e correntes expressos em quilo Volts (kV) e Ampère (A).

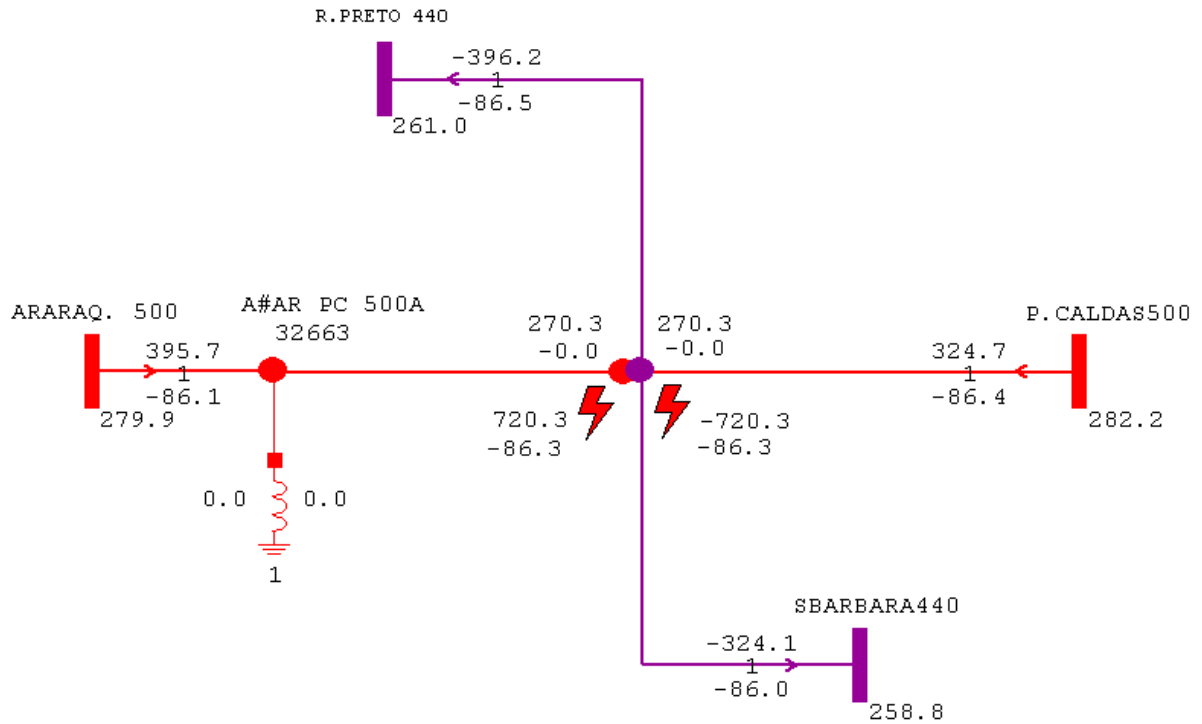


Figura 42 – Diagrama unifilar de curto gerado pelo ANAFAS com tensões expressas em quilo Volts (kV) e correntes expressas em Ampère (A).

O relatório gerado pelo programa ANAFAS após a aplicação do defeito é apresentado a seguir. Na realidade, este relatório revela os valores das correntes e tensões de curto e correntes e tensões de contribuição, no entanto, por simplicidade, serão mostradas apenas as correntes e tensões de curto.

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
ANAFAS - Programa de Análise de Falhas Simultâneas Pag. 1

* ONS * SISTEMA INTERLIGADO * CONF SET/2009 VERSÃO 17/11/2009 * BR0909A.ANA *

SAPRE - REDE:<vazia> CASO:<trabalho>
DESCRICAÇÃO DA FALTA COMPOSTA DE 3 DEFEITOS

- 1) Criação de barra fictícia -1 (FIC.INTER.01) a 40% da barra 19250 (R.PRETO 440) ligada à barra 19060 (S BARBARA440) (circ. 1) .
- 2) Criação de barra fictícia -2 (FIC.INTER.02) a 40% da barra 32663 (A#AR PC 500A) ligada à barra 14 (P.CALDAS500) (circ. 1) .
- 3) Curto série trifásico entre as barras fictícia -1 (FIC.INTER.01) e fictícia -2 (FIC.INTER.02) .

