



**XX SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
GPC.01
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

**GRUPO -V
GRUPO DE ESTUDO DE PROTEÇÃO, MEDIÇÃO, CONTROLE E AUTOMAÇÃO EM SISTEMAS DE POTÊNCIA -
GPC**

ANALISADOR DE EVENTOS EM TEMPO QUASE-REAL

W. Guerra, N. Kagan, Juan C. Cebrian, J. C. Guaraldo, S. X. Duarte
Energ-ct Centro de Estudos em Regulação e Energia Elétrica
Departamento de Engenharia de Energia e Automação
Escola Politécnica - USP - São Paulo

A. Alves M.
Energias do Brasil - Enersul

RESUMO

Este trabalho apresenta a implementação de uma ferramenta (aplicativo computacional) para análise, em tempo quase real, dos eventos na rede elétrica que envolva variações momentâneas de curta duração (VTCD's). Essa ferramenta permitirá diagnosticar: as ocorrências 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 VTCD's. 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 de Distribuição Energias do Brasil (ENERSUL). Apresentam-se resultados das simulações para diferentes eventos.

PALAVRAS-CHAVE

Localizador de faltas em linhas de transmissão, Estimação de grandezas, Faltas monofásicas bifásicas trifásicas, VTCD's.

1.0 - 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. O tempo e a frequência de desligamento é regulada pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL [2] e [3], através das Resoluções 24 e 505, que definem a Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC) e a Duração Relativa da Transgressão de Tensão Precária (DRP) respectivamente. Nesse sentido, é de preocupação das concessionárias desenvolver mecanismos adequados para operar suas redes da forma mais adequada.

Este trabalho apresenta, como é a forma de monitoração quase “on-line” do método de localização de faltas implementado na rede de subtransmissão da ENERSUL, onde, após a falta uma análise mais detalhada é imprescindível para a avaliação do desempenho das grandezas do sistema, para isso, destaca-se a importância da oscilografia, que consiste do constante monitoramento das grandezas elétricas do sistema de potência e do estado de operação do sistema de proteção.

Na literatura existem vários trabalhos entre os quais estão 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 apresentar alguns resultados dos testes feitos.

2.0 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA

A rede de ENERSUL esta constituída por sub-estações (SEs) interligadas por várias linhas em tensão de 138 kV, 69 kV, 34,5 kV e 13,8 kV. O sistema de medição instalado monitora prioritariamente as tensões nas barras de 138 kV, o sistema de localização desenvolvido esta restrito à localização de faltas que ocorram entre trechos de linhas nesse nível de tensão. Quando houver informações de abertura de disjuntor que possibilite identificar defeitos em níveis de tensão inferiores e esse recurso poderá ser utilizado. Como critério inicial estabeleceu-se que serão feitas localizações de faltas em linhas entre as quais existam 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 em desenvolvimento admite que esse sistema de localização seja acionado automaticamente quando algum dos RDPs instalados registre alguma ocorrência de falta na rede. Neste caso, quando algum RDP registre 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.

3.0 - 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, mantenha umas especificações necessárias tais como:

- a. Captura de formas de onda de tensão e de corrente em 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);
- b. 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;
- c. 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;
- d. 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;
- e. Valores limites de corrente para disparo pelo valor eficaz de corrente: ajustáveis de forma independente para as correntes de fase e de neutro;
- f. Registro da forma de onda com resolução reduzida até a taxa mínima de 16 amostras/ciclo, mas preferencialmente de 64 amostras/ciclo;
- g. No início da ocorrência: registro de 30 ciclos, sendo 4 ciclos antes do instante de detecção da VMT e 26 ciclos após;
- h. 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;

- i. 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 (sobrecorrente). As principais informações fornecidas pelo processamento inicial são:

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

3.2.1. Grandezas a serem obtidas a partir das medições

As grandezas serão 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. Essas 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 de 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.

3.2.2. 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 servirão de base para a estimação de VTCDs. A definição inadequada da janela pode fornecer resultados indesejáveis.

