

# Desenvolvimento de Sistema para Localização de Faltas em Linhas de Transmissão com Subestações Conectadas em Derivação

Eduardo C. Senger, Giovanni Manassero Jr., Renato M. Nakagomi e Emílio C. N. Rodrigues

**Resumo**— Este artigo apresenta o desenvolvimento e os resultados de simulações de um sistema para localização de faltas em linhas de transmissão com subestações conectadas em derivação. Este sistema de localização de faltas é capaz de identificar corretamente o ponto de ocorrência do defeito baseado em registros dos sinais de tensões e correntes efetuados nos terminais da linha de transmissão monitorada, por equipamentos digitais, tais como oscilógrafos e/ou relés de proteção, etc. Os resultados apresentados neste artigo indicam que o método é bastante preciso.

**Palavras-chave**—Localização de faltas, linhas de transmissão, multi-terminais.

## I. INTRODUÇÃO

O sistema elétrico brasileiro caracteriza-se pelo domínio da geração hidroelétrica. Desta forma, os centros de consumo nem sempre se encontram próximos aos centros de geração e, portanto, é necessário utilizar longas linhas de transmissão para interligar ambos. Defeitos nestas linhas podem resultar em riscos à integridade do sistema elétrico de potência e à sua confiabilidade.

As linhas de transmissão, responsáveis pela interligação dos centros de geração aos centros de consumo, podem ser classificadas de acordo com o nível de tensão em que operam. Normalmente, em linhas de transmissão de alta e extra-alta tensão não há derivações, entretanto, em linhas de subtransmissão, é bastante comum a presença de subestações conectadas em derivação.

Quando ocorre um defeito permanente em uma dessas linhas, o trabalho das equipes de emergência para localizar o ponto de falta é habitualmente mais demorado, uma vez que não se sabe exatamente qual o trecho onde o defeito ocorreu. Isto implica no aumento dos custos de manutenção das linhas de transmissão e na redução da confiabilidade do sistema.

A desregulamentação do setor elétrico e sua conseqüente desverticalização contribuíram para o aumento da complexidade do problema. As subestações conectadas em derivação não são de propriedade das concessionárias de transmissão e, por razões comerciais, as informações disponíveis nos terminais dessas subestações, que permitiriam melhorar o processo de localização das faltas, nem sempre são compartilhadas com a empresa responsável pelo sistema de transmissão.

### A. Sistema de transmissão com subestações conectadas em derivação

A figura 1 ilustra a configuração típica das redes de transmissão consideradas neste trabalho. Esta rede é constituída por uma linha de transmissão, denominada *tronco*, que interliga duas subestações de propriedade da concessionária de transmissão ( $T_1$  e  $T_2$ ). Ao longo do *tronco* há pontos de derivação de onde partem linhas de transmissão, que alimentam subestações de propriedade de consumidores primários ou de concessionárias de distribuição de energia elétrica (terminais  $T_{S1}$  a  $T_{Sn}$ ).

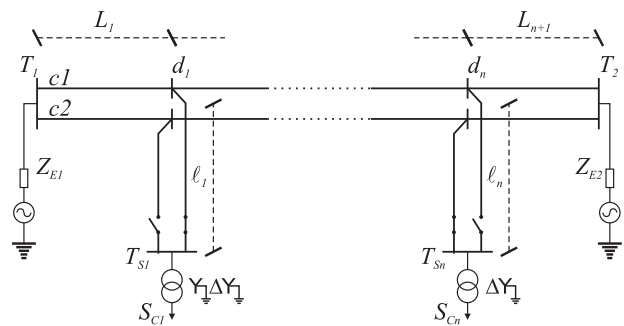


Figura 1. Sistema de subtransmissão com subestações conectadas em derivação

O *tronco* pode ser constituído por uma única linha de circuito simples; uma linha de circuito duplo (dois circuitos na mesma torre); duas linhas de circuito simples instaladas na mesma faixa de passagem; ou duas linhas de circuito simples instaladas em faixas de passagem distintas. No caso de *troncos* de circuito duplo, as linhas que partem dos pontos de derivação em direção às subestações dos consumidores, também são de circuito duplo, entretanto, essas subestações estão conectadas a apenas um dos circuitos da rede através

E. C. Senger é professor do Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (e-mail: senger@pea.usp.br)

G. Manassero Jr. é aluno de pós-graduação, nível doutorado, do Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (e-mail: giomanjr@pea.usp.br)

R. M. Nakagomi é aluno de pós-graduação, nível mestrado, do Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (e-mail: rmikio@pea.usp.br)

E. C. N. Rodrigues trabalha na empresa CTEEP (e-mail: ecrodri-gues@ctEEP.com.br)

de uma chave seccionadora, o outro circuito permanece em 'stand by'.

Apesar de existir um circuito preferencial que alimenta cada subestação, essa situação pode ser alterada para atender a alguma necessidade específica. Por exemplo, logo após uma falta em um dos circuitos, as subestações conectadas ao circuito faltoso são conectadas ao circuito que não está em falta, o que altera o arranjo preferencial das chaves. O retorno a esse arranjo preferencial não é feito imediatamente após o reparo da rede. Esta situação implica que o engenheiro responsável pela localização da falta pode não dispor de informações seguras sobre o circuito que efetivamente estava conectado a cada subestação.

Nos terminais das subestações de propriedade da concessionária de transmissão, há equipamentos responsáveis pelo registro dos sinais de tensões e correntes. Esses registros podem estar sincronizados temporalmente via GPS - Global Positioning System, ou não. Nas subestações conectadas em derivação, normalmente não há registros dos sinais de tensões e correntes, entretanto, caso esses registros estejam disponíveis, podem estar sincronizados via GPS ou não.

Desta forma, o sistema para localização de faltas proposto neste trabalho deve ser capaz de identificar corretamente o ponto de ocorrência do defeito, utilizando apenas os registros dos sinais de tensões e correntes nos terminais de propriedade da concessionária de transmissão. Caso existam registros nos terminais das subestações conectadas em derivação, eles devem ser utilizados de forma a aumentar a precisão dos resultados.

A inexistência de registros de oscilografia em uma ou mais subestações implica que a carga existente nessas subestações não é conhecida. Portanto, o sistema para localização de faltas deve dispor de um método capaz de estimar o seu valor. Para tanto, adota-se a hipótese de que a carga não contribui com a corrente de falta, isto é, não existe geração distribuída significativa, em paralelo com essas cargas. Caso haja unidades de geração nas subestações conectadas em derivação, o sistema para localização de faltas deve dispor dos registros de tensões e correntes nessas subestações.

É importante salientar, no entanto, que nos transformadores dessas subestações pode-se empregar a ligação estrela-aterrada/delta/estrela-aterrada. Isto implica que uma parcela significativa da corrente de falta, para defeitos que envolvem a terra, pode retornar através do enrolamento primário destes transformadores. Este cenário torna o problema de localização da falta bastante complexo, já que uma parcela considerável da corrente de curto-circuito pode ser injetada por este tipo de transformador.

No caso das subestações em que os registros de tensões e correntes não estão disponíveis, o valor desta corrente não é um dado de entrada para o sistema de localização. Desta forma, o modelo matemático utilizado na representação da rede de transmissão deve considerar, implicitamente, o possível retorno de parte da corrente de falta.

Além das premissas discutidas, para uma localização precisa do ponto de falta é necessário considerar a assimetria existente entre as fases da linha de transmissão. Portanto, o modelo matemático que representa esta linha, deve se basear nas componentes de fase, ao invés das componentes simétricas. Para linhas longas deve-se considerar o efeito das capacitâncias e eventuais pontos de transposição.

## B. Algoritmos para localização de faltas

Para a localização de faltas em linhas de transmissão com apenas uma derivação, há algoritmos bem consolidados. Entretanto, para linhas de transmissão com mais de uma derivação (linhas com  $n$  terminais), há poucas publicações. Além disso, é importante ressaltar que não existe nenhum método proposto na literatura, que atende a todos os requisitos definidos no item A deste capítulo.

Os algoritmos para localização de faltas em linhas com  $n$  terminais, podem ser divididos em dois grupos principais: algoritmos para localização de faltas em linhas de transmissão com circuito simples [1], e algoritmos para localização em linhas de transmissão com circuito duplo [2] e [3]. De um modo geral, estes algoritmos utilizam medições sincronizadas de tensões e correntes em todos os terminais da linha (terminais da concessionária de distribuição e das subestações conectadas em derivação) e o modelo de linha curta para a linha de transmissão. Sendo assim, podem apresentar erros no processo de localização quando aplicados a linhas de transmissão longas ou não transpostas.

