



GRUPO V

UM MODELO MATEMÁTICO PARA A IMPEDÂNCIA DE SEQUÊNCIA ZERO DO CONJUNTO:  
TRANSFORMADOR ESTRELA-ATERRADA/DELTA E REATOR DE ATERRAMENTO ZIG-ZAG  
INSTALADOS EM SOLOS DE ALTA RESISTIVIDADE

Mauro Fissassi Ushikubo\*

José N. R. Romeiro Filho

COPEL

RESUMO

O trabalho mostra o desenvolvimento matemático de uma expressão para obtenção da impedância de seqüência zero do conjunto mostrado na Figura 2. É comprovada mediante simulação pelo ATP/EMTP e através de ensaios reais de campo. Esta impedância foi modelada no ATP/EMTP juntamente com todos os outros componentes da região onde ocorria o problema de circulação de corrente pelo neutro da linha de subtransmissão (34,5 kV) que alimenta um transformador (34,5 kV estrela-aterrada/13,8 kV delta) para uma falta fase-terra no lado delta deste transformador. Foram feitas simulações de todas as faltas ensaiadas no campo e os resultados foram bastante próximos. Partindo deste modelo foram aplicadas as modificações na configuração visando solucionar o problema da circulação de corrente pelo neutro da linha de subtransmissão citada anteriormente. A solução adotada foi simulada exaustivamente e implementada em campo. Novos ensaios de campo foram feitos e os resultados se apresentaram conforme o esperado. Por outro lado as simulações indicaram também que quanto menor a resistência da malha de terra auxiliar independente tanto melhor para a sensibilização da proteção de terra do alimentador de 13,8 kV. Neste sentido foram pesquisados e instalados vários eletrodos especiais dentro de cubas com gel para melhor condicionamento do solo. Medições posteriores da resistência da malha de terra foram feitas confirmando-se os resultados.

PALAVRAS-CHAVE:

ATP, Componentes de Sequência, Aterramento

1.0 - INTRODUÇÃO

As constatações de várias ocorrências com desligamentos de circuitos 34,5 kV (Sistema estrela-aterrada) pela atuação de relés de neutro (51N) para faltas à terra (F) em alimentadores de 13,8 kV (Sistema delta com reator de aterramento zig-zag) de SE's 34,5/13,8 kV remotas (vide Figura 1), que inicialmente julgava-se fisicamente impossíveis de ocorrerem, fizeram com que fosse criada uma força tarefa envolvendo várias áreas da Copel para pesquisar e propor uma solução para o problema.

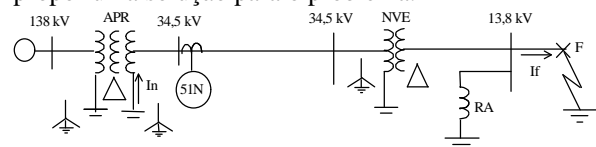


Figura 1 - Configuração do Sistema

Para caracterizar melhor o fenômeno, foram feitos ensaios reais de falta no campo com monitoração das principais correntes do sistema. Passada a fase de comprovação de que realmente circula corrente conforme mostrada na Figura, passou-se a elaboração de um modelo matemático para explicar este fenômeno. A partir das técnicas utilizadas nos ensaios para a obtenção das impedâncias de transformador obteve-se analiticamente as expressões das impedâncias de seqüência zero do conjunto formado pelo transformador de força (TF) com conexão estrela na alta tensão e delta na baixa tensão, pelo reator zig-zag (RA) conectado no lado delta do TF e ainda com o neutro da estrela do TF conectado solidamente ao neutro do RA e esta conexão entre os neutros ligada à terra através de uma impedância  $Z_G$  representando a resistência de aterramento da malha de terra da subestação, conforme mostra a Figura 2

