



## **Estudo, Projeto e Desenvolvimento de um Sistema para Localizar Falhas em Redes de Distribuição**

<b>Paulo S. Pereira, PhD</b>	<b>Marcos V. C. Rosa</b>	<b>Gustavo E. Lourenço</b>	<b>Paulo S. Pereira Junior</b>	<b>Cristiano M. Martins</b>	<b>Rodrigo R. Rosa</b>	<b>Elias F. de Azeredo</b>
<b>Conprove Indústria e Comércio</b>	<b>Escelsa Energias do Brasil</b>					
psp@conprove.com.br	conprove@conprove.com.br	conprove@conprove.com.br	conprove@conprove.com.br	conprove@conprove.com.br	conprove@conprove.com.br	eliasfa@enbr.com.br

### **Palavras-chave**

Coordenação e Seletividade de Dispositivos de proteção  
Localização de faltas em redes de distribuição de energia  
Redes de distribuição

### **Resumo**

Este trabalho apresenta uma nova técnica para localizar faltas em redes de distribuição, utilizando como recursos: a topologia da rede que normalmente é armazenada no COD, os ajustes de proteção e a leitura da oscilografia da falta que fica gravada nos relés de proteção numéricos. O software importa os arquivos no formato COMTRADE e, a partir daí, utilizando rotinas dedicadas ele identifica o tipo de falta e o local da rede onde ela está localizada. O software combina vários critérios para identificar o ponto de falta incluindo: a potência que foi perdida com a falta, a reatância medida, a corrente de curto, se houve ou não religamento na rede, e o tempo que a proteção atuou. Este tempo é obtido pelo software que coordena a rede através da análise das curvas dos dispositivos de proteção.

### **1. INTRODUÇÃO**

As concessionárias distribuidoras de energia elétrica estão focando a melhoria dos indicadores de qualidade de energia, de modo a oferecer o melhor produto a seus clientes. Atualmente as empresas de distribuição possuem as redes instaladas no seu COD através de coordenadas georeferenciadas. Baseando-se nesta premissa, foi desenvolvido um importador que permite a migração da topologia com todos os dados da rede a um software dedicado, que realiza a coordenação e seletividade da proteção do sistema. As redes de distribuição contêm um número grande de dispositivos para proteção de transformadores e para proteção de ramais como chaves fusíveis, religadores e disjuntores, fazendo

com que o trabalho da coordenação e seletividade seja muito especializado e muito volumoso, consumindo muitas horas de especialistas que trabalham dedicadamente nesta função. Além disso, a capilaridade das redes de distribuição dificulta a localização de defeitos e, visando contribuir neste tópico, muitos trabalhos têm sido publicados 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7.

As técnicas para realizar a coordenação e seletividade são conhecidas e divulgadas na literatura 8, 9, 10, 11. Assim, um software que integra o sistema foi desenvolvido para realizar automaticamente a coordenação e a seletividade da rede. Utilizando a topologia da rede, a localização e os ajustes dos dispositivos de proteção (chaves fusíveis, disjuntores, religadores), os dados da rede (potências das cargas instaladas e impedâncias) e o arquivo COMTRADE gravado no relé numérico da entrada do alimentador, o software é capaz de identificar o local do defeito.

## 2. DESENVOLVIMENTO

### 2.1. A Captação dos Dados de Falta

A Figura 1 ilustra as possíveis formas de se obter os dados a partir do COD. Esses dados podem ser obtidos do relé numérico na entrada do alimentador ou através de um oscilógrafo digital. A captação dos dados é realizada pelo operador a partir da rede da empresa.