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: Curtos equilibrados e curtos desequilibrados. Os curtos 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 dividir os curtos é considerando os curtos que envolvem a terra e os curtos que não envolvem a terra. Uma terceira forma de classificar os curtos circuitos 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 na mais adiante para logo determinar o tipo e local da falta, que são calculadas 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 determinara 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

Na secção relativa a cálculos de curto-circuito, nos casos de faltas que envolvem terra serão usadas impedâncias de defeito de 0, 1, 5, 10, 20 e 40 ohm. As faltas serão na montante do ponto de suprimento.

O localizador identificará 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, foi identificado o caso de falta a montante.

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,
- Cálculo das tensões em pontos de interesse da rede, fornecendo resultados de VTCDs estimados para a situação de falta identificada, e;

- Além dos valores das tensões, devem-se calcular as correntes dos circuitos que são monitorados.

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

Serão guardados em arquivos os valores das tensões da rede obtidos com as simulações de curto-circuito

Tabela 1. Comparação dos resultados entre AnaFas e Aplicativo

| | Barra 1 | | | Barra 2 | | | Barra 3 | | | Barra 4 | | |
|----------|---------|--------|---------|---------|--------|---------|---------|--------|---------|---------|--------|---------|
| | SisPlan | AnaFas | Erro(%) |
| Barra 1 | 0 | 0 | 0 | 0,978 | 0,9774 | -0,0006 | 0,977 | 0,9769 | -0,0001 | 0,984 | 0,9835 | -0,0005 |
| Barra 2 | 0,981 | 0,9811 | 0,0001 | 0 | 0 | 0 | 0,978 | 0,9775 | -0,0005 | 0,971 | 0,9713 | 0,0003 |
| Barra 3 | 0,527 | 0,5274 | 0,0004 | 0,452 | 0,4519 | -0,0001 | 0 | 0 | 0 | 0,291 | 0,2912 | 0,0002 |
| Barra 4 | 0,669 | 0,6687 | -0,0003 | 0,311 | 0,3111 | 0,0001 | 0,303 | 0,3027 | -0,0003 | 0 | 0 | 0 |
| Barra 5 | 0,649 | 0,6494 | 0,0004 | 0,331 | 0,3305 | -0,0005 | 0,408 | 0,4074 | -0,0006 | 0,576 | 0,5756 | -0,0004 |
| Barra 6 | 0,776 | 0,7757 | -0,0003 | 0,205 | 0,2046 | -0,0004 | 0,819 | 0,8188 | -0,0002 | 0,863 | 0,8626 | -0,0004 |
| Barra 7 | 0,204 | 0,2036 | -0,0004 | 0,775 | 0,7744 | -0,0006 | 0,939 | 0,9387 | -0,0003 | 0,954 | 0,9541 | 0,0001 |
| Barra 8 | 0,495 | 0,495 | 0 | 0,484 | 0,4842 | 0,0002 | 0,878 | 0,8783 | 0,0003 | 0,908 | 0,908 | 0 |
| Barra 10 | 0,701 | 0,701 | 0 | 0,992 | 0,9912 | -0,0008 | 0,993 | 0,9924 | -0,0006 | 0,995 | 0,9946 | -0,0004 |
| Barra 12 | 0,993 | 0,9925 | -0,0005 | 0,697 | 0,6967 | -0,0003 | 0,993 | 0,9922 | -0,0008 | 0,991 | 0,9901 | -0,0009 |

considerando 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 no decorrer de todos os pontos de cada ligação.

Uma distribuição intuitiva para as linhas seria dividí-las em 10 segmentos de trechos uniformes. Porém, como há trechos de linha de vários comprimentos, o "Localizador" poderia dividir os trechos em segmentos de 5 ou 10 ohms, por exemplo, calculando os valores a partir das informações da rede.