No capítulo a seguir é apresentada, em detalhes, a metodologia desenvolvida para localização de faltas em linhas de transmissão com subestações conectadas em derivação.

## II. METODOLOGIA PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

Este item apresenta os algoritmos que integram a metodologia desenvolvida para localização de faltas em linhas de transmissão com subestações conectadas em derivação. Esses algoritmos baseiam-se nas componentes de fase dos fasores de tensões e correntes, calculados a partir dos registros de oscilografia efetuados nos terminais da linha de transmissão monitorada.

Os fasores utilizados pelos algoritmos devem estar sincronizados e a sincronização pode ser obtida de duas formas: a) sincronização de tempo através do sistema GPS - *Global Positioning System*; b) sincronização através de métodos algébricos (a sincronização é efetuada a partir dos fasores dos sinais de pré-falta das tensões e correntes obtidos através dos registros efetuados pelos oscilógrafos digitais instalados nos terminais da linha de transmissão). O algoritmo de sincronização proposto neste trabalho está apresentado no item C.

### A. Descrição dos modelos utilizados

Os algoritmos apresentados neste trabalho são baseados em modelos matemáticos bastante precisos para os componentes que constituem a rede elétrica. Nos itens 1, 2 e 3 a seguir, são apresentados os modelos utilizados para a representação das linhas de transmissão, os diversos tipos de curto-circuito e os transformadores e cargas das subestações conectadas em derivação, respectivamente.

#### 1) Modelo das linhas de transmissão

De forma a incluir o efeito das assimetrias entre as fases, decorrente da não transposição das linhas, e o efeito das capacitâncias, foi utilizado o modelo  $\pi$ -corrigido, em componentes de fase, da linha de transmissão [4].

Segundo [4], as tensões e correntes no terminal local de uma linha de transmissão de comprimento  $x$  podem ser obtidas a partir das tensões e correntes no seu terminal remoto, e da matriz de quadripolos de transmissão, em componentes de fase, conforme a equação (1). Os parâmetros de transmis-

são apresentados em (1) podem ser obtidos através das equações (2) a (5).

$$\begin{bmatrix} V_{abc}^L \\ I_{abc}^L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [A(x)] & [B(x)] \\ [C(x)] & [D(x)] \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_{abc}^R \\ I_{abc}^R \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$[A(x)] = [Y_{abc}]^{-1} \cdot [M] \cdot \left\{ \cosh(\gamma_j \cdot x) \right\} \cdot [M]^{-1} \cdot [Y_{abc}] \quad (2)$$

$$[B(x)] = [Y_{abc}]^{-1} \cdot [M] \cdot \left\{ \gamma_j \cdot \sinh(\gamma_j \cdot x) \right\} \cdot [M]^{-1} \quad (3)$$

$$[C(x)] = x \cdot [M] \cdot \left\{ \frac{\sinh(\gamma_j \cdot x)}{(\gamma_j \cdot x)} \right\} \cdot [M]^{-1} \cdot [Y_{abc}] \quad (4)$$

$$[D(x)] = [M] \cdot \left\{ \cosh(\gamma_j \cdot x) \right\} \cdot [M]^{-1} \quad (5)$$

Onde:

$[M]$ : matriz de auto-vetores da matriz  $[P]$

$\gamma_j^2$ : auto-valores da matriz  $[P]$

$$[P] = \begin{bmatrix} y_{aa} & y_{ab} & y_{ac} \\ y_{ba} & y_{bb} & y_{bc} \\ y_{ca} & y_{cb} & y_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{aa} & p_{ab} & p_{ac} \\ p_{ba} & p_{bb} & p_{bc} \\ p_{ca} & p_{cb} & p_{cc} \end{bmatrix}$$

$\{ [Matriz] \}$ : notação para matriz diagonal

Para linhas de transmissão de circuito duplo, o desenvolvimento é similar, uma vez que as matrizes de impedância e admitância devem ser calculadas observando-se o acoplamento entre os circuitos. Isto é, para uma linha de transmissão de circuito simples, as matrizes de impedância e admitância devem possuir tamanho 3x3 e, para uma linha de circuito duplo, ambas as matrizes devem ter tamanho 6x6.

### 2) Modelo dos curtos-circuitos

Este item apresenta os modelos utilizados para os diversos tipos de curtos-circuitos, em termos de matrizes de admitâncias que relacionam tensões e correntes no ponto de falta. Essas matrizes dependem do tipo de curto-circuito e das fases envolvidas. A figura 2 e as equações (6) e (7) ilustram os modelos utilizados para os curtos-circuitos fase-terra (AN) e dupla-fase (BC), respectivamente.

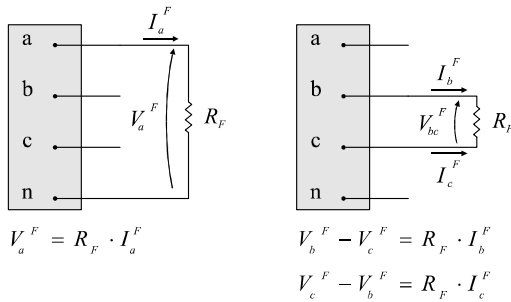


Figura 2. Modelo dos curtos-circuitos – AN e BC

$$[Y_{FALTA}] = \begin{bmatrix} Y_F & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$[Y_{FALTA}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_F & -Y_F \\ 0 & -Y_F & Y_F \end{bmatrix} \quad (7)$$

Para a obtenção das matrizes de admitância para o restante dos tipos de curtos-circuitos, basta seguir o procedimento apresentado.

### 3) Modelo dos transformadores e cargas

Este item apresenta o desenvolvimento dos modelos dos transformadores e cargas das subestações conectadas em derivação, em termos das suas matrizes de admitâncias, em componentes de fase.

Para determinar a matriz de admitâncias resultante da associação entre a matriz de admitâncias de carga e a matriz de admitâncias do transformador que alimenta essa carga, foram adotadas as seguintes hipóteses:

- A carga alimentada pelo transformador conectado ao terminal remoto da linha não contribui com a corrente de curto-circuito, isto é, não há unidades de geração conectadas a esse transformador;
- A carga pode ser representada por impedâncias constantes, conectadas em delta.

Esta matriz depende tanto da carga quanto do tipo de ligação do transformador que alimenta essa carga, portanto, é necessário desenvolver os modelos de cada tipo de transformador, em componentes de fase. Para tanto, utiliza-se a matriz equivalente de admitâncias em componentes simétricas do conjunto carga e transformador, “vista” pelo enrolamento primário. Esta matriz pode ser obtida através das relações entre tensões e correntes em componentes simétricas, de acordo com a equação (8) a seguir:

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = [Y_{012}^C] \times \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Onde:

$$[Y_{012}^C] = \begin{bmatrix} Y_0^C & 0 & 0 \\ 0 & Y_1^C & 0 \\ 0 & 0 & Y_2^C \end{bmatrix} : \text{Matriz de admitâncias do conjunto carga e transformador, em componentes simétricas.}$$

A matriz de admitâncias equivalente, em componentes de fase, pode ser obtida através da antitransformada da matriz de admitâncias equivalentes em componentes simétricas, conforme a equação (9).

$$[Y_C] = [T] \times [Y_{012}^C] \times [T]^{-1} \quad (9)$$

Onde:

$[T]$ : Matriz de transformação de componentes simétricas

Desenvolvendo a equação (9) obtém-se a equação (10):

$$[Y_C] = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} Y_0^C + 2 \cdot Y_1^C & Y_0^C - Y_1^C & Y_0^C - Y_1^C \\ Y_0^C - Y_1^C & Y_0^C + 2 \cdot Y_1^C & Y_0^C - Y_1^C \\ Y_0^C - Y_1^C & Y_0^C - Y_1^C & Y_0^C + 2 \cdot Y_1^C \end{bmatrix} \quad (10)$$

Onde:

$$Y_1^C = Y_2^C$$

Na figura 3 são apresentadas as admitâncias de seqüência positiva, negativa e zero que compõem a matriz de admitân-

cias equivalentes, em componentes simétricas, para transformadores de três enrolamentos do tipo estrela-aterrada/delta/estrela-aterrada. A montagem das matrizes equivalentes, em componentes de fase, para outros tipos de transformadores é feita adotando-se o procedimento apresentado neste item.