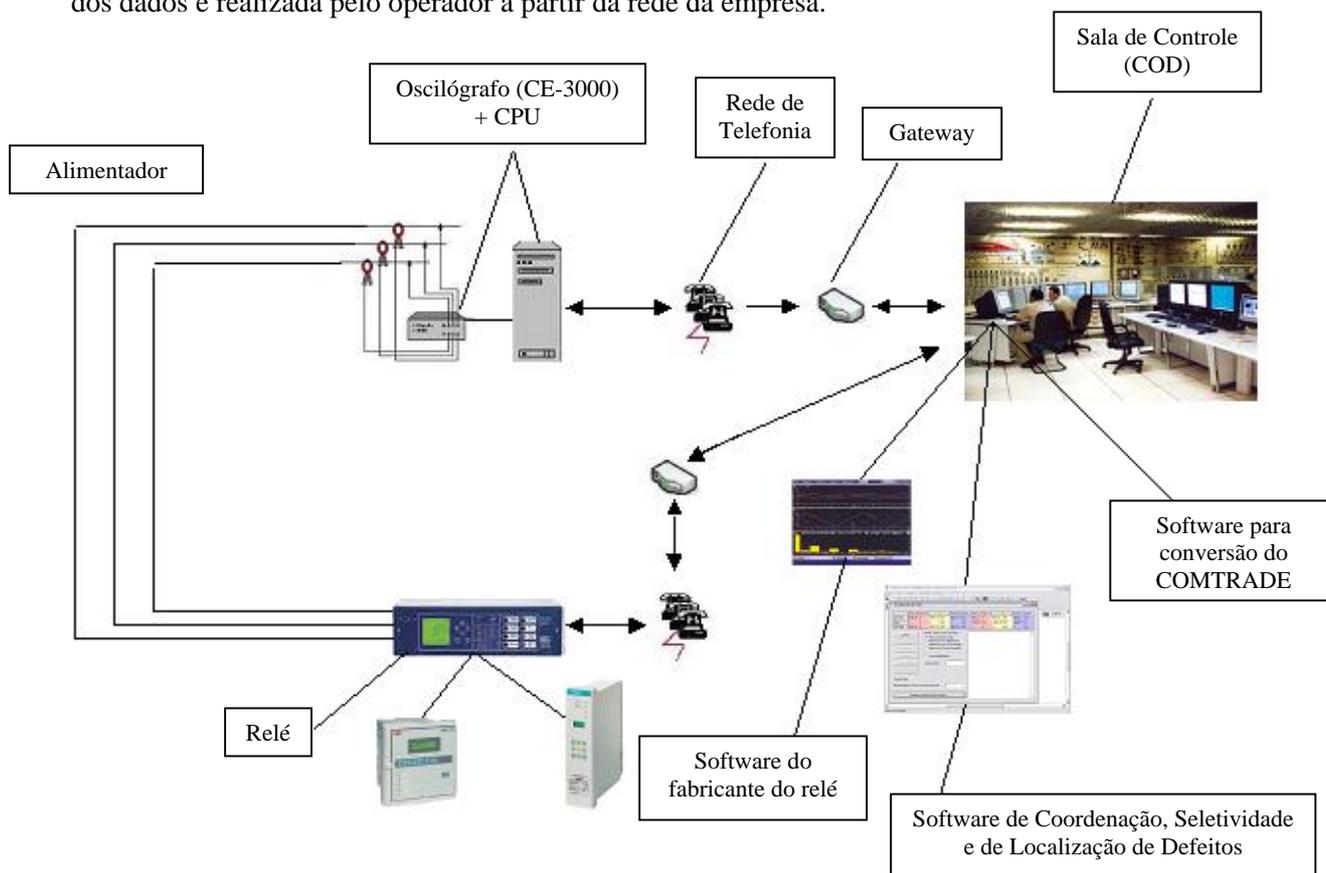


Figura 1 - Captação dos dados da falta

A Figura 2 ilustra sinais de falta que foram captados de um relé numérico Siemens Modelo 7SJ531 através do software DIGSI IV produzido pela Siemens. Os dados contidos no arquivo estão em Formato COMTRADE e, para viabilizar a leitura foi desenvolvido um leitor de COMTRADE. Após a leitura do arquivo COMTRADE, é feita a identificação dos períodos pré-falta, durante a falta e pós

falta. Após a identificação dos períodos é que se passa a calcular para cada um os valores RMS e ângulos de fase que serão usados posteriormente.