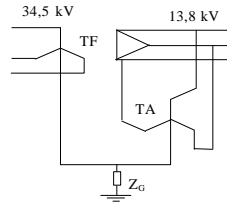


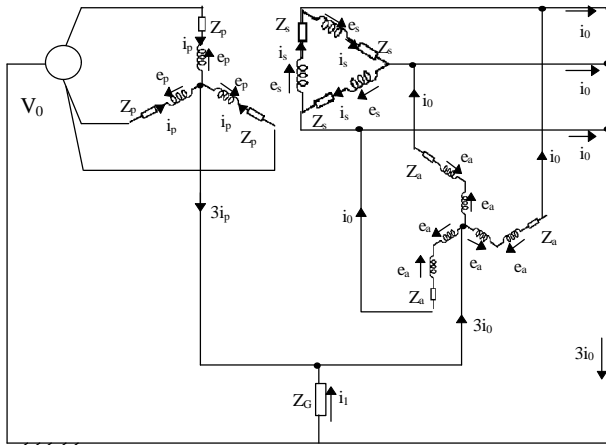
Figura 2 - Conjunto TF+RA

## 2.0 - DETERMINAÇÃO DA IMPEDÂNCIA EQUIVALENTE DE SEQUÊNCIA ZERO<sup>(1)</sup>

Utilizando as técnicas adotadas para obtenção das impedâncias de seqüência zero de transformadores, tem-se os seguintes ensaios para o conjunto apresentado na Figura 2:

### 2.1- Ensaio pelo lado 34,5 kV

#### 2.1.1- Cálculo da impedância de seqüência zero equivalente

Figura 3 - Diagrama para cálculo de  $Z_{0eq}$  vista pelo lado de 34,5 kV.

Pela Figura 3, tem-se:

$$V_0 = Z_p i_p + e_p - Z_G i_1 \quad (1)$$

$$e_s = Z_s i_s \quad (2)$$

$$\frac{e_p}{e_s} = \frac{1}{n} = \frac{i_s}{i_p} \quad (3)$$

$$3i_p + i_1 = 3i_0 \quad (4)$$

$$Z_G i_1 + e_a - e_a + Z_a i_0 = 0 \quad (5)$$

Resolvendo o sistema de equações (1..5), obtém-se a impedância de seqüência zero equivalente do conjunto mostrado na Figura 2:

$$Z_0 = \frac{V_0}{i_p} = Z_p + \frac{Z_s}{n^2} + \frac{3Z_G Z_a}{3Z_G + Z_a} \quad (2.1)$$

#### 2.1.2- Comparação com o ATP/EMTP

Dados para a expressão (2.1):

-Relação de transformação "n"

$$\frac{e_p}{e_s} = \frac{1}{n} \therefore \frac{34,5}{\sqrt{3} \cdot 13,8} = \frac{1}{n} \therefore n = \frac{\sqrt{3}}{2,5}$$

- Impedância do transformador 34,5/13,8 kV

$$Z_{ps} = j0,882 \text{ pu na base } 100 \text{ MVA}$$

$$Z_p = \frac{j0,882}{2} Z_b = j5,249 \Omega$$

$$Z_p = \frac{Z_s}{n^2} \therefore Z_s = j2,5195 \Omega$$

-Impedância do transformador de aterramento

$$Z_a = j17,84 \text{ pu na base } 100 \text{ MVA}$$

$$Z_a = j17,84 Z_b = j33,974 \Omega$$

- Resistência equivalente do solo da SE, obtida da referência (3).

$$Z_G = 15 \Omega$$

Substituindo em 2.1, tem-se:

$$Z_0 = 36,052 \angle 63,05^\circ \Omega$$

Pela simulação pelo ATP/EMTP (vide Figura 4), obteve-se:

$$\frac{V}{I_p} = \frac{19918,5}{552,5} = 36,052 \angle 63,05^\circ \Omega$$

Concluiu-se que a expressão para a impedância de seqüência zero (2.1) da configuração mostrada na Figura 2, obtida no ensaio pelo lado de 34,5 kV, é válida.

