



## ANALISADOR DE EVENTOS EM TEMPO QUASE-REAL

**N. Kagan, W. Guerra Z. Juan C. Cebrian, J. C. Guaraldo, S. X. Duarte**  
**Energ - Centro de Estudos em Regulação e Qualidade de Energia Elétrica**  
**Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas - EPUSP**  
[nelsonk@pea.usp.br](mailto:nelsonk@pea.usp.br), [willguch@poli.usp.br.com](mailto:willguch@poli.usp.br.com), [cebrian00@gmail.com](mailto:cebrian00@gmail.com), [xavier@pea.usp.br](mailto:xavier@pea.usp.br)

**A. A. Martins**  
**Energias do Brasil - Enersul**  
[alexandro@enbr.com.br](mailto:alexandro@enbr.com.br)

### RESUMO

Este trabalho apresenta a implementação de uma ferramenta computacional para análise, em tempo quase real, dos eventos na rede elétrica que envolvem variações de tensão de curta duração (VTCDs). Essa ferramenta permite diagnosticar automaticamente as ocorrências no sistema quanto à natureza do fenômeno, a localização da sua causa, a extensão das suas conseqüências no sistema e a caracterização dos valores das grandezas nas barras afetadas pela VTCDs. Também faz parte deste trabalho a integração deste sistema desenvolvido com os sistemas existentes. Desta forma, foi desenvolvida a comunicação com o banco de dados de registros oscilográficos existentes de modo que, a partir do arquivo do registro, seja possível realizar a análise da perturbação captada. Este aplicativo foi implementado para a Empresa Enersul, do Grupo Energias do Brasil. O artigo apresenta resultados de de simulações para eventos ocorridos no sistema.

### PALAVRAS-CHAVE

Localizador de faltas em linhas de transmissão, Estimação de estados, Faltas monofásicas, bifásicas e trifásicas, Variações de tensão de curta duração, Qualidade de energia.

### 1. INTRODUÇÃO

As faltas em sistemas de potência acarretam desligamentos não programados de seus componentes. Sua extinção deve ser feita de forma rápida e apropriada pelos equipamentos de proteção, desativando apenas a parte defeituosa do sistema. Através das Resoluções 24/2000 e 505/2001, a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL [2] e [3], regula alguns índices de qualidade do fornecimento de energia, como a Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DIC, DEC) e a Duração Relativa da Transgressão de Tensão precária e crítica (DRP, DRC). Nesse sentido, é de preocupação das concessionárias desenvolver mecanismos adequados para operar suas redes da forma mais adequada.

Este trabalho apresenta a forma de monitoração quase “*on-line*” de localização de faltas implementado na rede de subtransmissão da ENERSUL, onde, após a ocorrência de uma falta, uma análise mais detalhada é imprescindível para a avaliação do desempenho das grandezas do sistema. Para tanto, destaca-se a importância das oscilografias, consistindo no constante monitoramento das grandezas elétricas do sistema de potência e do estado de operação do sistema de proteção.

Na literatura existem vários trabalhos, dentre os quais, o apresentado em [3], onde se faz uma detecção e classificação de faltas em linhas de transmissão, a partir da análise de registros oscilográficos via redes neurais artificiais e transformada wavelet. Em [4], apresenta-se a aplicação de Redes Neurais artificiais (RNAs) como uma alternativa para atuar como um “localizador de faltas” em uma linha de transmissão. Em [5], utiliza-se os parâmetros de seqüência zero, independente das características físicas do local.

Este trabalho utiliza uma busca com regras determinísticas para a classificação e localização de faltas, onde o diagrama de impedâncias de seqüências positiva e zero (configuração de operação) são imprescindíveis para o desenvolvimento da metodologia proposta. Este trabalho foi dividido em três partes: na primeira detalha-se a rede administrada pela ENERSUL; a segunda parte ilustra a metodologia para finalmente, na última parte, apresentar alguns resultados dos testes realizados.