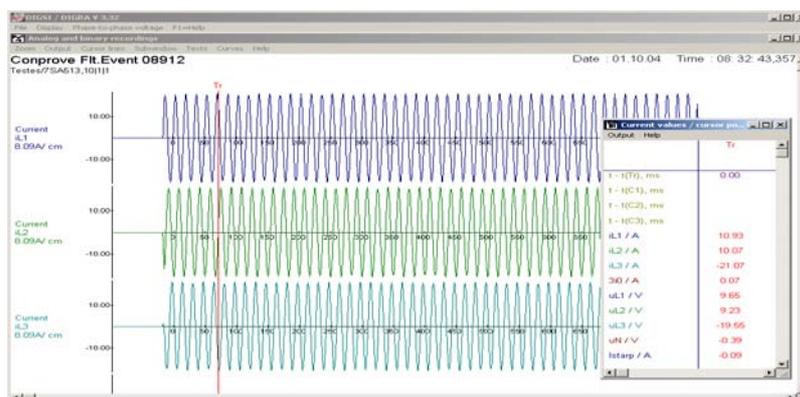


Figura 2 - Arquivo de Oscilografia lido de um relé numérico

A oscilografia COMTRADE é armazenada em até três tipos de arquivos que trazem diferentes informações referentes ao sinal. Eles são apresentados abaixo, sendo que os dois primeiros são sempre necessários para a leitura dos dados, devendo ter sempre o mesmo nome, mudando apenas a extensão, e estar sempre no mesmo diretório:

- Arquivo de extensão ".cfg", que traz informações sobre a configuração da aquisição, como data, hora, nomes dos canais amostrados, frequência de amostragem, etc.
- Arquivo de extensão ".dat", traz as formas de onda amostradas de acordo com o arquivo de configuração.
- Arquivo de extensão ".hdr", que é apenas um arquivo de cabeçalho, que às vezes nem é utilizado, e as informações são dispensáveis para a extração dos dados.

O leitor de COMTRADE permite ler as informações do arquivo e a apresentação simultânea de até seis formas de onda, conforme mostram as Figuras 3 e 4 abaixo:

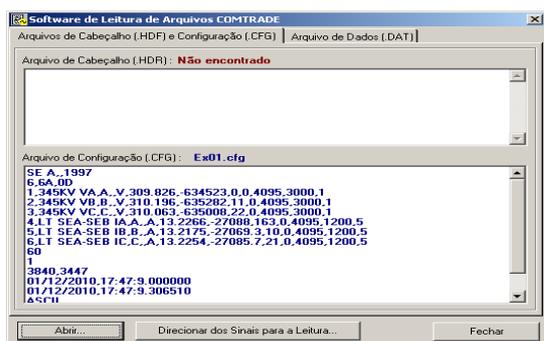


Figura 3 - Tela de informações gerais dos arquivos COMTRADE

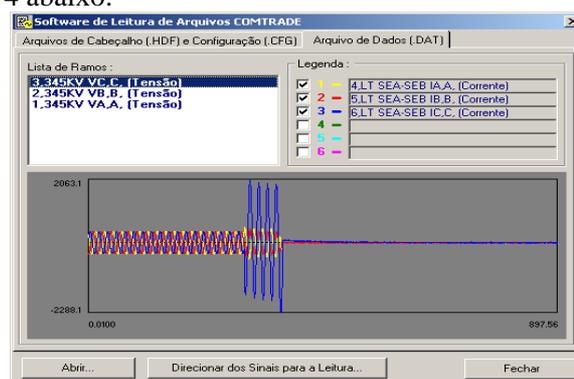


Figura 4 - Tela com a forma de onda lida do arquivo COMTRADE

## 2.2. Identificação dos Períodos Pré, Durante e Pós Falta

Para ilustrar a metodologia utilizada será adotada a Figura 5 na qual o curto da fase A para terra ficou presente menos de 2 ciclos.