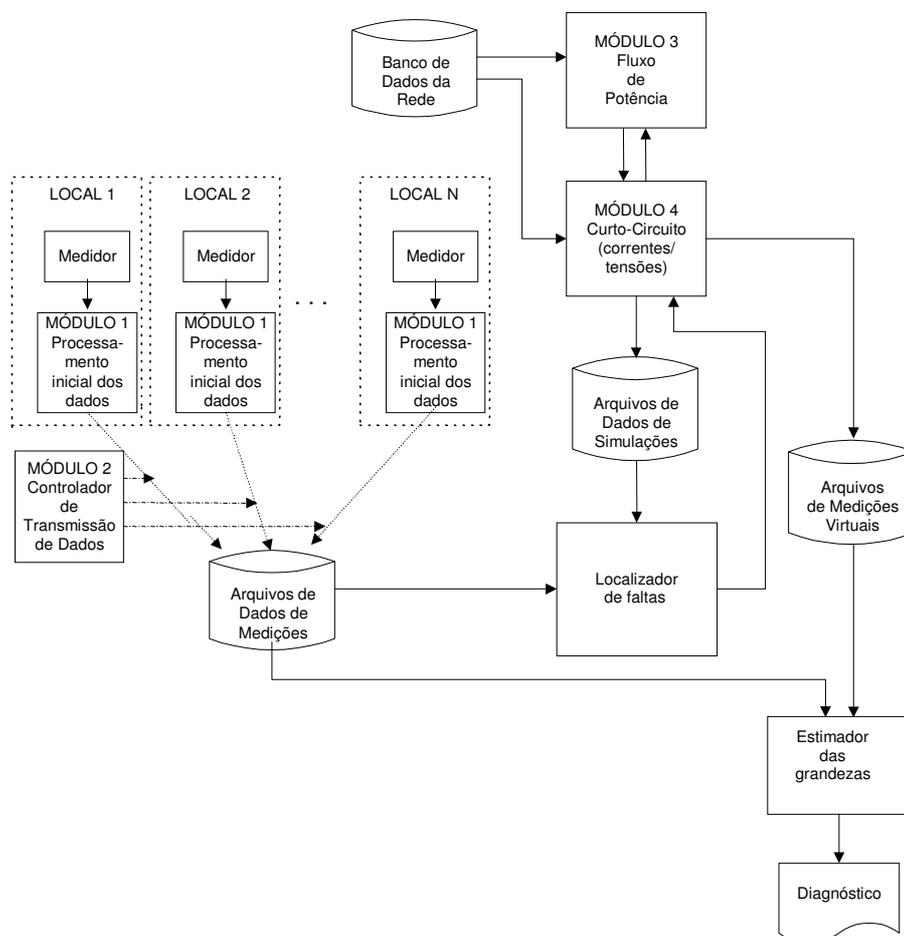


Figura 1. Fluxograma de Estimação

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 como ilustra a equação (1). 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 :

$$[\delta_i]_{f,j}^2 = \left(|V a_i^{med}| - |(V a_i^{calc})_{f,j}| \right)^2 + \left(|V b_i^{med}| - |(V b_i^{calc})_{f,j}| \right)^2 + \left(|V c_i^{med}| - |(V c_i^{calc})_{f,j}| \right)^2 \quad (1)$$

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.

4.0 - APLICAÇÃO

Este trabalho apresenta a especificação do módulo de localização de faltas para a rede de subtransmissão da ENERSUL e avaliação do impacto. 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 em barras de 138 kV, monitorando tensões em barras e correntes nos circuitos vizinhos e alocados nos seguintes pontos:

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

O Sistema de Oscilografia da ENERSUL será o responsável pelo fornecimento da forma de onda da tensão da barra onde está instalado (138 kV), muitas vezes configurado para medir também as tensões em barras de baixas de transformadores, por exemplo, 69 kV ou 34.5 kV.

Vários 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 feitos anteriormente diversas simulações do aplicativo AnaFas, e os resultados após os ajustes necessários foram considerados idênticos. Na Tabela 1 está o esboço de uma das redes utilizadas na comparação. Observa-se que a diferença dos valores calculados e valores obtidos dos registradores (erro%) estão próximo a zero.

Na Figura 3 e Figura 4, ilustra-se a tela do aplicativo desenvolvido, assim como resultados da simulação de uma falta respectivamente. Como se pode ver tem-se três locais prováveis.