## **2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA**

A rede de Enersul é constituída por SEs interligadas por várias linhas em tensão de 138 kV, 69 kV, 34,5 kV e 13,8 kV. Como o sistema de medição instalado monitora prioritariamente as tensões nas barras de 138 kV, o sistema de localização desenvolvido está restrito à localização de faltas que ocorrem entre trechos de linhas nesse nível de tensão. Quando houver informações de abertura de disjuntor que possibilite identificar defeitos em níveis de tensão inferiores, aí então esse recurso poderá ser utilizado. Como critério inicial estabeleceu-se realização de localizações de faltas em linhas em subsistemas com barras monitoradas pelos registradores digitais de perturbações (RDPs). Como em alguns trechos da rede em estudo existem malhas, se utilizou um método de localização de faltas que utiliza principalmente as informações das tensões registradas pelos RDPs instalados em todas as barras das SEs que constituem a área piloto, definida neste trabalho. Além das informações das tensões, ressalta-se que também podem ser utilizadas as informações referentes às correntes registradas pelos RDPs e/ou, alternativamente, as informações de operação dos disjuntores das linhas a fim de possibilitar a localização de faltas em trechos mais restritos, melhorando o processo de busca do local da falta.

A idéia para ativação do sistema de localização de faltas admite que esse sistema de localização seja acionado automaticamente quando algum dos RDPs instalados registrar alguma ocorrência de falta na rede. Neste caso, quando algum(ns) RDP(s) registrar(em) a ocorrência de uma falta, o aplicativo de localização deve ser ativado automaticamente, efetuar a localização do defeito e indicar em uma tela de saída (leitura) uma lista de prováveis locais de ocorrência da falta.

## **3. DESCRIÇÃO DO TRABALHO**

### ***3.1. Requisitos básicos para os equipamentos de detecção e medição de VTCD***

Para realizar o processo de medição é necessário que durante o processo de análise das informações, sejam mantidas as especificações necessárias, quais sejam:

- ◆ Captura de formas de onda de tensão e de corrente de todas as fases pela monitoração contínua dos valores eficazes dessas grandezas, que deverão ser calculados considerando janela de 1 ciclo e atualização a cada  $\frac{1}{2}$  ciclo (com opção para atualização a cada 1 ciclo);

- ◆ Registro de valores eficazes de tensão e de corrente de todas as fases junto com a captura de formas de onda; registro durante período ajustável de até 1,5 minutos contado a partir do instante de detecção das condições para a captura, sem reinício da contagem caso ocorram novas condições de detecção durante esse período;
- ◆ Tensão de referência para captura pelo valor eficaz de tensão: prever possibilidade de escolha entre: valor fixo ajustável, valor flutuante, baseado no último valor VTM (valor de 10 min) da medição do nível de tensão;
- ◆ Valores limites de tensão para disparo pelo valor eficaz de tensão: ajustáveis, com os seguintes valores default: 90% da tensão de referência (para detecção) no caso de afundamento e 110% da tensão de referência (para detecção) no caso de elevação;
- ◆ Valores limites de corrente para disparo pelo valor eficaz de corrente: ajustáveis de forma independente para as correntes de fase e de neutro;
- ◆ Registro da forma de onda com resolução reduzida até a taxa mínima de 16 amostras/ciclo, mas preferencialmente de 64 amostras/ciclo;
- ◆ No início da ocorrência: registro de 30 ciclos, sendo 4 ciclos antes do instante de detecção da VMT e 26 ciclos após;
- ◆ No final da ocorrência: registro de 10 ciclos, caso a duração for superior a 30 ciclos, sendo 2 ciclos antes do instante do término da VMT e 8 ciclos após;
- ◆ Registro de todas as tensões fase-neutro, independentemente da fase onde se detectou a ocorrência de VMT.