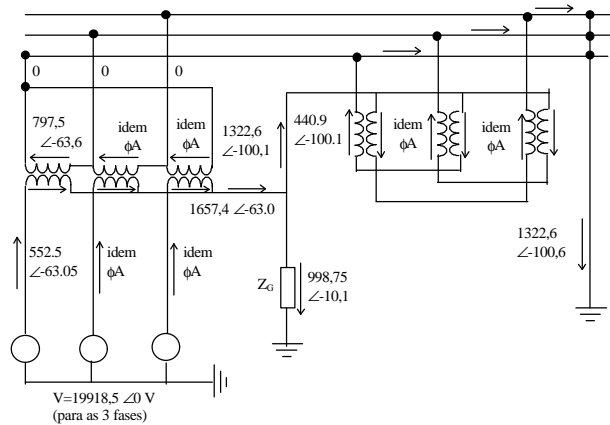
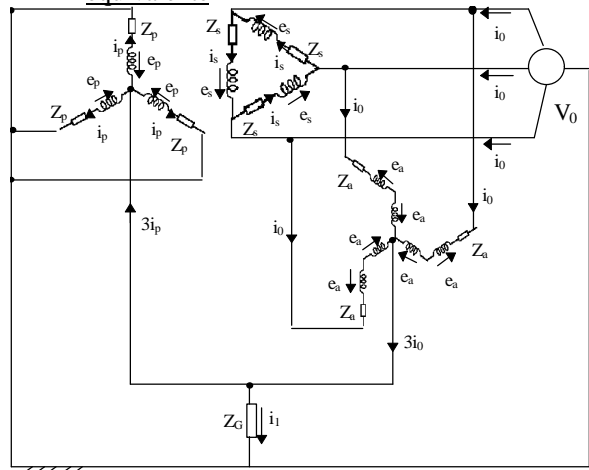


Figura 4 - Simulação pelo ATP/EMTP do ensaio de seqüência zero pelo lado 34,5 kV

### 2.2- Ensaio pelo lado 13,8 kV

#### 2.2.1- Cálculo da impedância de seqüência zero equivalente

Figura 5 - Diagrama para cálculo de  $Z_{0eq}$  vista pelo lado 13,8 kV

Pela Figura 5 tem-se:

$$V_0 = Z_a i_0 + i_1 Z_G \quad (1)$$

$$e_p + Z_p i_p - Z_G i_1 = 0 \quad (2)$$

$$\frac{e_p}{e_s} = \frac{1}{n} = \frac{i_s}{i_p} \quad (3)$$

$$3 i_p + i_1 = 3 i_0 \quad (4)$$

$$e_s = Z_s i_s \quad (5)$$

Resolvendo o sistema de equações (1..5), obtém-se a impedância de seqüência zero do conjunto mostrado na Figura 5:

$$\frac{V_0}{i_0} = Z_0 = Z_a + \frac{3 Z_a \left( \frac{Z_s}{n^2} + Z_p \right)}{\left( \frac{Z_s}{n^2} + Z_p \right) + 3 Z_G} \quad (2.2)$$

### 2.2.2- Comparação com o ATP/EMTP

Utilizando os dados do item 2.1.2 e aplicando na expressão (2.2), tem-se:

$$Z_0 = 43,99 \angle 86,97^\circ \Omega$$

Pela simulação pelo ATP/EMTP (vide Figura 6) obteve-se:

$$\frac{V}{I_s} = \frac{7967,4}{181,1 \angle -86,97^\circ} = 43,99 \angle 86,97^\circ \Omega$$

Conclui-se que a expressão 2.2, obtida no ensaio pelo lado 13,8 kV é também válida.