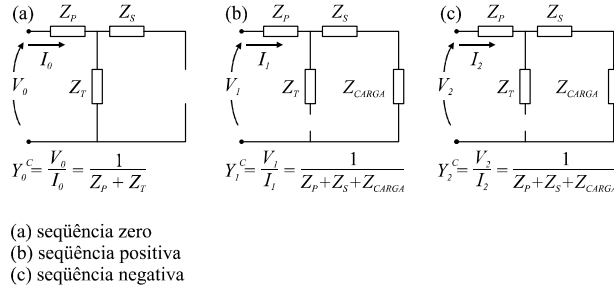


Figura 3. Modelo do transformador estrela-aterrada/delta/estrela-aterrada

Nos itens a seguir são apresentados os algoritmos para localização de faltas e para sincronização entre os fasores calculados nos terminais da linha de transmissão.

### B. Metodologia para localização de faltas

De modo geral, a metodologia para localização de faltas apresentada neste trabalho consiste na investigação de todos os trechos da linha de transmissão, de forma a determinar o possível ponto de ocorrência da falta. Para descrever a metodologia desenvolvida, considere a figura 4.

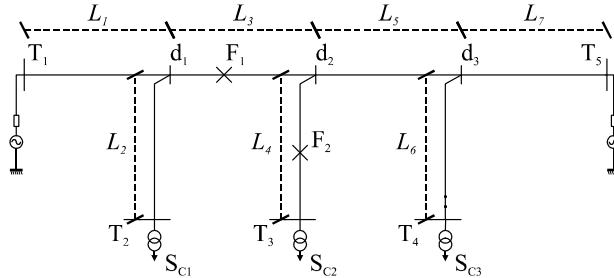


Figura 4. Linha de transmissão com cinco terminais

Nesta figura está ilustrada uma linha de transmissão de cinco terminais ( $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_4$  e  $T_5$ ), sendo três deles os terminais das subestações conectadas em derivação ( $T_2$ ,  $T_3$  e  $T_4$ ). Admite-se que há medições de tensões e correntes apenas nos terminais  $T_1$  e  $T_5$ .

Para esta linha de transmissão, a metodologia de localização de faltas consiste na investigação de todos os trechos compreendidos entre os terminais  $T_1$  e  $T_5$  ( $T_1$ - $d_1$ ,  $d_1$ - $d_2$ ,  $d_2$ - $d_3$  e  $d_3$ - $T_5$ ) e na investigação da derivação que possui a maior probabilidade de conter o ponto de falta. Desta forma, a metodologia consiste inicialmente, na redução da linha de transmissão de cinco terminais, a uma linha equivalente cujos dois terminais são os terminais do trecho que se encontra sob investigação. Em seguida é aplicado o algoritmo mais conveniente, dentre os dois algoritmos desenvolvidos, para a localização de faltas na linha de transmissão resultante desse processo de redução.

O primeiro algoritmo de localização é empregado em trechos que pertencem ao tronco da linha de transmissão (trechos compreendidos entre os terminais  $T_1$  e  $T_5$ ) e no trecho de derivação candidato, caso existam registros de oscilografia no terminal da subestação alimentada pelo respectivo

trecho. Este algoritmo utiliza, como dados de entrada, os fasores de tensões e correntes nos dois terminais de cada trecho investigado e os parâmetros elétricos do trecho de linha compreendido entre os seus terminais.

O segundo algoritmo é empregado no trecho de derivação candidato, caso não existam registros de oscilografia no terminal da subestação alimentada pelo respectivo trecho. Este algoritmo utiliza como dados de entrada os fasores de tensões e correntes apenas no ponto de derivação, a matriz de admitâncias equivalentes do conjunto carga e transformador e os parâmetros elétricos do trecho de linha compreendido entre a derivação e o terminal da respectiva subestação.

Desta forma, para que seja possível utilizar ambos os algoritmos, é necessário reduzir a linha de transmissão original para uma “linha equivalente” com apenas dois terminais.

#### 1) Algoritmo para redução da linha de transmissão

A redução da linha de transmissão original para uma linha de transmissão equivalente com apenas dois terminais consiste no cálculo dos fasores de tensões e correntes nos pontos de derivação, a partir dos fasores de tensões e correntes nos terminais onde há medições. Para cada trecho da linha de transmissão calcula-se a queda de tensão e a corrente que alimenta a carga da subestação conectada em derivação. Esse cálculo é feito utilizando o quadripolo de parâmetros de transmissão definido no item II-A-1.

Para descrever o método, considere a linha de transmissão ilustrada na figura 4. Esta linha possui cinco terminais ( $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_4$  e  $T_5$ ), sendo que três deles não possuem medições de tensões e correntes (terminais das subestações conectadas em derivação –  $T_2$  a  $T_4$ ).

##### a) Redução da linha – terminais $d_1$ e $d_2$

Para investigar o trecho compreendido entre os pontos de derivação  $d_1$  e  $d_2$  deve-se inicialmente reduzir a linha de transmissão a uma linha equivalente com apenas esses dois terminais. Este processo consiste na eliminação sucessiva de todos os terminais até restarem apenas dois “novos terminais” (os pontos de derivação  $d_1$  e  $d_2$ ).

Conforme ilustrado na figura 5, o “novo terminal”  $d_1$  resulta da eliminação dos terminais  $T_1$  e  $T_2$ . Para que seja possível eliminar esses dois terminais, deve-se calcular as tensões e correntes no ponto de derivação.

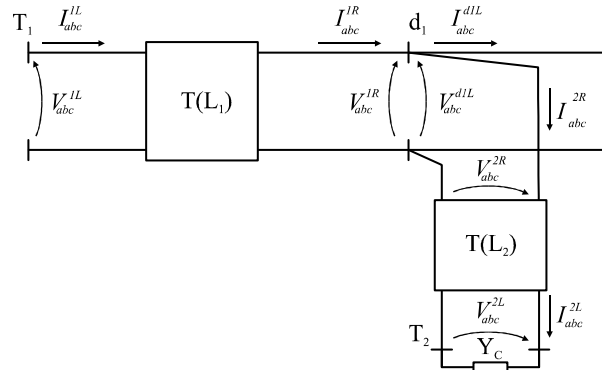


Figura 5. Linha de transmissão – Redução dos terminais  $T_1$  e  $T_2$ .

As tensões em  $d_1$  podem ser obtidas através do sistema de equações apresentado abaixo:

$$\begin{bmatrix} V_{abc}^{1L} \\ I_{abc}^{1L} \end{bmatrix} = [T(L_1)] \cdot \begin{bmatrix} V_{abc}^{1R} \\ I_{abc}^{1R} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Onde:

$$[T(L_1)] = \begin{bmatrix} [A_1] & [B_1] \\ [C_1] & [D_1] \end{bmatrix} : \text{Parâmetros de transmissão de } T(L_1).$$

Portanto:

$$\begin{bmatrix} V_{abc}^{1R} \\ I_{abc}^{1R} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{abc}^{d1L} \\ I_{abc}^{d1L} \end{bmatrix} = [A_1] \cdot \begin{bmatrix} V_{abc}^{1L} \\ I_{abc}^{1L} \end{bmatrix} - [B_1] \cdot \begin{bmatrix} I_{abc}^{1L} \\ V_{abc}^{1L} \end{bmatrix} \quad (12)$$

As correntes no ponto de derivação  $d_1$  podem ser obtidas a partir do cálculo das correntes no terminal remoto do quadripolo  $T(L_1)$  e do cálculo das correntes no terminal remoto do quadripolo  $T(L_2)$ , conforme a equação (13).

$$\begin{bmatrix} I_{abc}^{d1L} \\ I_{abc}^{d1R} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{abc}^{1R} \\ I_{abc}^{2R} \end{bmatrix} \quad (13)$$

E:

$$\begin{bmatrix} I_{abc}^{2R} \\ I_{abc}^{1R} \end{bmatrix} = [Y_{eq}] \cdot \begin{bmatrix} V_{abc}^{2R} \\ V_{abc}^{1R} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Onde:

$[Y_{eq}]$ : Matriz de admitâncias equivalente para a associação entre a matriz  $[Y_C]$  e a matriz de admitâncias da linha de transmissão (ver anexo A).

Este procedimento permite “eliminar” os terminais linha de transmissão, até restar apenas o trecho sob investigação.