### ***3.2. Processamento dos dados de medição***

Os principais dados a serem utilizados no localizador são provenientes dos registros dos valores instantâneos das grandezas tensão e corrente de cada fase dos valores eficazes ciclo a ciclo, capturados por medidores de qualidade de energia quando ocorrem anomalias de tensão (afundamento ou elevação) ou de corrente (sobre-corrente). As principais informações fornecidas pelo processamento inicial são:

- Localização do medidor;
- Data e horário de ocorrência dos eventos registrados;
- Fasores das tensões e correntes nos períodos pré-falta e durante a falta e do final do registro;
- Componentes de seqüência positiva, negativa e zero nos períodos de pré-falta e durante a falta;
- Variação da tensão eficaz entre as situações pré-falta e durante falta;
- Fases envolvidas na falta;
- Informações quanto à duração do evento para cada fase;
- Informações quanto à operação de disjuntor(es), se disponíveis;
- Indicação se ocorreu interrupção de curta ou de longa duração.

#### *a) Grandezas a serem obtidas a partir das medições*

As grandezas são obtidas a partir de arquivos de registro das formas de onda das tensões e correntes, para as janelas de pré-falta, de falta e de final de registro. Estas janelas devem ter um período de um ciclo, comuns para todas as fases. As grandezas a serem obtidas para estas janelas são:

#### Tensão:

- Valores eficazes totais das tensões das três fases;
- Valores eficazes dos fasores das tensões das três fases na frequência fundamental;

- Ângulos dos fasores das tensões (na frequência fundamental) das três fases com referência ao fasor de tensão de uma das fases (a fase A);
- Valores eficazes dos componentes de seqüência positiva, negativa e zero das tensões.

Corrente:

- Valores eficazes totais das correntes das três fases;
- Valores eficazes dos fasores das correntes das três fases na frequência fundamental;
- Ângulos dos fasores das correntes (na frequência fundamental) das três fases com referência ao fasor de tensão de uma das fases (a fase A);
- Valor eficaz da corrente de neutro calculada pela soma dos fasores das três correntes de linha (sistema trifásico), caso não seja disponível diretamente do medidor;
- Valores eficazes dos componentes de seqüência positiva, negativa e zero das correntes.

*b) Determinação das janelas para obtenção dos fasores de tensão e corrente*

A definição apropriada da janela que foi utilizada para obter os fasores de tensões e de correntes representativos do evento é um ponto importante para a obtenção de bons resultados no processamento inicial. Isto porque estes fasores servem de base para a estimação de VTCDs. A definição inadequada da janela pode fornecer resultados indesejáveis.

No item a), foram apresentados os critérios para a definição das janelas para a obtenção dos fasores que irão caracterizar os períodos de pré-falta, durante a falta e final do registro e que foram elaborados buscando uma compatibilidade com o método de caracterização de VTCDs utilizado.

### **3.3. Classificação da falta**

Os curtos circuitos podem ser divididos em dois grupos, relativos às faltas equilibradas e às faltas desequilibradas. As faltas podem envolver ou não impedâncias de defeitos, que por sua vez podem ser impedâncias entre fases ou impedâncias para a terra. Uma outra forma de classificar as faltas é considerando os curtos que envolvem a terra e os curtos que não envolvem a terra. Uma terceira forma de classificar as faltas é pelo número de fases envolvidas, que pode conter uma, duas ou três fases.

São considerados os seguintes tipos de falta:

- Trifásica;
- Fase-terra, sem e com impedância de defeito;
- Dupla fase;
- Dupla fase - terra, sem e com impedância de defeito.

### **3.4. Localização da falta**

Esta etapa de localização é subdividida em duas partes:

- 1) Análise preliminar das informações;
- 2) Execução do algoritmo de estimação pelo método de mínimos quadrados.

Na análise preliminar é realizada uma verificação quanto às fases envolvidas no evento, componentes simétricas das tensões e outras informações disponíveis, efetuando uma triagem quanto aos tipos de falta que podem ter ocorrido, indicação de localização em alguma parte específica do sistema, etc. Verifica-se também se a VTCD é originária do sistema supridor.