### 2.3- Falta fase-terra no lado 13,8 kV da configuração mostrada na Figura 1, ou seja, falta (F) da Figura 7.

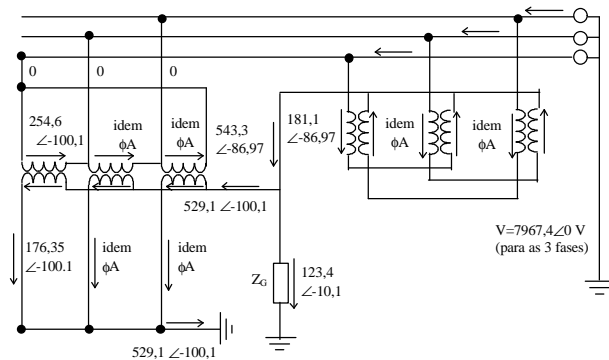


Figura 6 - Simulação pelo ATP/EMTP do ensaio de seqüência zero pelo lado 13,8 kV

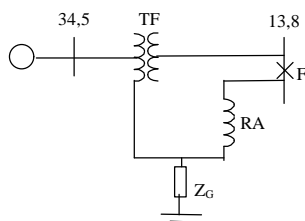


Figura 7- Diagrama unifilar do sistema TF+RA

Pelo item 2.2.2, temos a impedância de seqüência zero calculada, ou seja:

$$Z_0 = 43,99 \angle 86,97^\circ \Omega$$

Passando para pu na base 100 MVA, tem-se:

$$Z_0 = 23,099 \angle 86,97^\circ pu$$

As impedâncias de seqüência positiva e negativa do transformador 34,5/13,8 kV são:

$$Z_1 = Z_2 = j0,882 pu$$

A corrente de falta fase-terra no lado 13,8 kV será:

$$3 I_0 = \frac{3}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

$$3 I_0 = 0,12068 \angle -87,2^\circ pu$$

ou

$$3 I_0 = 504,9 A$$

Pela simulação pelo ATP/EMTP, mostrada na Figura 8 tem-se:

$$3 I_0 = 504,7 A$$

Nesta análise de falta fase-terra comprovou-se a validade das expressões equivalentes de seqüência zero para o conjunto TF + RA sobre solos de alta resistividade.

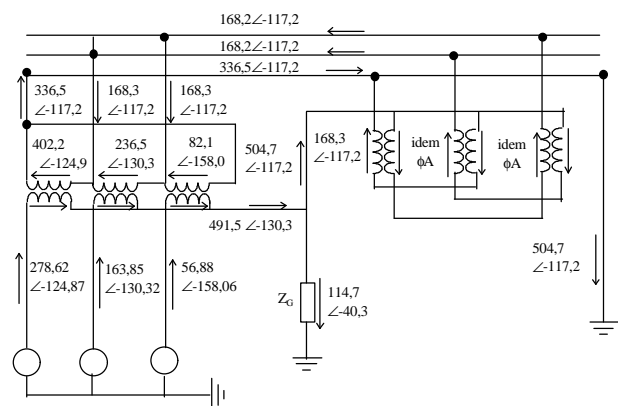


Figura 8- Simulação de falta fase-terra no 13,8 kV para o conjunto TF+RA.

### 3.0 - SIMULAÇÃO PELO ATP/EMTP DO SISTEMA DE SUBTRANSMISSÃO DA REGIÃO DE ALTO PARANÁ

Partindo da premissa de que tanto o modelo matemático obtido para a impedância de seqüência zero da configuração apresentada, quanto a modelagem pelo ATP/EMTP estão corretos, passou-se então a modelagem pelo ATP/EMTP da região de subtransmissão de Alto Paraná, visando a reconstituição dos ensaios de falta fase-terra executados no local.

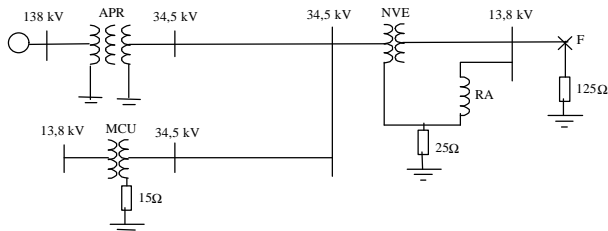


Figura 9- Diagrama unifilar da região de subtransmissão de APR  
O sistema mostrado na Figura 9, foi modelado pelo ATP/EMTP. A resistência equivalente da malha de terra e solo e a resistência de falta foram alteradas em relação aos valores da referência (3) com o objetivo de adequarem-se aos valores de falta e contribuição de corrente pelo neutro do religador da SE APR obtidos no ensaio real.