#### b) Redução da linha – terminais $d_2$ e $T_3$

Para investigar o trecho compreendido entre o ponto de derivação  $d_2$  e o terminal  $T_3$  deve-se reduzir a linha de transmissão a uma linha equivalente com apenas esses dois terminais. O processo de redução consiste na eliminação sucessiva dos terminais até restar apenas três terminais – os pontos de derivação  $d_1$  e  $d_3$  e o terminal  $T_3$ , conforme ilustrado na figura 6.

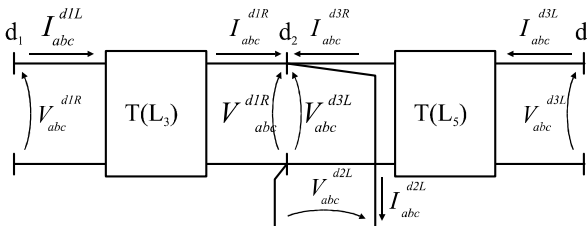


Figura 6. Linha de transmissão – Redução dos terminais  $d_1$  e  $d_3$ .

Para reduzir a linha até esta situação, aplica-se o procedimento descrito no item anterior, até os pontos de derivação  $d_1$  e  $d_3$  e, a partir desta linha com três terminais é possível obter uma linha de transmissão equivalente com apenas dois terminais – o ponto de derivação  $d_2$  e o terminal  $T_3$ .

As tensões e correntes no “novo terminal”  $d_2$  podem ser obtidas através da solução dos sistemas de equações (15) e (16).

$$\begin{bmatrix} V_{abc}^{d1R} \\ I_{abc}^{d1R} \end{bmatrix} = [T(L_3)]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} V_{abc}^{d1L} \\ I_{abc}^{d1L} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} V_{abc}^{d3R} \\ I_{abc}^{d3R} \end{bmatrix} = [T(L_5)]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} V_{abc}^{d3L} \\ I_{abc}^{d3L} \end{bmatrix} \quad (16)$$

E:

$$\begin{bmatrix} V_{abc}^{d2L} \\ I_{abc}^{d2L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{abc}^{d1R} \\ I_{abc}^{d1R} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{abc}^{d3R} \\ I_{abc}^{d3R} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} I_{abc}^{d2L} \\ V_{abc}^{d2L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{abc}^{d1R} \\ V_{abc}^{d1R} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_{abc}^{d3R} \\ V_{abc}^{d3R} \end{bmatrix} \quad (18)$$

#### 2) Algoritmo para localização – Linha equivalente de dois terminais

Neste item são apresentados os dois algoritmos para localização de faltas desenvolvidos. Conforme mencionado anteriormente, o primeiro algoritmo, apresentado no item (II-B-2-a) utiliza como dados de entrada, os fasores de tensões e correntes em cada um dos terminais da linha de transmissão equivalente e os seus parâmetros elétricos. O segundo algoritmo, apresentado no item (II-B-2-b), utiliza como dados de entrada os fasores de tensões e correntes apenas em um terminal da linha de transmissão equivalente, seus parâmetros elétricos e a matriz de admitâncias equivalentes do conjunto carga e transformador.

##### a) Algoritmo para localização – tensões e correntes nos dois terminais

O algoritmo para a localização de faltas apresentado neste item é semelhante ao algoritmo descrito na referência [5] e aplica-se a linhas de transmissão com dois terminais.

A linha equivalente, ilustrada na figura 7, possui dois terminais ( $d_1$  e  $d_2$ ), comprimento total ( $L$ ) e o ponto de falta ( $F_1$ ) se encontra a uma distância ( $x$ ) do terminal  $d_1$ . Os fasores das tensões e correntes em ambos os terminais da linha foram calculados conforme apresentado no item (II-B-1-a).

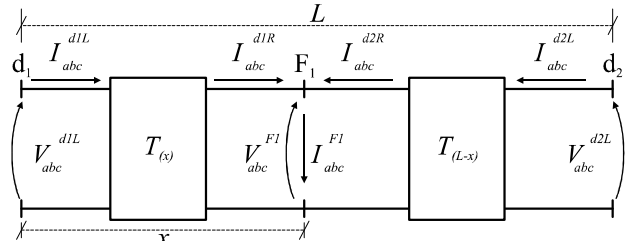


Figura 7. Linha equivalente com dados nos dois terminais

As tensões e correntes no ponto de falta podem ser calculadas a partir das tensões e correntes nos terminais  $d_1$  e  $d_2$ , conforme apresentado nas equações (19) a (20) abaixo:

$$\begin{bmatrix} V_{abc}^{F1} \\ I_{abc}^{F1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [A_{(x)}] & -[B_{(x)}] \\ -[C_{(x)}] & [D_{(x)}] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{abc}^{d1L} \\ I_{abc}^{d1L} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} V_{abc}^{F1} \\ I_{abc}^{F1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [A_{(L-x)}] & -[B_{(L-x)}] \\ -[C_{(L-x)}] & [D_{(L-x)}] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{abc}^{d2L} \\ I_{abc}^{d2L} \end{bmatrix} \quad (20)$$

E:

$$\begin{bmatrix} I_{abc}^{F1} \\ V_{abc}^{F1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{abc}^{d1R} \\ V_{abc}^{d1R} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_{abc}^{d2R} \\ V_{abc}^{d2R} \end{bmatrix} \quad (21)$$

Onde:

$$[T_{(x)}] = \begin{bmatrix} [A_{(x)}] & [B_{(x)}] \\ [C_{(x)}] & [D_{(x)}] \end{bmatrix} : \text{Parâmetros de transmissão de } T_{(x)}.$$

$$[T_{(L-x)}] = \begin{bmatrix} [A_{(L-x)}] & [B_{(L-x)}] \\ [C_{(L-x)}] & [D_{(L-x)}] \end{bmatrix} : \text{Parâmetros de transmissão de } T_{(L-x)}.$$

$$[V_{abc}^{F1}] : \text{Tensões no ponto de falta.}$$

$$[I_{abc}^{F1}] : \text{Correntes no ponto de falta.}$$

Portanto:

$$[V_{abc}^{F1}] = [A_{(x)}] \cdot [V_{abc}^{d1L}] - [B_{(x)}] \cdot [I_{abc}^{d1L}] \quad (22)$$

$$[V_{abc}^{F1}] = [A_{(L-x)}] \cdot [V_{abc}^{d2L}] - [B_{(L-x)}] \cdot [I_{abc}^{d2L}] \quad (23)$$

Para que seja possível determinar o ponto de falta, basta determinar a distância de falta ( $x$ ) que torna a tensão no ponto de falta da equação (22) igual à tensão no ponto de falta da equação (23). Esta distância pode ser obtida através de um processo de minimização da expressão (24), que representa a diferença entre as tensões no ponto de falta, calculada a partir de cada um dos terminais da linha de transmissão equivalente.

$$[A_{(x)}] \cdot [V_{abc}^{d1L}] - [B_{(x)}] \cdot [I_{abc}^{d1L}] + [A_{(L-x)}] \cdot [V_{abc}^{d2L}] - [B_{(L-x)}] \cdot [I_{abc}^{d2L}] = [\Delta V_{abc}(x)] \quad (24)$$

Uma vez que este método é independente do valor da tensão no ponto de falta e da corrente de falta, pode-se dizer que o processo de localização de falta é imune a variações na resistência de falta, portanto, essa resistência deixa de ser uma incógnita do problema.

b) *Algoritmo para localização – tensões e correntes em apenas um terminal*

A linha de equivalente, ilustrada na figura 8, possui dois terminais ( $d_2$  e  $T_3$ ), comprimento total ( $L$ ) e o ponto de falta ( $F_2$ ) se encontra a uma distância ( $x$ ) do terminal  $d_2$ . Os fasores das tensões e correntes no terminal  $d_2$  da linha foram calculados conforme apresentado no item (II-B-1-b).

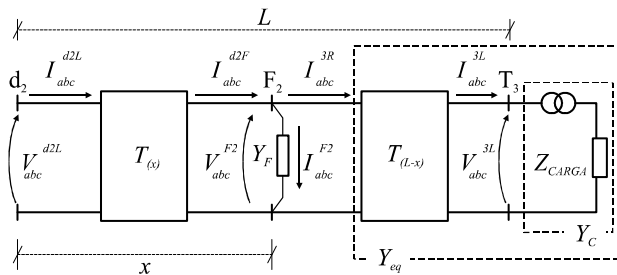


Figura 8. Linha equivalente com dados em apenas um terminal.