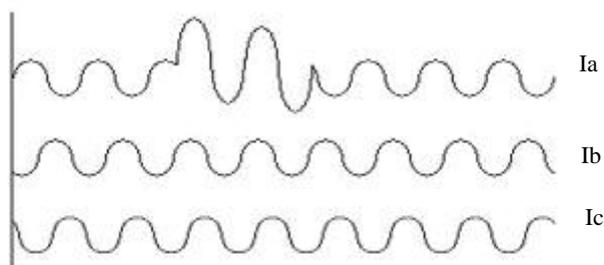


Figura 5 - Forma de onda das correntes durante um curto da fase A para terra

O algoritmo realiza as seguintes tarefas:

2.2.1. Identificação do sinal a ser usado na análise preliminar:

O software percorre as formas de onda de corrente e identifica aquela que apresenta o maior valor de pico. As análises para identificar os períodos são realizadas usando-se o sinal da fase que apresenta maior amplitude.

2.2.2. Identificação dos valores RMS máximos e mínimos e onde ocorrem:

O software separa o sinal em semiciclos e ciclos completos. No exemplo tem-se 16 semiciclos e 16 ciclos completos. Para a determinação dos ciclos completos, a contagem é feita usando-se de início os dois primeiros semiciclos e para calcular os ciclos completos seguintes o método descarta o semiciclo anterior e agrega um novo semiciclo. O último é então repetido, com a polaridade invertida, visando fazer com que o número de semiciclos seja igual ao de ciclos completos. Criam-se então dois vetores com os valores dos módulos calculados que são para o semiciclo ModSC (1 a 16), e para o ciclo completo ModCC (1 a 16). A Figura 6 ilustra o método descrito. Os cálculos são feitos a partir da fórmula do valor RMS verdadeiro. Para o exemplo, os valores calculados para o semiciclo e ciclo completo são:

$$\text{ModSC} = \{5, 5, 5, 5, 7, 22, 17, 16, 13, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5\}; \text{ índices de 1 a 16}$$

$$\text{ModCC} = \{5, 5, 5, 6, 9, 15, 15, 14, 9, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5\}; \text{ índices de 1 a 16}$$

Analisando-se os valores obtidos com o cálculo dos valores RMS, percebe-se que o cálculo pelo 1/2 ciclo permite identificar mais rapidamente a entrada da falta, enquanto que o método de ciclo completo identifica mais rapidamente o término da falta.

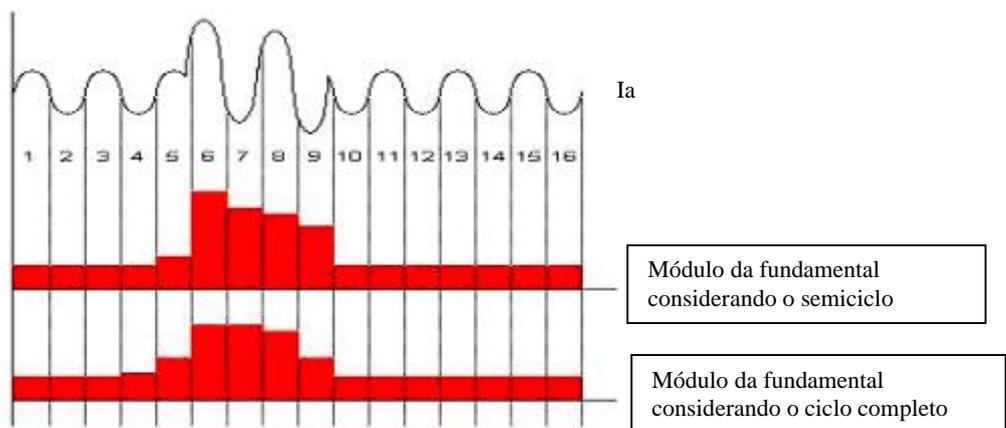


Figura 6 - Determinação dos valores de amplitude RMS pelo método de semiciclo e ciclo completo

### 2.2.3. Identificação do ponto onde iniciou e terminou a falta dentro do semiciclo encontrado

Identificado o semiciclo onde a falta iniciou e terminou, realiza-se a derivada da função nesses semiciclos para encontrar o exato momento onde a falta ocorreu. O ponto exato é onde a derivada da função apresenta o valor máximo. As Figuras 7 e 8 ilustram o descrito. Caracterizados os períodos de pré falta, durante a falta e pós falta, recorre-se à TDF para determinar os valores RMS e ângulos das tensões e das correntes em cada um dos períodos. Esses valores calculados são posteriormente usados nas rotinas de localização de defeitos.