Todos os dados referentes ao sistema foram obtidos do diagrama de impedância do região de Alto Paraná. Os dados de correntes de falta, obtidos de ensaios reais, foram extraídos da referência (3). Foram simuladas várias situações de falta fase-terra visando basicamente reconstituir as correntes obtidas no ensaio real e, a partir daí, foram introduzidas alterações de configuração visando eliminar o problema da circulação elevada de corrente pelo neutro do religador da SE APR, que alimenta a SE NVE 34,5/13,8 kV, quando de uma falta fase-terra no seu lado de 13,8 kV.

#### 4.0 - ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES DE FALTA PELO ATP/EMTP

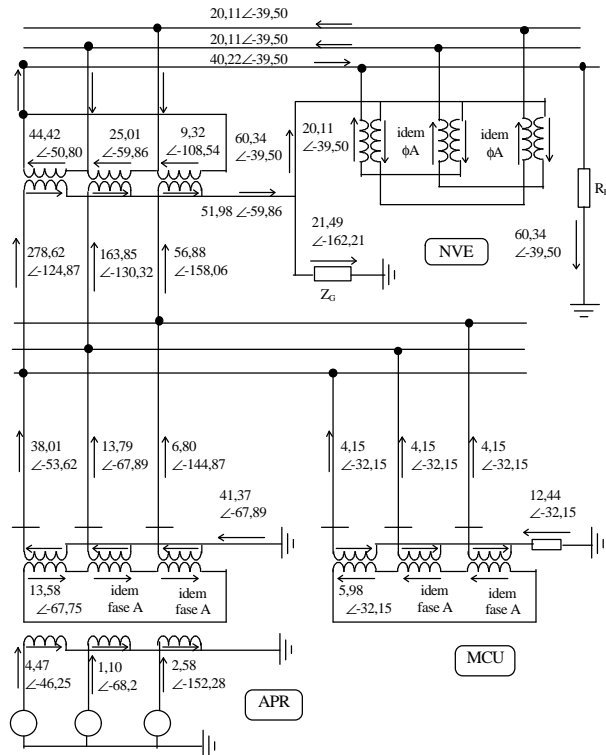


Figura 10- Falta fase-terra no 13,8 kV da SE NVE com a malha de terra da SE única

A simulação de falta fase-terra no lado de 13,8 kV da SE NVE, que proporcionou uma distribuição de corrente mais próxima da obtida pelo ensaio real, levou em consideração uma resistência de falta da ordem de 125  $\Omega$  e uma resistência concentrada da malha de terra e do solo de 25  $\Omega$  na SE NVE e 15  $\Omega$  na SE MCU. Esta simulação pode ser vista na Figura 10.

Nessas condições, a corrente de falta obtida na simulação pelo ATP/EMTP foi de 60,34 A e no ensaio real 60,26 A. A contribuição pelo neutro do religador do circuito NVE 34,5 kV na SE APR foi de 41,37 A na simulação e de 41,89 A no ensaio real.

Partindo da configuração ajustada (fig.4.1), foi feita uma alteração separando a malha de aterramento do neutro do transformador 34,5/13,8 kV, da malha do reator de aterramento, na SE NVE. Obteve-se dessa forma a eliminação da contribuição de corrente pelo neutro do religador do circuito NVE na SE APR, para uma falta fase-terra na saída do alimentador 13,8 kV da SE NVE. Esta situação pode ser vista na Figura 11. Neste caso foi considerada uma impedância infinita entre as duas malhas de terra.