As impedâncias da carga e do transformador no terminal  $T_3$  são conhecidas. As tensões no ponto de falta podem ser calculadas a partir das tensões e correntes no terminal  $d_2$  da linha de transmissão equivalente, conforme apresentado na equação (25):

$$\begin{bmatrix} V_{abc}^{d2L} \\ I_{abc}^{d2L} \end{bmatrix} = [T_{(x)}] \cdot \begin{bmatrix} V_{abc}^{F2} \\ I_{abc}^{F2} \end{bmatrix} \quad (25)$$

Onde:

$$[T_{(x)}] = \begin{bmatrix} [A_{(x)}] & [B_{(x)}] \\ [C_{(x)}] & [D_{(x)}] \end{bmatrix} : \text{Parâmetros de transmissão de } T_{(x)}.$$

Entretanto, no ponto de falta tem-se:

$$[I_{abc}^{F2}] = [Y_F] \cdot [V_{abc}^{F2}] \quad (26)$$

$$[I_{abc}^{d2F}] = [I_{abc}^{F2}] + [I_{abc}^{3R}] \quad (27)$$

Onde:

$$[I_{abc}^{F2}] : \text{Correntes de falta.}$$

$$[Y_F] : \text{Matriz de admitâncias de falta.}$$

E:

$$[I_{abc}^{3R}] = [Y_{eq}] \cdot [V_{abc}^{3R}] \quad (28)$$

Onde:

$[Y_{eq}]$  : Matriz de admitâncias equivalente para a associação entre a matriz  $[Y_C]$  e a matriz de admitâncias da linha de transmissão (ver anexo).

É possível escrever as tensões no terminal local da linha de transmissão equivalente a partir da matriz de admitâncias equivalente, da matriz de admitâncias de falta e dos parâmetros de transmissão do quadripolo  $T_{(x)}$ .

Para tanto, substitui-se as equações (26) e (28) na equação (27).

$$[Y_F] \cdot [V_{abc}^{F2}] = [I_{abc}^{d2F}] - [Y_{eq}] \cdot [V_{abc}^{F2}] \quad (29)$$

Substituindo a equação (29) na segunda equação do sistema (25) e rearranjando os termos:

$$[V_{abc}^{F2}] = \left\{ [C_{(x)}] + [D_{(x)}] \cdot ([Y_F] + [Y_{eq}]) \right\}^{-1} \cdot [I_{abc}^{d2L}] \quad (30)$$

Substituindo a equação (30) na primeira equação do sistema (25) e rearranjando os termos:

$$[V_{abc}^{d2L}] = [A_{(x)}] \cdot \left\{ [C_{(x)}] + [D_{(x)}] \cdot ([Y_F] + [Y_{eq}]) \right\}^{-1} \cdot [I_{abc}^{d2L}] \quad (31)$$

$$[I_{abc}^{d2L}] + [A_{(x)}] \cdot [I_{abc}^{d2F}]$$

Por fim, substituindo as equações (29) e (30) na equação (31) e rearranjando os termos, é possível obter o sistema de equações (32), que relaciona as tensões com as correntes na entrada do quadripolo  $T_{(x)}$ .

$$[V_{abc}^{d2L}] = [Z] \cdot [I_{abc}^{d2L}] \quad (32)$$

Onde:

$$[Z] = \left\{ [A_{(x)}] \cdot \left\{ [C_{(x)}] + [D_{(x)}] \cdot ([Y_F] + [Y_{eq}]) \right\}^{-1} + [B_{(x)}] \cdot ([Y_F] + [Y_{eq}]) \right\} \cdot \left\{ [C_{(x)}] + [D_{(x)}] \cdot ([Y_F] + [Y_{eq}]) \right\}^{-1} \right\}$$

$[Z]$  : é a matriz de impedâncias equivalente “vista” pelo ponto  $d_2$ .

A matriz de impedâncias equivalente é função da distância da falta ( $x$ ), dos elementos da matriz de admitâncias da falta, da impedância da carga conectada ao terminal remoto da linha e da matriz de impedâncias do transformador que alimenta essa carga.

A impedância da carga e as impedâncias do transformador

são constantes e, portanto, a matriz de impedâncias equivalentes varia apenas em função da distância da falta e dos elementos da matriz de admitância da falta, conforme a equação (33).

$$[Z] = f(x, y_1, y_2, \dots, y_j) \quad (33)$$

Onde:

$x$ : é a distância da falta

$y_1, y_2, \dots, y_j$ : são os elementos de  $[Y_F]$

Sendo assim, o processo de localização de faltas consiste na determinação da matriz de impedâncias equivalentes, que satisfaz o sistema de equações (33). Para tanto, é utilizado o método Newton-Raphson.

### C. Algoritmo para sincronização das medições

O algoritmo para sincronização das medições entre os terminais da linha de transmissão consiste na determinação da defasagem entre os fasores de pré-falta dos sinais de tensões e correntes nos terminais onde há medições, a partir de um terminal que deve ser considerado como referência.

Para esclarecer o procedimento, considere a linha de transmissão ilustrada na figura 4. Apenas dois dos terminais dessa linha de transmissão possuem medições ( $T_1$  e  $T_5$ ), nos outros terminais ( $T_2$  a  $T_4$ ) há informações apenas sobre as cargas e os transformadores que alimentam essas cargas.

Para efetuar a sincronização, deve-se escolher um terminal como a referência, p. ex., o terminal  $T_1$ . A partir desse terminal é possível calcular os fasores de tensões e correntes no outro terminal da linha de transmissão – o terminal  $T_5$  – utilizando o procedimento de redução da linha de transmissão descrito no item II-B-1.

No entanto, o cálculo dos fasores de tensões e correntes nesse terminal depende do valor da impedância de carga nos terminais onde não há medições de tensões e correntes. Uma vez que é impossível calcular corretamente estas impedâncias, faz-se necessário o desenvolvimento um procedimento que forneça uma estimativa dessas impedâncias.

Neste procedimento, considera-se que os transformadores das subestações conectadas em derivação operam à plena carga. No entanto, não é coerente admitir que esses transformadores operam sempre desta maneira. Desta forma, a metodologia de localização de faltas corrige essas cargas de forma a adequá-las à potência total consumida e ao fator de potência, durante o instante de pré-falta.

A correção das impedâncias de carga é feita pelo algoritmo de sincronização das medições, utilizando os fasores de pré-falta de ambos os terminais da linha de transmissão. As impedâncias de carga são corrigidas de forma a se adequarem à potência total consumida e ao fator de potência no instante imediatamente anterior à falta.

A potência complexa total de pré-falta, calculada a partir dos fasores de tensões e correntes nos terminais da linha de transmissão, é distribuída entre os transformadores das subestações conectadas em derivação de forma proporcional à potência nominal desses transformadores, conforme as equações (34) e (35) a seguir.

$$P_{CARGA}^j = P_{pre} \cdot \frac{S_{nom}^j}{\sum_{j=1}^n S_{nom}^j} \quad (34)$$

$$Q_{CARGA}^j = Q_{pre} \cdot \frac{S_{nom}^j}{\sum_{j=1}^n S_{nom}^j} \quad (35)$$

Onde:

$P_{pre}$ : Potência ativa de pré-falta, calculada através dos fasores de tensões e correntes em ambos os terminais.

$Q_{pre}$ : Potência reativa de pré-falta, calculada através dos fasores de tensões e correntes em ambos os terminais.

$S_{nom}^j$ : Potência aparente nominal do transformador conectado ao terminal  $T_j$ .

$P_{CARGA}^j$ : Potência ativa de pré-falta no terminal  $T_j$ .

$Q_{CARGA}^j$ : Potência reativa de pré-falta no terminal  $T_j$ .

A partir das potências ativa e reativa nos terminais das subestações, é possível calcular as impedâncias de carga nessas barras, conforme as equações (36) e (37).

$$S_{CARGA}^j = P_{CARGA}^j + j \cdot Q_{CARGA}^j \quad (36)$$

$$Z_{CARGA}^j = \frac{3 \cdot (V_{fase})^2}{(S_{CARGA}^j)^*} \quad (37)$$

Onde:

$S_{CARGA}^j$ : Potência complexa de pré-falta no terminal  $T_j$ .

$Z_{CARGA}^j$ : Impedância de carga no terminal  $T_j$ .

$V_{fase}$ : Tensão de fase no terminal  $T_j$ .

Uma vez estimadas as impedâncias das cargas é possível calcular, a partir dos fasores de tensões e correntes no terminal de referência ( $T_1$ ), as perdas na linha de transmissão, as potências consumidas pelas cargas e os fasores de tensões e correntes no terminal  $T_5$ .