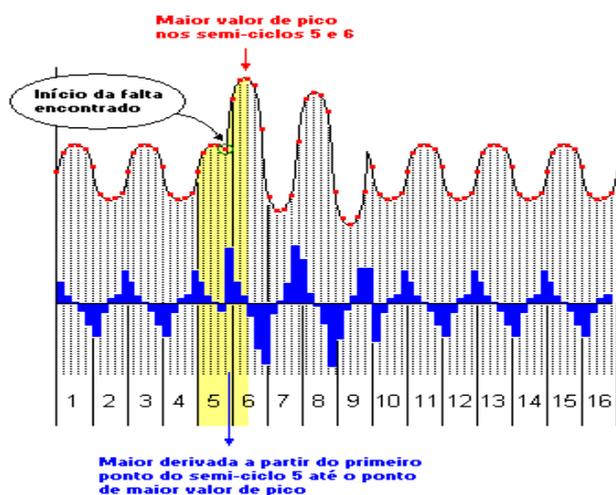


Figura 7 - Identificação do Início da falta

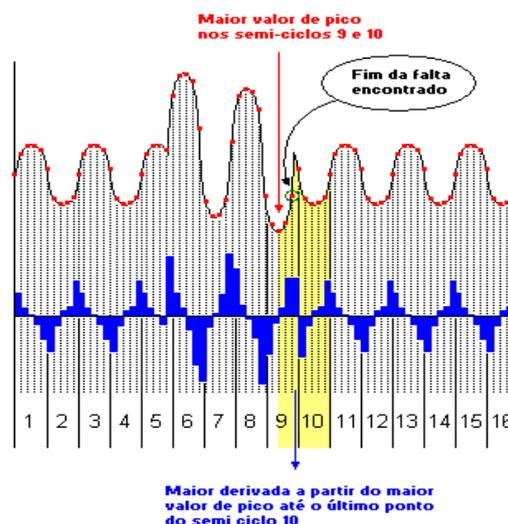


Figura 8 - Identificação do Fim da Falta

### 2.3. Testes da Metodologia de Identificação de Tipo de Faltas

O software de identificação de faltas foi testado utilizando-se centenas de arquivos de ocorrências reais de defeitos e seu desempenho foi preciso em todos os casos. A verificação do desempenho foi conduzida pelos pesquisadores analisando-se caso a caso as formas de onda testadas usando o software DIGSI-Siemens, onde, pela inspeção da forma de onda de oscilografia, foi possível identificar e comprovar os tipos de defeitos que ocorreram.

### 2.4. Metodologia de Localização de Defeitos

A partir dos valores RMS e ângulos de fase das tensões e correntes nos períodos de pré-falta, durante a falta e pós-falta, calculados a partir do registro de oscilografia, e, com base na topologia da rede, das informações das cargas instaladas no alimentador e nos ajustes dos dispositivos de proteção, foram feitas várias rotinas cuja decisão de localização de falta é a composição dos vários critérios, que são:

- Pelas perdas de potência
- Pelo nível de corrente de curto
- Pelo cálculo da reatância da linha durante o curto
- Pela avaliação do religamento
- Pelo tempo de atuação das proteções

Cada uma dessas rotinas tenta definir por critérios de peso (indicadores de probabilidade) quais os dispositivos de proteção com maior probabilidade de terem atuado devido à falta. Quando se combinam as várias rotinas, os pesos (probabilidades) são somados, de modo a evidenciar aquele dispositivo de proteção da rede com maior probabilidade entre todos.

### 2.4.1. Preparação Inicial Para Aplicação dos Critérios

Antes de aplicar os critérios, o software identifica o tipo de falta e separa para o período de falta a parcela que representa a carga e a que representa a falta com a metodologia abaixo descrita.

### 2.4.2. Os fundamentos do método

As correntes e tensões oscilografadas contêm os três períodos:

- a- Antes da Falta
- b- Durante a Falta
- c- Pós Falta

Salienta-se que o sistema foi concebido para localizar faltas, visando auxiliar a operação do sistema, isto é, faltas que provoquem atuação das proteções, que são os fusíveis, religadores e disjuntores, e assim, presumindo a existência de sobrecorrentes, que promovam o desligamento. O sistema não foi concebido para detectar os casos de falta de alta impedância, na qual a corrente de falta não provoca a atuação dos dispositivos de proteção.