A seguir, com os dados de medição e do arquivo de dados de simulações, executa-se o algoritmo de localização de falta baseado no método de mínimos quadrados, descrito adiante. Determina-se então o tipo e local da falta, e são calculados as tensões em todos os pontos de interesse da rede, utilizando o módulo de cálculo de curto-circuito, que produzirá um arquivo de medições virtuais.

#### *a) Fluxo de carga*

Após classificar o tipo de falta foi necessário utilizar um método de fluxo de carga que determina as condições de tensão e de corrente na rede em regime permanente e os resultados são utilizados no módulo de cálculo de curto-circuito como valores pré-falta.

O programa de fluxo de potência utilizado neste estimador suporta redes em malha e com vários pontos de suprimento/geração.

#### *b) Impedâncias de falta*

Para os cálculos de curto-circuito, nos casos de faltas que envolvem terra, são usadas impedâncias de defeito de 0, 1, 5, 10, 20 e 40  $\Omega$ .

O localizador identifica as situações de falta a montante (faltas no sistema supridor) através da análise das diferenças de tensão entre a condição pré-falta e durante a falta nos pontos de medição. Quando as diferenças de tensão para todos os pontos, fase a fase, forem próximas para os pontos monitorados, identifica-se, automaticamente, que refere-se a caso de falta ocorrida a montante do subsistema em estudo.

#### *c) Cálculo das condições de curto-circuito*

O módulo de cálculo de curto-circuito é utilizado em duas ocasiões:

- Obtenção das tensões em condições de curto-circuito para produzir o arquivo de dados de simulações que conterão as tensões nos pontos de localização dos medidores para diversas situações de falta, e;
- Cálculo das tensões em pontos de interesse da rede, fornecendo resultados de VTCDs estimados para a situação de falta identificada.

O programa de curto-circuito utilizado neste estimador suporta rede em malha e com vários pontos de suprimento/geração.

Os valores das tensões da rede obtidos com as simulações de curto-circuito são armazenados em arquivos, oconsiderando vários tipos de falta e vários pontos de falta, incluindo pontos intermediários dos trechos de linha.

### **3.5. Simulações ao longo de linhas**

É comum que os defeitos não sejam originados nos barramentos ou nos equipamentos de barra. E como em uma ligação a impedância varia ao longo do seu comprimento, é importante que se faça simulações não apenas em um ponto, mas ao longo de toda a linha de transmissão.

Uma divisão intuitiva das linhas seria através de segmentos, por exemplo dividi-las em 10 segmentos de trechos uniformes. Porém, como há trechos de linha de vários comprimentos, o “Localizador” alternativamente pode dividir os trechos em segmentos de 5 ou 10  $\Omega$ , calculando os valores a partir das informações da rede.

### **3.6. Método de mínimos quadrados**

O princípio de localização de faltas deste estimador é baseado no método de mínimos quadrados aplicado à tensão nos pontos monitorados. Por meio desse método procura-se a situação de falta no sistema que forneça a menor soma dos quadrados das diferenças entre os valores medidos e valores

calculados de tensão nos pontos monitorados, isto é, onde são instalados os medidores da rede. Esse ajuste fornece o tipo de falta e a sua localização no sistema.

Considerando um determinado evento da qual se tem os valores de medição de VTCDs, tem-se, para um ponto de medição  $i$ , a soma dos quadrados dos desvios das tensões (módulos) das 3 fases, para um dado tipo de falta  $f$  e local de falta  $j$ :

$$[\delta_i]_{f,j}^2 = \left( |V a_i^{med}| - |(V a_i^{calc})_{f,j}| \right)^2 + \left( |V b_i^{med}| - |(V b_i^{calc})_{f,j}| \right)^2 + \left( |V c_i^{med}| - |(V c_i^{calc})_{f,j}| \right)^2$$

Tomando-se os valores das tensões medidas e os resultantes de simulações, verifica-se, para cada posição de falta e para cada tipo de falta, a somatória dos quadrados das diferenças entre os valores medidos e calculados de todas as fases de todos os pontos com medição. A posição de falta que fornece a menor somatória é o local mais provável para a falta considerada. De todos os tipos de falta considerados, aquele que fornecer o menor valor é o tipo que será considerado o mais provável de ter ocorrido.