É de se esperar que a potência total consumida na linha de transmissão, calculada a partir da soma das perdas e das potências consumidas pelas cargas, seja diferente da potência total calculada a partir dos fasores de pré-falta de tensões e correntes nos terminais da linha de transmissão. Portanto, deve-se corrigir as impedâncias das cargas de forma a adequá-las à potência medida.

A correção das impedâncias das cargas é resultado de um processo iterativo que consiste no cálculo da potência total da linha de transmissão em cada iteração, e no ajuste das impedâncias de carga de acordo com a potência total de pré-falta, calculada a partir dos fasores nos terminais.

Ao final do processo iterativo, obtêm-se as impedâncias de carga que serão utilizadas pelos algoritmos de localização de faltas apresentados no item B. A defasagem entre os terminais  $T_1$  e  $T_5$  da linha de transmissão é obtida a partir da comparação entre os fasores dos sinais de tensões medidos no terminal  $T_5$ , com os fasores calculados no mesmo terminal, através dos fasores de tensões e correntes medidos no terminal  $T_1$ .

## III. RESULTADOS

Neste item, são apresentados os resultados do algoritmo de localização de faltas para casos de curto-circuito produzidos no programa ATP – *Alternative Transient Program*.

Além desses resultados, neste capítulo também são apre-

sentadas análises da precisão do método proposto frente a variações na estimativa do carregamento das subestações conectadas em derivação.

#### A. Casos simulados no ATP

Para montagem dos casos de simulação do ATP optou-se por elaborar um modelo de linha de transmissão de circuito duplo, com sete terminais, isto é, cinco subestações conectadas em derivação.

Este sistema, ilustrado na figura 9, é composto por dois terminais conectados a duas fontes de tensão, terminais  $T_1$  e  $T_2$ , e cinco derivações,  $d_1$  a  $d_5$ . Nos terminais das derivações ( $T_{S1}$  a  $T_{S5}$ ), é conectado um transformador e uma carga modelada como impedância constante. Há registros de tensões e correntes apenas nos terminais  $T_1$  e  $T_2$ .

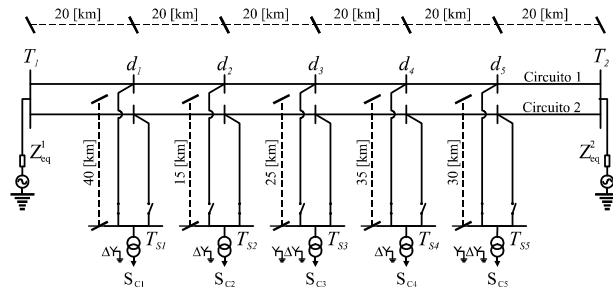


Figura 9. Linha de transmissão utilizada no ATP

Foram selecionados vinte e dois pontos de curto-circuito na linha de transmissão ilustrada. Nestes pontos foram simulados curtos-circuitos fase-terra – AN, dupla-fase – BC, dupla-fase-terra – BCN, e trifásico – ABC.

Para os curtos-circuitos fase-terra optou-se por simular os eventos de falta em dois instantes de ocorrência distintos para verificar a influência da componente exponencial amortecida na determinação do ponto de ocorrência da falta (33,33 milissegundos e 37,50 milissegundos, que equivalem à ocorrência das faltas quando a fase da tensão  $V_{AN}$  está em  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , respectivamente). Como resultado, foram produzidos trezentos e oito casos de simulação, apresentados na tabela I.

TABELA I  
CASOS DE SIMULAÇÃO NO ATP

Tipo de falta	Instante de ocorrência [ms]	No. de pontos	Resistência de falta [ $\Omega$ ]
AN	33,33 (2 ciclos) 37,5 (2 ¼ ciclos)	22	0,001; 1,0 e 5,0
BC	33,33 (2 ciclos)	22	0,001; 1,0 e 5,0
BCN	33,33 (2 ciclos)	22	0,001; 1,0 e 5,0
ABC	33,33 (2 ciclos)	22	0,001 e 1

A eficiência do sistema foi verificada através da resposta dos algoritmos de localização de faltas frente aos 308 casos de curto-circuito, conforme descrito na tabela I. Esta análise foi conduzida utilizando-se os seguintes critérios: erro na estimativa da distância entre o ponto de falta e o terminal  $T_1$  e influência da estimativa do carregamento de cada subesta-

ção na precisão dos resultados.

#### B. Análise do erro no cálculo da distância da falta até o terminal $T_1$

Foram verificados os erros em módulo no cálculo da distância do ponto de falta até a subestação. O erro é dado pela equação (38).

$$erro_{DIST\grave{A}NCIA} = |D_{CALCULADA} - D_{SIMULADA}| \quad (38)$$

O histograma desses erros está apresentado na figura 10. Conforme ilustrado, pode-se considerar o erro pequeno. Este erro deve-se exclusivamente ao erro no cálculo dos fasores, uma vez que o algoritmo de localização de faltas utilizou os valores das cargas e das impedâncias dos transformadores exatamente iguais aos valores simulados pelo ATP.

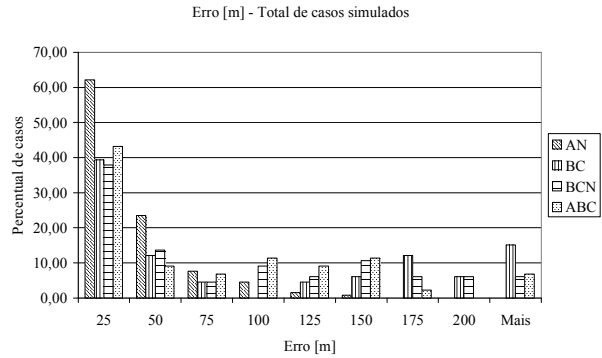


Figura 10. Histograma de erro no cálculo da distância

É importante ressaltar que a linha de transmissão simulada possui um comprimento de 120 [km] entre os terminais  $T_1$  e  $T_2$ , portanto, um erro de 100 metros para uma falta ocorrendo na metade desse trecho representa apenas 0,17% de erro.

#### C. Influência da estimativa do carregamento de cada subestação

O algoritmo para localização de faltas proposto utiliza uma estimativa do carregamento das subestações conectadas em derivação, que depende da potência nominal dos transformadores de cada subestação e da potência aparente de pré-falta medida nos terminais da linha. Entretanto, a distribuição da potência de pré-falta pode não ser proporcional à potência nominal dos transformadores.

Desta forma, para analisar o impacto desta variação, foi utilizado um procedimento estatístico que consiste em modificar o carregamento dos transformadores de cada subestação, de forma a torná-lo diferente do carregamento utilizado nas simulações no ATP. Para tanto, a potência utilizada pelo algoritmo de localização de faltas é multiplicada por um número aleatório, escolhido de uma distribuição normal, cuja média é  $\mu=1,0$  e o desvio padrão  $\sigma^2$ .

Este “novo” carregamento nos transformadores de cada uma das subestações deve ser corrigido de acordo com a potência de pré-falta medida nos terminais da linha de transmissão. As equações (39) e (40) descrevem este procedimento.

$$S_{FL}^{j,0} = \chi \cdot S_{ATP}^j \quad (39)$$



$$S_{FL}^j = S_{FL}^{j,0} \cdot \sum_{j=1}^n S_{ATP}^j \cdot \left( \sum_{j=1}^n S_{FL}^{j,0} \right)^{-1} \quad (40)$$

Onde:

$\chi$ : Número aleatório

$S_{FL}^{j,0}$ : Potência aparente do terminal  $T_j$  modificada

$S_{ATP}^j$ : Potência aparente do terminal  $T_j$  utilizada nas simulações do ATP

$S_{FL}^j$ : Potência aparente do terminal  $T_j$  utilizada pelo algoritmo de localização

A tabela II apresenta o erro médio para cada um dos tipos de curto-circuito, utilizando a equação (38). A figura 11 apresenta a influência da variação da estimativa da carga no erro do cálculo da distância de falta, considerando todos os tipos de curto circuito.