Conhecendo-se as grandezas medidas que caracterizam os períodos antes, durante e pós falta, a modelagem abaixo permite a identificação de componentes desejadas:

#### 2.4.2.1. A técnica de compensação da corrente de carga

Muitos trabalhos estão disponíveis na literatura, discutindo a modelagem dos vários tipos de carga (carga com potência constante, carga que varia com o quadrado da tensão, carga que varia linearmente com a tensão e etc.) visando expressar este problema com maior profundidade. Tais modelagens implicam também em maior complexidade na obtenção de dados que não estão facilmente disponíveis, tornando a solução do problema de difícil implementação.

Neste trabalho as cargas foram consideradas majoritariamente do tipo impedância constante, que, para iluminação incandescente, é uma modelagem razoável. Considerou-se ainda que, do ponto onde a falta ocorreu para frente, a tensão fica muito baixa, e, portanto, desprezou-se a corrente solicitada pela carga a partir deste ponto.

Como o método utiliza na sua concepção os valores de corrente medidos na entrada do alimentador, a consideração de impedância constante resultou em grande simplificação e apresentou bons resultados. Conhecendo-se a corrente de pós falta (determinada a partir da corrente oscilografada), a parcela de corrente de carga que estará contida na corrente que circula durante o período de falta é obtida como indica a equação (13).

#### 2.4.2.1.1. Sistema Antes da Falta (AF)

$$I_{c1}^{AF}, I_{c2}^{AF}, I_{c3}^{AF}, I_{c4}^{AF} \dots \dots \dots (1)$$

$$I_c^{AF} \dots \dots \dots (2)$$

$$V_b^{AF} \dots \dots \dots (3)$$

$$\frac{V_b^{AF}}{I_c^{AF}} = Z_{eq} = \left( \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} + \frac{1}{Z_4} \right) \dots \dots \dots (4)$$

A figura 14 ilustra o sistema antes da falta

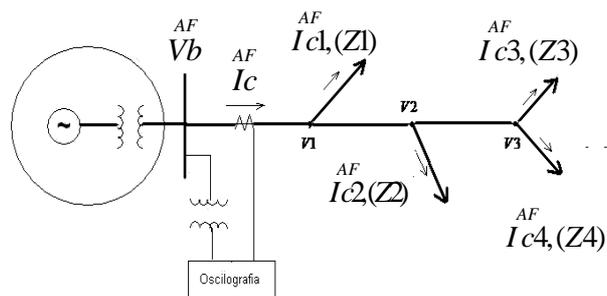


Figura 14 – Modelagem Antes da Falta

2.4.2.1.2. Sistema Pós Falta (PF)

As variações nas correntes de carga  $I_{c1}^{PF}, I_{c2}^{PF}, I_{c3}^{PF}$ , estão associadas à variação da tensão na barra. Na prática elas dependem das tensões nos pontos, todavia o efeito equivalente será associado à variação da tensão no ponto de medição.

$$\frac{V_b^{PF}}{I_c^{PF}} = Z_{eq}^{PF} = \left( \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} + 0 \right) \dots \dots \dots (5)$$

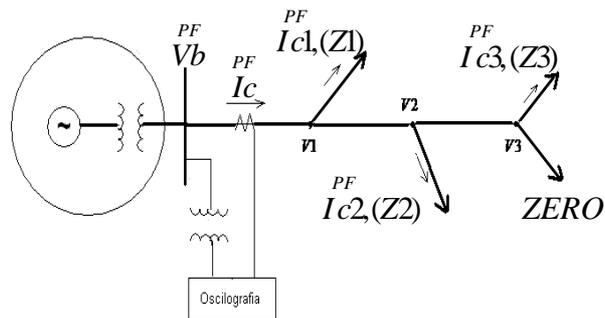


Figura 15 – Modelagem Pós Falta

A Figura 15 ilustra o sistema após a falta.