### 3.7. Processamento de Localizador

Na Figura 1, ilustra-se o fluxograma do localizador de faltas.

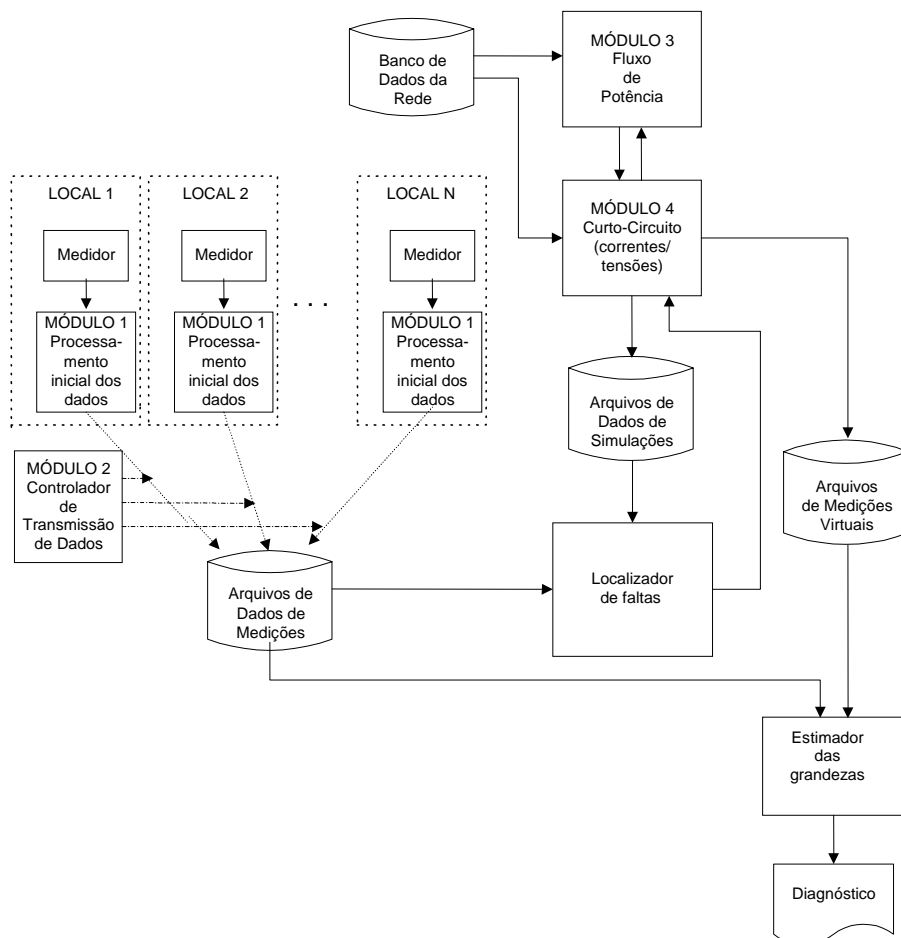


Figura 1. Fluxograma de Estimação

#### 4. APLICAÇÃO

Este trabalho apresenta a especificação do módulo de localização de faltas para a rede de subtransmissão da ENERSUL. Na Figura 2 está o esboço de uma das redes utilizadas na comparação dos valores calculados.