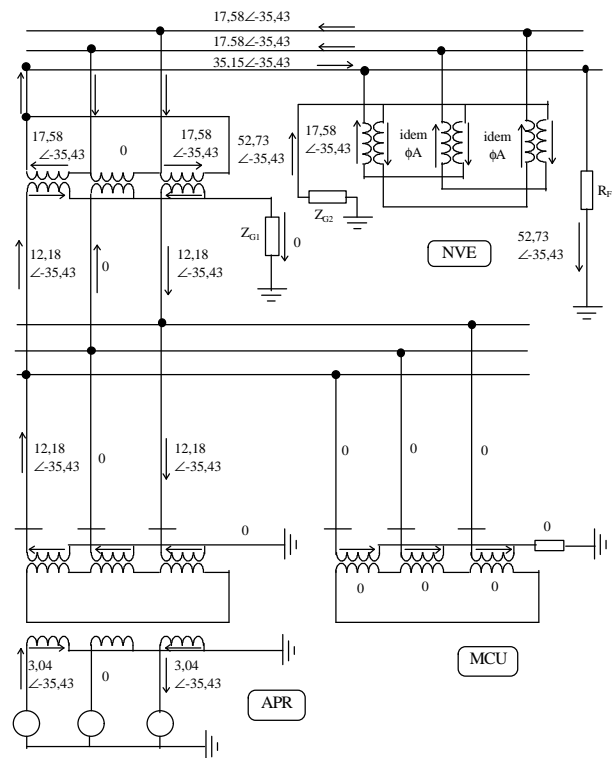


Figura 11- Falta fase-terra no 13,8 kV da SE NVE com malhas de terra independentes para o TF e para o RA

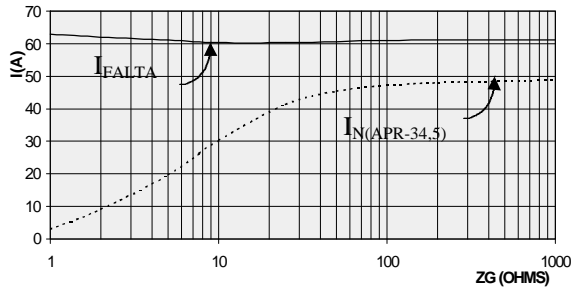


Figura 12- Corrente de falta e corrente no neutro do religador em função de  $Z_G$

A Figura 12 mostra a variação da corrente de falta no circuito 13,8 kV da SE NVE e da contribuição de corrente pelo neutro do religador do circuito NVE 34,5 kV na SE APR, em função da variação do valor da resistência equivalente do solo e malha de terra ( $Z_G$ ) da SE NVE. A configuração básica é aquela mostrada na Figura 10. Pela Figura 12 pode-se ver que a partir de 100  $\Omega$  de resistência equivalente do solo e malha de terra da SE NVE, a contribuição de corrente pelo neutro do religador da SE APR que alimenta a SE NVE, praticamente se estabiliza em torno de 49 A (linha pontilhada). E a corrente de falta praticamente não se altera (linha cheia).

A Tabela 1 referente à Figura 13 mostra as contribuições das correntes pelos vários componentes em função da variação da resistividade do solo, representada na forma de resistência concentrada ( $R_{SS}$ ) entre as malhas de terra do transformador de força (TF) e do reator de aterramento (RA), para uma falta fase-terra (F) no alimentador de 13,8 kV da SE NVE. Nota-se que esta resistência deverá ser maior do que 500  $\Omega$  para que a contribuição de corrente pelo neutro do religador do circuito NVE 34,5 kV da SE APR esteja situada dentro de uma faixa que não comprometa a proteção de terra. Por outro lado a Tabela 2 referente à Figura 13 mostra a variação da resistência equivalente concentrada da malha de terra do reator de aterramento e do solo ( $R_{S1}$ ) em função das contribuições de corrente pelos vários componentes para uma falta fase-terra (F) no alimentador de 13,8 kV da SE NVE. Neste caso fixou-se a resistência ( $R_{SS}$ ) entre as malhas do TF e RA em 500  $\Omega$ . Pode-se notar pela Tabela 2 que a resistência equivalente da malha de terra e solo ( $R_{S2}$ ), do RA deverá ser menor do que 50  $\Omega$  para que não comprometa a coordenação da proteção de terra do religador do circuito NVE 34,5 kV na SE APR, com as proteções de terra dos alimentadores de 13,8 kV das SE's 34,5 kV abastecidas por este circuito.