2.4.2.1.3. Sistema Durante a Falta (DF)

Se a tensão na barra de entrada muda durante a falta as correntes das cargas mudam para:

$$I_{c1}^{DF}, I_{c2}^{DF}, I_{c3}^{DF} \dots \dots \dots (6)$$

$$I_{c4}^{DF} = 0, \text{ no entanto, } \dots \dots \dots (7)$$

$$\text{aparece } I_f^{DF}(\text{falta}) \dots \dots \dots (8)$$

$$I_c^{DF} = I_{c1}^{DF} + I_{c2}^{DF} + I_{c3}^{DF} = \frac{V_b^{DF}}{Z_{eq}^{DF}} \dots \dots \dots (9)$$

$$I(\text{medida})^{DF} = I_c^{DF} + I_f^{DF}(\text{medida})$$

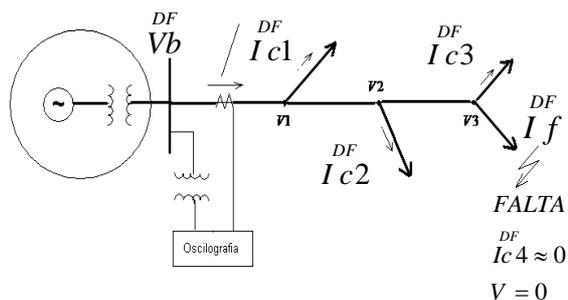


Figura 16 – Modelagem Durante a Falta

Onde:

$$Z_{eq}^{DF} = \left( \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} \right) \dots \dots \dots (10)$$

$$I_f^{DF} = \text{corrente de falta} \dots \dots \dots (11)$$

A Figura 16 ilustra o sistema durante a falta.

Observa-se pelas equações (5) e (10) que a impedância da carga equivalente durante a falta e pós falta foram modeladas com o mesmo valor.

$$Z_{eq}^{DF} = Z_{eq}^{PF} = \frac{V_b^{DF}}{I_c} = \frac{V_b^{PF}}{I_c} \dots\dots\dots(12)$$

A corrente é que muda devido à alteração no valor da tensão. Assim, conhecendo-se a grandeza de tensão, que é obtida na entrada do alimentador, durante a falta e pós falta, e a corrente de carga medida no período pós falta, pode-se estimar a componente de carga pela equação (13).

$$I_c = I_c \times \left( \frac{V_b^{DF}}{V_b^{PF}} \right) \dots\dots\dots(13)$$

Conhecendo-se a corrente medida durante a falta, que contém a componente referente à falta e à carga, e a corrente de carga durante a falta dada pela equação (13), pode-se determinar a corrente de falta  $I_{f_{medida}}$ .

$$I_{f_{medida}} = I_{(medida\ na\ entrada\ do\ ali\ mentador)}^{DF} - I_c \dots\dots\dots(14)$$

Para as análises que serão feitas com a rede modelada no computador a corrente  $I_f$  (calculada) é obtida sem a corrente de carga e, assim, deverá ser comparada com a corrente medida como indicado na equação (14) acima.

Os valores de módulo e ângulo das tensões e correntes (antes, durante e pós falta) são calculados por algoritmos dedicados. Utiliza-se transformada discreta de Fourier de ciclo completo quando o sinal captado contém um ou mais ciclos, e Fourier com janela de 1/2 ciclo para calcular quando o sinal contiver menos que um ciclo de informação.

#### 2.4.3. Algoritmo de Localização pelo Critério da Perda de Potência durante a Falta.

Usando a topologia da rede e a informação das potências das cargas instaladas em cada ponto da rede, o software avalia durante a abertura de um determinado ponto da rede a quantidade de carga que será desligada. Para tal, o software se baseia na informação da corrente antes da falta e depois da falta, que são extraídas do sinal oscilografado que é obtido do relé numérico. A diferença nas correntes antes e pós falta multiplicada pela tensão representa o valor da carga perdida pela abertura da proteção. A análise é feita por fase. O software constrói uma lista dos possíveis dispositivos que, ao abrirem, retirariam este valor de potência. São atribuídos pesos maiores aos que mais se aproximam do valor estimado e pesos menores aos menos próximos, representando a maior probabilidade de um dispositivo ser do que o outro.