Observa-se que os Registradores Digitais de Perturbação (RDPs) encontram-se alocados, na rede elétrica da ENERSUL, sempre em barras de 138 kV, monitorando tensões em barras e correntes nos circuitos vizinhos e alocados nos seguintes pontos:

- Aquidauana
- CG Almojarifado
- CG Cuiabá
- CG Centro
- CG Industrial
- Maracaju
- Mimoso (2 RDPs)
- Chapadão do Sul
- Dourados das Nações (2 RDPs)
- Dourados Santa Cruz
- Rio Verde
- CG Imbirussú
- CG José Abraão
- CG Miguel Couto
- CG Assis Scaffa
- Rio Verde
- Jardim

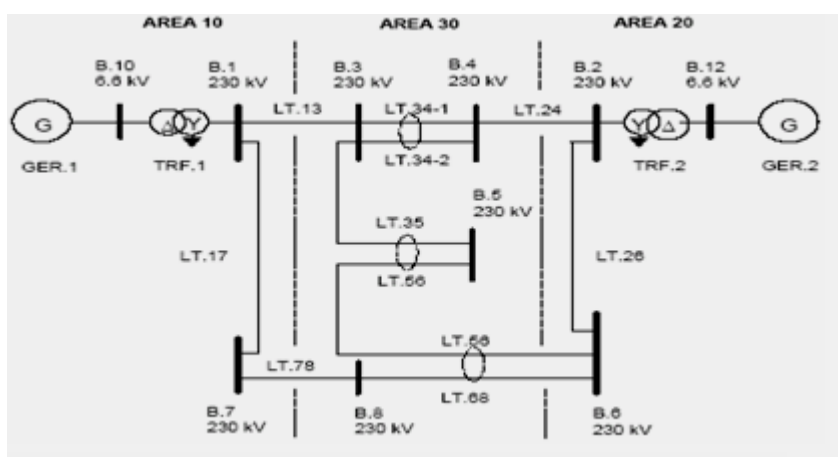
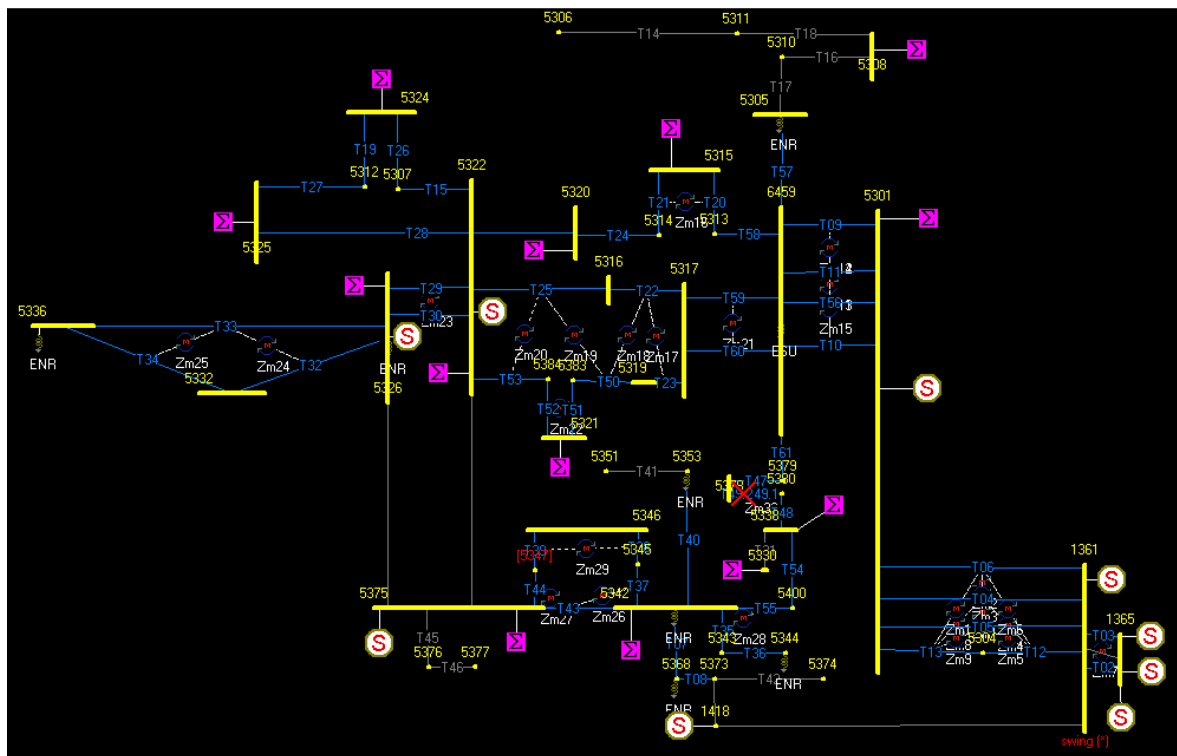