Na tabela 4, pode ver-se os valores das tensões durante a falta e o trechos prováveis onde aconteceu a falta, que são trecho 49, 47, 49 ou 51. Apresentando maior probabilidade o trecho 49 com um erro aproximado de 0,34%. Tem-se também a estimativa dos valores das grandezas como são as correntes e as tensões nas demais barras do sistema, ilustrando-se só parte dos valores na Figura 4.

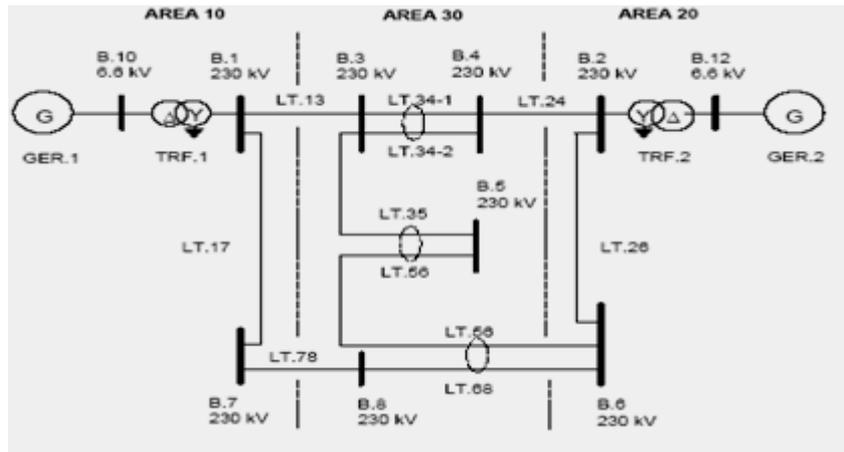


Figura 2. Sistema de 138 kV.