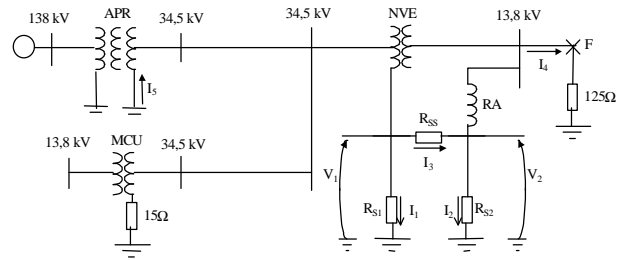


Figura 13- Grandezas monitoradas nas tabelas 4.1 e 4.2

Tabela 1- Falta fase-terra em (F) e  $R_{S1}=R_{S2}=25 \Omega$ .

$R_{SS}$ ( $\Omega$ )	$I_1$ (A)	$I_2$ (A)	$I_3$ (A)	$I_4$ (A)	$I_5$ (A)	$V_1$ (A)	$V_2$ (A)
1	20,3	21,8	37,2	58,8	13,9	508	544
25	12,1	34,2	22,2	56,4	8,3	303	855
50	8,5	39,7	15,6	55,3	5,8	213	992
100	5,4	44,5	9,8	54,3	3,7	134	1113
500	1,3	50,7	2,5	53,1	0,9	34	1267
1000	0,7	51,7	1,3	52,9	0,5	17	1292

Com as restrições apresentadas, ou seja, resistência equivalente concentrada da malha de aterramento do neutro do RA e do solo menor do que 50  $\Omega$  e resistência equivalente do solo entre as malhas de aterramento do TF e do RA maior do que 500  $\Omega$ , observou-se a presença de valores altos de tensão entre as duas malhas ( $> 2$  kV em regime permanente durante a falta).

Tabela 2- Falta fase-terra em (F) e  $R_{S1}=25 \Omega$  e  $R_{SS}=500 \Omega$ .

$R_{S2}$ ( $\Omega$ )	$I_1$ (A)	$I_2$ (A)	$I_3$ (A)	$I_4$ (A)	$I_5$ (A)	$V_1$ (A)	$V_2$ (A)
25	1,3	50,7	2,5	53,1	0,9	34	1267
50	2,2	42,3	4,1	46,4	1,5	56	2116
100	3,4	31,8	6,2	38,0	2,3	85	3181
500	5,6	10,6	10,4	21,0	3,9	141	5325
1000	6,2	5,8	11,3	17,1	4,2	155	5814

## 5.0 - ENSAIO E SIMULAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO MODIFICADA<sup>(2)</sup>

Após a implantação da solução, ou seja, da construção da malha de terra independente para o Reator de Aterramento (RA), novos ensaios de campo foram feitos e novamente simulados pelo ATP/EMTP. A falta fase-terra foi aplicada a 8,6 km da SE Nova Esperança e os resultados obtidos no ensaio real de campo e na simulação pelo ATP/EMTP podem ser vistos nas Figuras 14 e 15 para as configurações normal e para a configuração com a malha de terra independente para o RA, respectivamente. Os valores entre parênteses se referem à simulação pelo ATP/EMTP e sem os parênteses são os medidos no ensaio de campo.

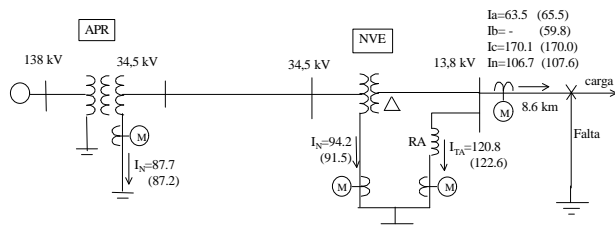


Figura 14 - Falta fase-terra na configuração normal

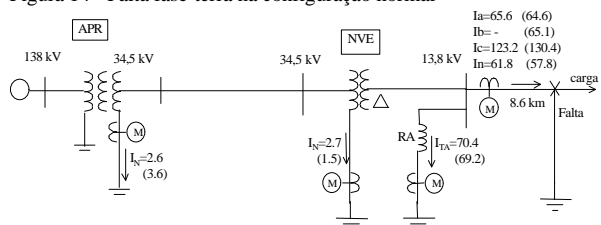


Figura 15 - Falta fase-terra na configuração com a malha de terra independente para o RA