TABELA II  
INFLUÊNCIA DA ESTIMATIVA DO CARREGAMENTO NO CÁLCULO DA DISTÂNCIA

Tipo	Erro [m] – Influência da estimativa do carregamento ( $\mu=1,0$ )				
	$\sigma^2=0,1$	$\sigma^2=0,2$	$\sigma^2=0,3$	$\sigma^2=0,4$	$\sigma^2=0,5$
AN	54	105	132	187	214
BC	108	113	122	156	171
BCN	92	100	114	156	173
ABC	118	135	137	186	194

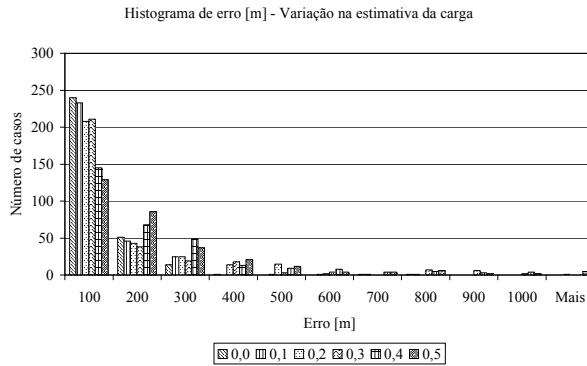


Figura 11. Influência do carregamento no erro do cálculo da distância

Observando a tabela II e a figura 11, nota-se que os valores dos erros podem ser considerados pequenos. Para uma linha de transmissão com um comprimento total de 265 [km], erros da ordem de centenas de metros não interferem significativamente no processo de localização de faltas.

#### IV. SISTEMA PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

Este item apresenta o TFLOC – Sistema para Localização de Faltas, desenvolvido para a CTEEP, no âmbito deste projeto de P&D. A figura 12 ilustra os requisitos de hardware e software para o Sistema desenvolvido.

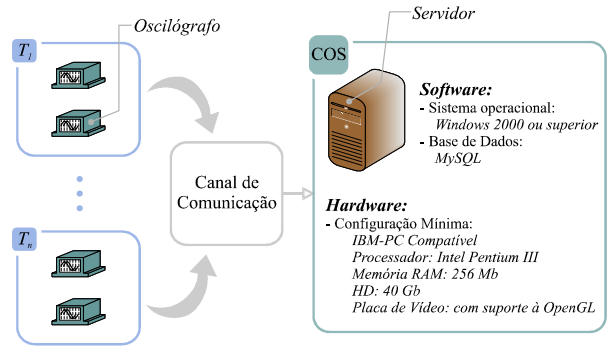


Figura 12. Requisitos de hardware do Sistema para Localização de Faltas

Esse sistema é constituído por:

- Oscilógrafos e/ou relés de proteção instalados nos terminais da linha de transmissão: a metodologia para localização de faltas proposta neste trabalho exige medições de tensões e correntes pelo menos em ambos os terminais de propriedade da concessionária de transmissão. Não há necessidade de sincronização de tempo entre as medições, uma vez que a metodologia proposta possui um algoritmo específico para este fim;
- Canal de comunicação entre os equipamentos de medição e a intranet da concessionária: os registros efetuados pelos equipamentos instalados nos terminais da linha de transmissão devem estar disponíveis, para que seja possível efetuar a localização da falta;
- Infra-estrutura de *hardware* e *software*: microcomputador onde são instalados os aplicativos do Sistema de Localização de Faltas.

A metodologia para localização de faltas proposta neste trabalho utiliza os fasores de pré e pós-falta, calculados a partir dos sinais de tensões e correntes, registrados por oscilógrafos digitais (e/ou relés de proteção) instalados nos terminais das linhas de transmissão. Normalmente, esses sinais são armazenados em arquivos no formato COMTRADE e estão disponíveis para a análise na intranet da concessionária.

##### A. Descrição do sistema

Conforme ilustrado na figura 13, o Sistema para Localização de Faltas é composto por módulos de software, que têm acesso a uma base de dados com os parâmetros elétricos e a topologia dos sistemas de transmissão monitorados. Esta base de dados está acessível para utilização pelos módulos de software e pela interface homem-máquina, que compõem o sistema.

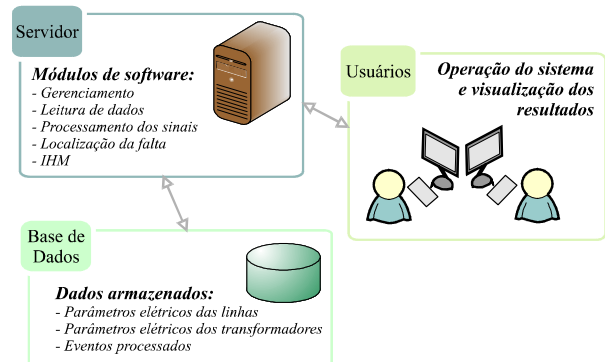


Figura 13. Estrutura do Sistema para Localização de Falhas

Os módulos de software que fazem parte do Sistema para Localização de Falhas são:

- Módulo de interface e gerenciamento: responsável pela execução de todas as instâncias dos módulos pertencentes ao Sistema para Localização de Falhas e pela exibição dos resultados do *módulo de localização* aos usuários do Sistema. Este módulo foi codificado utilizando a linguagem de programação Visual Basic;
- Módulo de leitura de dados da oscilografia: responsável pela leitura dos sinais de tensão e corrente registrados pelos oscilógrafos (e/ou relés de proteção) e armazenados em arquivos no formato COMTRADE. Este módulo também é responsável pela filtragem da componente exponencial amortecida presente nos sinais das correntes. O módulo de leitura foi codificado como função adicional do *módulo de interface e gerenciamento* e é capaz de fazer a leitura do formato COMTRADE definido em 1991 (além das revisões 1997, 1999 e 2000);
- Módulo de processamento digital dos sinais: responsável pela extração dos fasores de pré e pós-falta, determinação do tipo de falta e fases envolvidas. Neste módulo foram implementados os algoritmos para sincronização dos fasores e determinação do estado das chaves seccionadoras, conforme apresentado na referência [6]. Este módulo foi codificado utilizando a linguagem de programação C/C++ padrão ANSI;
- Módulo de localização de falhas: responsável pelo processamento do resultado fornecido pelo *módulo de processamento digital dos sinais* para cálculo do ponto de ocorrência do defeito. Neste módulo foram implementados os algoritmos para localização da falta, descritos neste trabalho. Este módulo foi codificado utilizando a linguagem de programação C/C++ padrão ANSI.

### B. Módulos de gerenciamento, leitura de dados da oscilografia e IHM

Os módulos de gerenciamento, leitura de dados e interface homem-máquina foram codificados como um único aplicativo de software, utilizando a linguagem de programação Visual Basic.

O módulo de gerenciamento é responsável pelo cadastro e armazenamento na base de dados das linhas de transmissão monitoradas pelo sistema, pelo armazenamento dos dados sobre as faltas processadas pelo sistema, bem como por tornar disponível o resultado do processo de localização de faltas para a interface homem-máquina.

O módulo de leitura de dados é responsável pela leitura dos arquivos fornecidos pelos oscilógrafos digitais (e/ou relés de proteção), e pelo armazenamento desses registros na base de dados, para posterior utilização pelos módulos de processamento digital de sinais e de localização de faltas.

O módulo de interface homem-máquina - IHM - é responsável pelo cadastramento das linhas de transmissão monitoradas pelo sistema, pelo gerenciamento das requisições dos usuários e pela apresentação dos resultados obtidos. Com esse módulo é possível acessar os dados armazenados na base, bem como fazer alterações no sistema.

A IHM consiste em uma série de telas, a figura 14 ilustra a barra de tarefas principal da IHM.