Figura 2. Sistema de 138 kV.

O Sistema de Oscilografia da ENERSUL é responsável pelo fornecimento das formas de onda de tensão das barras em 138 kV monitoradas. O sistema pode ser, em alguns casos, configurado para medir também as tensões em barras de baixas de transformadores, por exemplo, 69 kV ou 34,5 kV.

Alguns canais monitoram as contribuições de correntes de defeito em circuitos adjacentes ao RDP. Estas informações são importantes para se restringir a LT em falta, ou ainda para se selecionar o transformador de subtransmissão que alimenta eventual defeito proveniente da rede de 69 kV, por exemplo.

De forma a aferir a utilização deste aplicativo foram realizadas diversas simulações do aplicativo AnaFas, e os resultados após os ajustes necessários foram considerados idênticos.



**Figura 3. Sistema de ENERSUL.**

Na Figura 3, ilustra-se a tela do software de localização de faltas. Os pontos identificados com o símbolo  $\Sigma$  denotam a existência de um RDP para monitoramento da qualidade de energia e captura de oscilografias, sempre que ocorra uma VTCD.

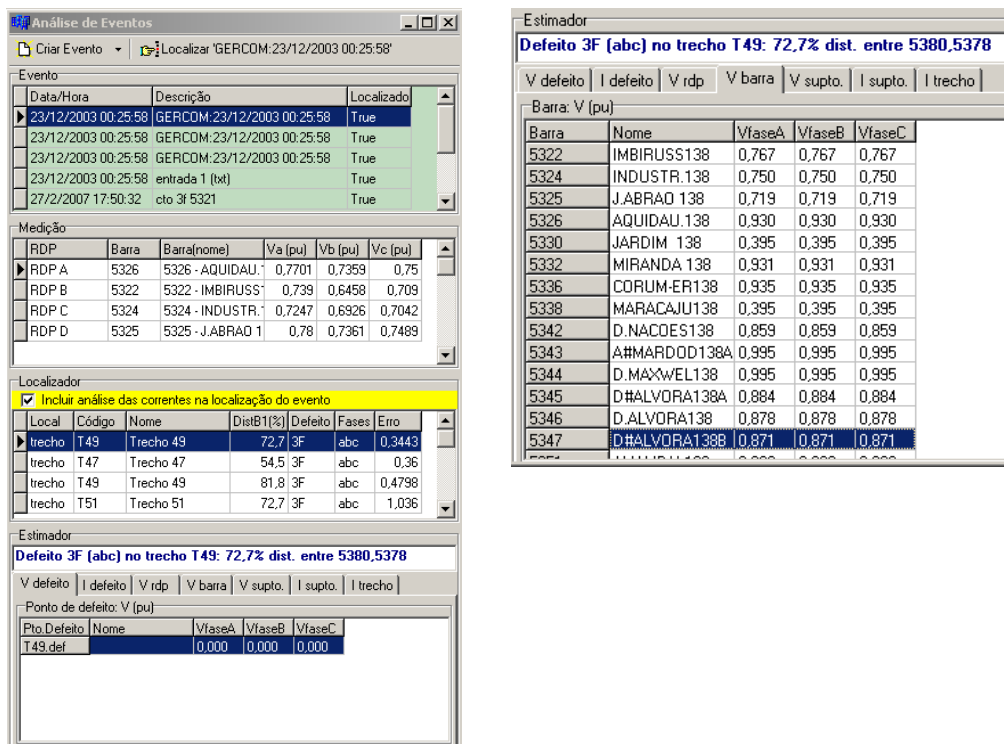
Na Figura 4 ilustram-se os resultados da simulação de uma falta ocorrida no subsistema da Figura 3. respectivamente. Numa primeira janela, são apresentados os eventos, registrados no GERCOM, que é o sistema de armazenamento de oscilografias da empresa. Na segunda janela, são apresentados os medidores (RDP), suas localizações, e módulos das tensões nas três fases, obtidas a partir de pré-processamento das oscilografias, de forma a serem determinadas as janelas de cálculo e os valores dos fasores (principalmente módulo). Na terceira janela, são apresentados os possíveis locais de ocorrência da falta, identificando dois locais possíveis no trecho 49, um local possível no trecho 47 e outro no trecho 51. A maior probabilidade de ocorrência é no trecho 49, com distância de 72,7% do total da linha, a partir da barra inicial do trecho, com erro acumulado de 0,34%.