Na configuração normal (Figura 14), para uma falta à terra no lado 13,8 kV da SE NVE havia uma circulação de corrente da ordem de 87,7 A medido (87,2 A simulado) no neutro da linha de 34,5 kV entre APR e NVE e após a modificação (Figura 15), isto é, construindo uma malha de terra independente para o RA da SE NVE, esta corrente caiu para 2,6 A medido (3,6 A simulado) para esta mesma falta. Esta corrente residual é a mesma do regime permanente antes da falta, isto é, a falta no 13,8 kV da SE NVE não interfere no valor da corrente no neutro da linha APR-NVE 34,5 kV, como já se esperava.

A resistência medida da malha de terra independente do RA foi da ordem de 45  $\Omega$ . Pela Tabela 2 pode-se ver que quanto menor a resistência desta malha de terra independente melhor para sensibilização da proteção do alimentador sob falta, porém, o custo desta malha associado à área física disponível para se conseguir valores menores é proibitivo para o porte da SE. Desta forma uma melhoria conseguida e de baixo custo foi a instalação de dois eletrodos especiais - tipo BQ2400, que proporcionou uma resistência da malha de terra independente de 16  $\Omega$ , após ensaio realizado no local<sup>(4)</sup>. Estes eletrodos baro-químicos são de 2" de diâmetro por 2,40 metros de comprimento e no seu interior está repleto de sais minerais, que são gradativamente drenados através do solo ao redor, por meio da existência de alguns furos em toda a sua extensão. Cada eletrodo foi instalado em um poço com diâmetro de 30 cm, cheio de gel ao seu redor para melhor condicionamento do solo, e interligados na malha de terra através de solda oxiacetilênica. Segundo o fabricante, estes eletrodos são tão eficientes que apenas um pode substituir até 10 hastes convencionais, sendo portanto, este um fator muito importante quando se tem restrições de espaço. Após aguardar um período para o completo condicionamento do volume de influência do eletrodo instalado, foi novamente realizada a medição da resistência da malha de terra, confirmando-se o resultado.

As tensões não foram monitoradas durante os ensaios, mas as simulações indicaram que não há violações da tensão de forma permanente, apenas aquelas sobretensões normais que aparecem durante as faltas mas que são prontamente removidas com a eliminação da falta pelos equipamentos de proteção.

## 6.0 - CONCLUSÕES

- A expressão obtida para a impedância de seqüência zero para o conjunto TF (estrela/delta) e RA (zig-zag), com os respectivos neutros interligados solidamente e por sua vez aterrados com uma alta impedância da ordem de 50  $\Omega$ , mostrou-se adequada e passível de ser utilizada nos estudos de curto-circuito.
- Para reduzir drasticamente a contribuição de corrente pelo neutro da linha de 34,5 kV entre APR e NVE que alimenta a SE NVE 34,5/13,8 kV, para uma falta fase-terra no 13,8 kV desta última, deve-se isolar a malha de aterramento do TF da malha de aterramento do RA. A resistência equivalente da malha de terra do RA será mais eficaz quanto menor for o seu valor, porém uma solução de compromisso entre o valor desta resistência e o seu custo em relação ao porte da SE deve ser considerada.

## 7.0 - REFERÊNCIA

- (1) - M. F. Ushikubo, "Circulação de corrente no neutro de Religadores 34,5 kV para faltas à terra no lado 13,8 kV de SE's 34,5/13,8 kV", Estudo CNPS n° 02/96, Copel.
- (2) - M. F. Ushikubo, "Análise das tensões impostas aos equipamentos da SE NVE com os neutros dos Transformadores de Força conectados numa malha de terra auxiliar", Estudo CNPS n° 08/97, Copel.
- (3) - Bourges, Fernando; "Circulação de Corrente no Neutro de Religadores em LTs 34,5 kV que Alimentam SEs 34,5/13,8 kV", manuscrito.
- (4) - Ribas, Rosane Maris, "Melhoria da malha de terra auxiliar para o aterramento do neutro do RA", Relatório Copel/VGMS n° 35/97.