T E N S O E S E C O R R E N T E S D E C U R T O

| Barra -1 (FIC.INTER.01) | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|-------|--------|------|---------------|------|------|------|--------|---|------|-------|
| TENSAO(kV) | | | | CORRENTE(A) | | | | | | | |
| mod. | ang. | mod. | ang. | mod. | ang. | mod. | ang. | | | | |
| A | 270.3 | 0.0 | Z | 0.0 | 0.0 | A | -720 | -86.3 | Z | 0 | 0.0 |
| B | 270.3 | -120.0 | P | 270.3 | 0.0 | B | 720 | -26.3 | P | -720 | -86.3 |
| C | 270.3 | 120.0 | N | 0.0 | 0.0 | C | 720 | -146.3 | N | 0 | 0.0 |

| Barra -2 (FIC.INTER.02) | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|-------|--------|------|---------------|------|------|------|--------|---|-----|-------|
| TENSAO(kV) | | | | CORRENTE(A) | | | | | | | |
| mod. | ang. | mod. | ang. | mod. | ang. | mod. | ang. | | | | |
| A | 270.3 | 0.0 | Z | 0.0 | 0.0 | A | 720 | -86.3 | Z | 0 | 0.0 |
| B | 270.3 | -120.0 | P | 270.3 | 0.0 | B | -720 | -26.3 | P | 720 | -86.3 |
| C | 270.3 | 120.0 | N | 0.0 | 0.0 | C | -720 | -146.3 | N | 0 | 0.0 |

Os valores exibidos no relatório reiteram as características que devem ser esperadas quando o curto-circuito entre pontos trifásico do tipo sólido é aplicado.

5. CONCLUSÕES

O trabalho desenvolvido descreve um método de solução para um novo tipo de curto-circuito e sua implementação realizada no programa de análise de faltas do CEPTEL, o ANAFAS. Este novo tipo de falta está sendo tratado neste trabalho por curto-circuito entre pontos.

A principal diferença entre os curtos-circuitos tradicional e entre pontos é o número de pontos envolvidos do sistema. No caso do curto-circuito tradicional, o defeito ocorre envolvendo um único ponto do sistema e, conseqüentemente, apenas um valor de base de tensão. Já o que ocorre no caso do curto-circuito entre pontos é o envolvimento de 2 pontos do sistema podendo ter níveis de tensão distintos.

Como condição necessária, porém não suficiente, para a ocorrência do curto-circuito entre pontos há a configuração física do sistema elétrico. Para que seja possível a ocorrência deste tipo de defeito é necessário que haja 2 linhas ou barramentos fisicamente próximos.

Na maioria dos casos, os estudos de análise de faltas têm por objetivo o ajuste da proteção e o dimensionamento de equipamentos para os sistemas elétricos. Apesar de esses estudos serem realizados através da simulação dos tipos tradicionais de curto-circuito, esta implementação pode ser útil, visto que é possível que haja correntes de curto maiores em defeitos entre pontos do que em defeitos tradicionais. A implementação realizada pode ser útil também em estudos de análise de ocorrências deste tipo.

Devido ao fato do curto-circuito entre pontos poder envolver pontos do sistema com níveis de tensão distintos e os programas de análise de redes elétricas, inclusive o ANAFAS, usualmente realizarem seus cálculos em pu, foi necessária uma adaptação do método de solução de curto existente no ANAFAS para lidar com este novo tipo de defeito.

Com o objetivo de validar a implementação realizada, foram feitos testes com diversos tipos de curto-circuito entre pontos e seus resultados foram comparados com os resultados obtidos através do programa ATP. Nesta comparação, ficou claro a coerência entre os resultados e o sucesso da implementação realizada.

Finalmente, conclui-se que o objetivo de implementar o curto-circuito entre pontos no programa ANAFAS foi plenamente alcançado.

Como proposta para trabalhos futuros existe a possibilidade de analisar a conveniência da utilização do curto-circuito entre pontos nos estudos de ajuste de proteção e dimensionamento de equipamentos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] “Programa de Análise de Faltas Simultâneas” – ANAFAS – Versão 4.5 – Manual do Usuário, Rio de Janeiro, RJ, 2010.
- [2] F.L. Alvarado, “Formation of Y-node using the primitive Y-node concept”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-IO1, No. 12 December 1982
- [3] F.L. Alvarado, S.K. Mong e M.K. Enns, “A Fault Program with Macros, Monitors and Direct Compensation in Mutual Groups”, IEEE Transactions on PAS, vol. 104, no. 5, May 1985, pp. 1109-1120.
- [4] V. Brandwajn e W.F.Tinney, “Generalized Method of Fault Analysis”, IEEE Transactions on PAS, vol. 104, no. 6, June 1985, pp. 1301-1306.