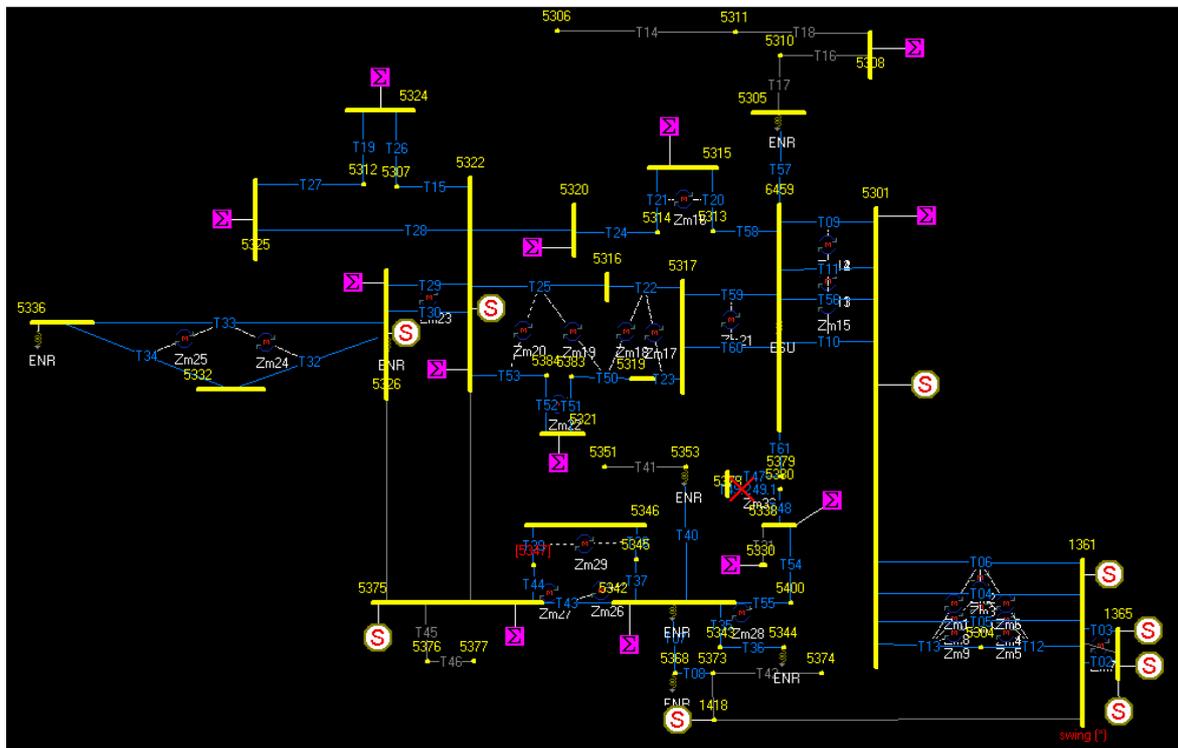


Figura 3. Sistema de ENERSUL.

5.0 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As grandezas calculadas através do fluxo de potência utilizando metodologia de cálculo comparada com os valores extraídos dos registradores são muito confiáveis. Os erros estão próximos a zero.

Os resultados obtidos para o sistema piloto foram confiáveis, porque o localizador determinou um mínimo de locais com seus respectivos desvios. O que faz que o aplicativo seja de enorme ajuda na operação do sistema, permitindo um rápido plano de restauração do sistema através de uma adequada toma de decisões dos operadores, principalmente reduzindo o DEC.

Adicionalmente este localizador trabalha quase on-line na operação no sistema de ENERSUL, faz que com que os tempos de atuação dos operadores sejam muito rápidos, o que incrementa o valor agregado ao serviço.

As informações obtidas das correntes monitoradas em alguns circuitos, fizeram ao localizador ser mais eficiente na aproximação do local de falta.

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

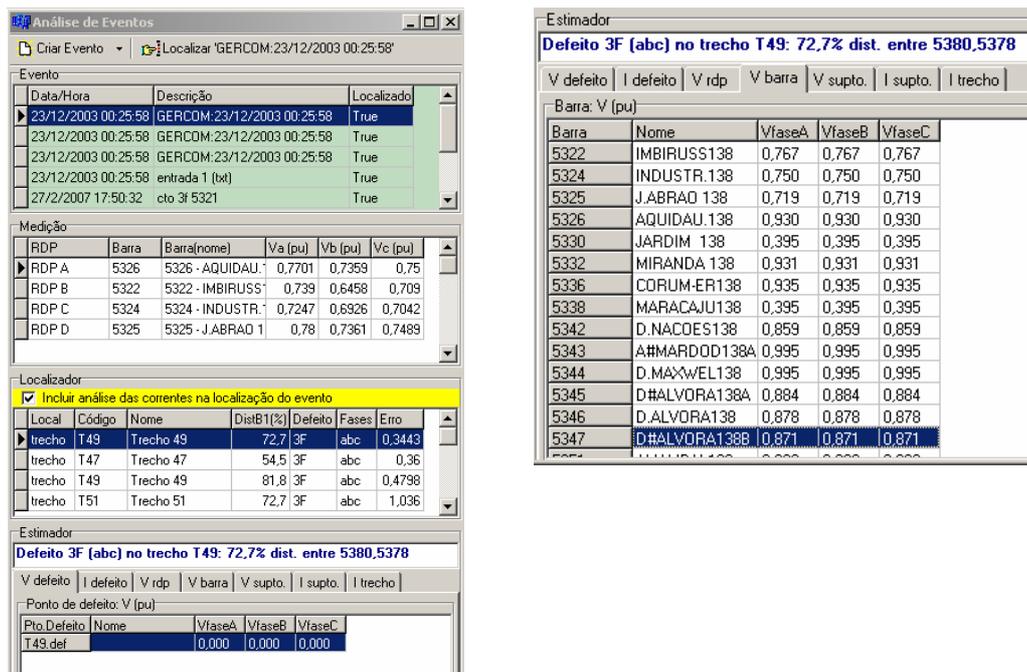


Figura 4. Resultado do aplicativo.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica: Resolução Nº 24. 15 p. 27 de Janeiro de 2000.
- (2) ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica: Resolução Nº 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 SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Outubro 1999, GPC/05.