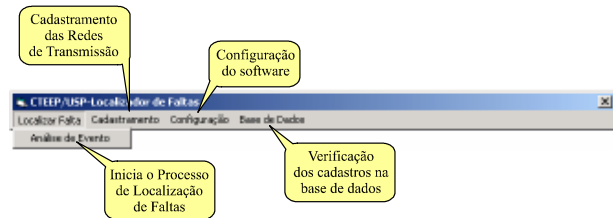


Figura 14. Barra de tarefas da Interface Homem-máquina

A partir da barra principal da IHM, o usuário pode executar as seguintes funções:

- Cadastramento dos elementos das redes de transmissão monitoradas pelo sistema: o cadastro dos condutores, linhas de transmissão, transformadores, reatores, etc. é feito manualmente, para posterior utilização pelo software de localização de faltas. A tela de cadastramento de uma linha de transmissão está ilustrada na figura 15;

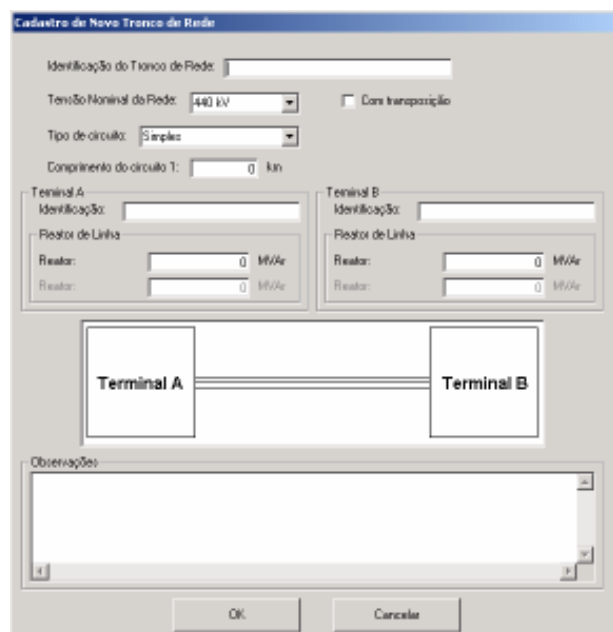


Figura 15. Barra de tarefas da Interface Homem-máquina

- Localização de faltas: o usuário seleciona o evento de curto-circuito que deseja efetuar a localização de faltas e inicia o módulo de localização. A tela de leitura dos arquivos COMTRADE está ilustrada na figura 16;

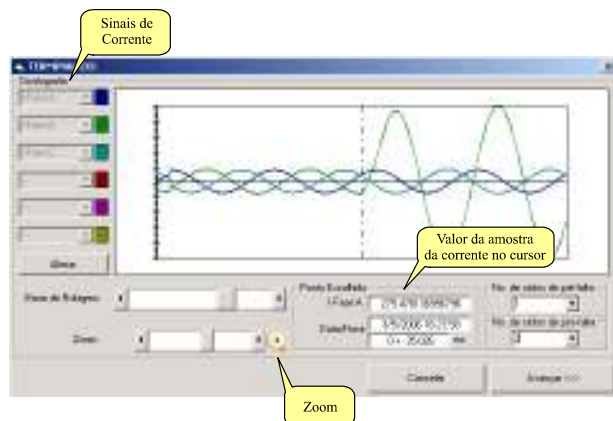


Figura 16. Barra de tarefas da Interface Homem-máquina

- Visualização dos resultados: os resultados fornecidos pelo software de localização de faltas podem ser visualizados pelo operador, através da interface e de um arquivo texto, com o resumo da ocorrência. A tela de resultados está ilustrada na figura 17.

## V. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou uma metodologia para localização de faltas em linhas de transmissão com subestações conectadas em derivação. Os modelos utilizados pelos algoritmos que integram a metodologia foram descritos em detalhes. Os algoritmos descritos neste artigo foram submetidos a testes, utilizando simulações obtidas com o programa ATP.

Os resultados dessas simulações indicam que a metodologia proposta é uma ferramenta importante no auxílio à análise dos eventos de curto-circuito nas linhas de transmissão.

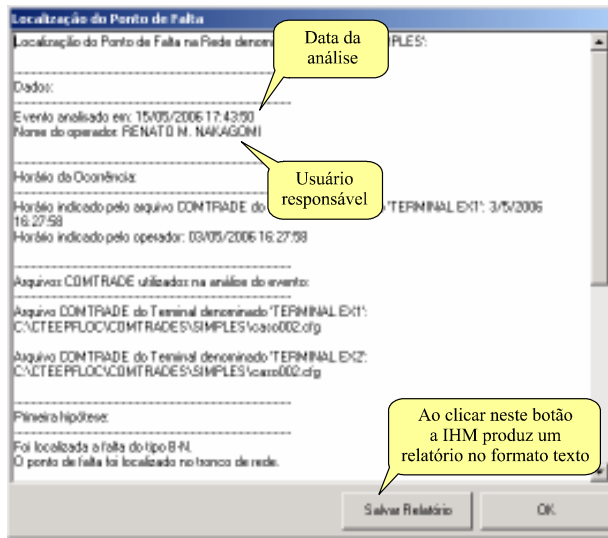


Figura 17. Barra de tarefas da Interface Homem-máquina

## VI. REFERÊNCIAS

- [1] ABE, M., OTSUZUKI, N., EMURA, T., TAKEUCHI, M. Development of a new fault location system for multi-terminal single transmission lines. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 10, no. 1, p. 159-168, January 1995.
- [2] NAGASAWA, T., ABE, M., OTSUZUKI, N., EMURA, T., JIKIHARA, Y., TAKEUCHI, M. Development of a new fault location algorithm form multi-terminal two-parallel transmission lines. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 7, no. 3, p. 1516-1532, July 1992.
- [3] FUNABASHI, T., OTOGURO, H., MIZUMA, Y., DUBE, L., AMETANI, A. Digital fault location for parallel double-circuit multi-terminal transmission lines. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 15, no. 2, p. 531-537, April 2000.
- [4] BOWMAN, W. I., MCNAMEE, J. M., Development of equivalent Pi and T matrix circuits for long untransposed transmission lines. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 83, no. 6, p. 625-632, 653-657, June, 1964.
- [5] JOHNS, A. T., JAMALI, S. Accurate fault location technique for power transmission lines. IEE Proceedings, vol. 137, part C, no. 6, p. 395-402, November 1990.
- [6] MANASSERO JUNIOR, G. Sistema para localização de faltas em linhas de transmissão com subestações conectadas em derivação. 2006. 167 p. Tese (Doutorado) - ESC POLITÉCNICA, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

## VII. ANEXOS

### A. Cálculo da matriz de admitâncias equivalente $[Y_{eq}]$

Conforme ilustrado na figura 18, as correntes no terminal remoto do quadripolo  $T(d)$  podem ser obtidas a partir da equação (1), que define as relações de tensões e correntes na entrada e na saída desse quadripolo e nas relações entre tensões e correntes na carga conectada no terminal remoto – R, conforme a equação (2).

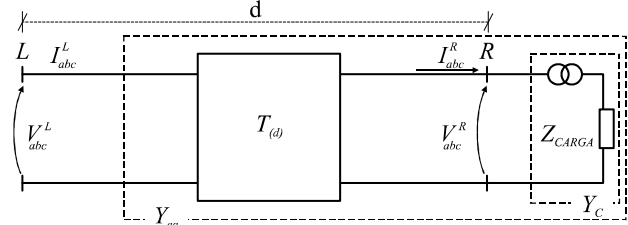


Figura 18. Linha de transmissão – Matriz de admitâncias equivalente

$$\begin{bmatrix} V_{abc}^L \\ I_{abc}^L \end{bmatrix} = [T(d)] \cdot \begin{bmatrix} V_{abc}^R \\ I_{abc}^R \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} I_{abc}^R \end{bmatrix} = [Y_C] \cdot \begin{bmatrix} V_{abc}^R \end{bmatrix} \quad (2)$$

Onde:

$$[T(d)] = \begin{bmatrix} [A] & [B] \\ [C] & [D] \end{bmatrix}; \text{ Parâmetros de transmissão de } T(d).$$

$[V_{abc}^L]$ : Tensões no terminal local do quadripolo  $T(d)$ .

$[I_{abc}^L]$ : Correntes no terminal local do quadripolo  $T(d)$ .

$[V_{abc}^R]$ : Tensões no terminal remoto do quadripolo  $T(d)$ .

$[I_{abc}^R]$ : Correntes no terminal remoto do quadripolo  $T(d)$ .

$[Y_C]$ : Admitância equivalente da carga e transformador, conectada ao terminal remoto.

Substituindo a equação (2) na primeira equação do sistema (1) e rearranjando os termos da equação resultante, tem-se:

$$[V_{abc}^R] = \{ [A] + [B] \cdot [Y_C] \}^{-1} \cdot [V_{abc}^L] \quad (3)$$

Substituindo as equações (2) e (3) na segunda equação do sistema (1) e rearranjando os termos da equação resultante, tem-se:

$$[I_{abc}^L] = \{ [C] + [D] \cdot [Y_C] \} \cdot \{ [A] + [B] \cdot [Y_C] \}^{-1} \cdot [V_{abc}^L] \quad (4)$$

E:

$$[Y_{eq}] = \{ [C] + [D] \cdot [Y_C] \} \cdot \{ [A] + [B] \cdot [Y_C] \}^{-1} \quad (5)$$

Onde:

$[Y_{eq}]$ : matriz de admitâncias resultante da associação da entre a carga, o transformador e a linha.