Uma vez estabelecidos os locais mais prováveis de localização do defeito, o sistema automaticamente estima tensões nas demais barras do sistema, bem como as correntes em todos os trechos e pontos de suprimento da rede. Quando são disponibilizadas informações adicionais de medição, como é o caso de correntes monitoradas nos trechos pelos próprios RDPs, o sistema permite selecionar aquele local mais provável de falta.

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados obtidos para o sistema piloto apresentam-se bastante confiáveis, em função dos baixos desvios de tensão (medição vs cálculo) e das comparações entre locais reais de ocorrência e os obtidos pelo aplicativo.





**Figura 4. Resultado do aplicativo.**

A ferramenta é de enorme ajuda na operação do sistema, permitindo um rápido plano de restauração do sistema através de uma adequada tomada de decisões dos operadores, principalmente reduzindo os indicadores de duração da interrupção. Adicionalmente, este localizador trabalhando “quase on-line” na operação no sistema de ENERSUL, faz com que os tempos de atuação dos operadores sejam muito rápidos, o que incrementa o valor agregado ao serviço.

Quando, além das informações de oscilografias de tensão nas barras monitoradas, foram consideradas adicionalmente as correntes monitoradas em alguns circuitos, o localizador tornou-se mais eficiente quanto à aproximação do local de falta.

Para trabalhos futuros pretende-se utilizar métodos de otimização para reduzir o tempo de processamento para a localização e estimação da falta, através de estratégias utilizadas em inteligência artificial.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica: Resolução N° 24. 15 p. 27 de Janeiro de 2000.
- [2] ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica: Resolução N° 505. 11 p. 26 de Novembro de 2001.
- [3] Kleber M. S, Benemar A. de S, Núbia S. D. B, Karcus M . D, Flávio B. C, Sandra S. B. S. “Detecção e Classificação de Falhas a partir da Análise de Registros Oscilográficos via Redes Neurais Artificiais e Transformada Wavelet” **Revista Controle & Automação**, Abril, Maio e Junho 2007, Vol.18 no.2 pp. 163-171
- [4] David C, Jorge D. V. C, André C.P.L.F. de C. ”Localização de Falhas em Linhas de Transmissão de Energia Elétrica Utilizando”, **Proceedings of the IV Brazilian Conference on Neural Networks - IV Congresso Brasileiro de Redes Neurais**, 1999 – ITA, São José dos Campos - SP – Brazil, pp. 061-066, July 20-22.
- [5] Hélio A. da S, Jacques S. “Localização precisa de falhas em Linhas de Transmissão sem uso da Sequência Zero”, **XV SNTPEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**, Outubro 1999, GPC/05.