#### 2.4.4. Algoritmo de Localização pelo Critério da Corrente de Curto

Este algoritmo primeiramente identifica se a falta teve ou não contato para a terra. Se não houve contato para a terra o software exclui a parcela de carga da corrente de falta, como acima descrito e, com esse valor, busca os possíveis pontos que possam produzir aquela corrente de falta. No entanto, se ocorreu contato para a terra, o programa faz a primeira aproximação usando o valor da reatância medida visando encontrar os locais onde a falta pode ter ocorrido. A partir destes locais o programa adiciona valores à resistência, simulando a resistência de falta, e o ângulo da impedância medida é o

fator de convergência. Fatores de peso são também aplicados visando selecionar os pontos de maior e menor possibilidade.

#### 2.4.5. Algoritmo de Localização pelo Critério da reatância durante o curto.

Este algoritmo baseia-se no valor da reatância obtida a partir dos valores de tensão e corrente de falta. Conhecidos os valores de tensão, corrente e o ângulo, determina-se a reatância. O programa inicia então a busca por todos os possíveis pontos na qual a reatância medida a partir da entrada do alimentador apresente aquele valor ôhmico. Valores de peso são também adotados no processo.

#### 2.4.6. Implementação do Algoritmo pelo Critério de Religamento

A avaliação se houve ou não religamento é feita a partir das análises das oscilografias. Quando é identificado que houve religamento, um peso alto é atribuído apenas aos dispositivos que estão abaixo dos religadores e aos próprios religadores. Este peso tem a intenção de isolar dos possíveis pontos os dispositivos que estão fora dos trechos nos quais o religamento ocorreu. O peso atribuído aos que se enquadram no critério de religamento é 10 vezes maior que os dos outros que não se enquadram no critério, sendo assim um fator preponderante.

#### 2.4.7. Algoritmo pelo Critério do Tempo de Atuação da Proteção

Este é, sem dúvida, um novo, importante e sofisticado agregado na localização da falta pois requer a informação dos ajustes e das curvas dos dispositivos de proteção que estão instalados na rede. A partir da amplitude da corrente de falta (sem a carga) e do tempo de atuação da proteção obtidos pela oscilografia, utiliza-se as curvas dos dispositivos de proteção e identifica-se os possíveis componentes que operariam naquele tempo. Neste critério a coordenação da proteção é indispensável para a localização de falta. Novamente pesos são atribuídos e valorizam mais aqueles que estão mais próximos dos valores buscados.

### 2.5. Resultados de Testes Usando Arquivos Captados por um Oscilógrafo

O arquivo de oscilografia é referente à subestação CAMBURI, onde o alimentador CM03 foi analisado. A rede referente a este alimentador encontra-se na Figura 17, e o fusível que atuou durante um curto trifásico é o **Fusível “20001002627”**. A rede já se encontra coordenada, portanto, acessamos o modo de localização de defeito do software através do menu “Ferramentas” e o arquivo de oscilografia foi integrado ao software, como ilustrado na Figura 18.

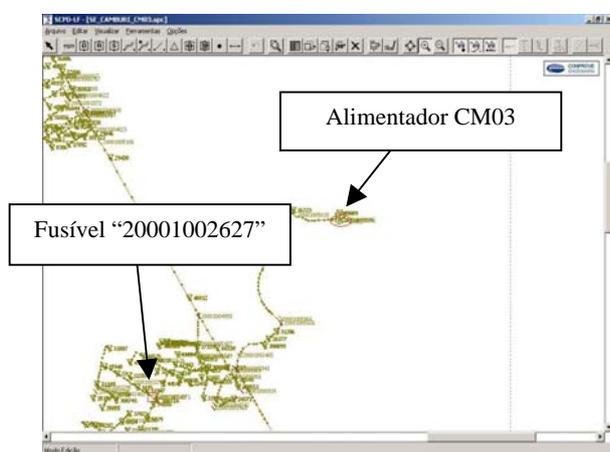


Figura 17 - Ilustração da rede usada nos testes

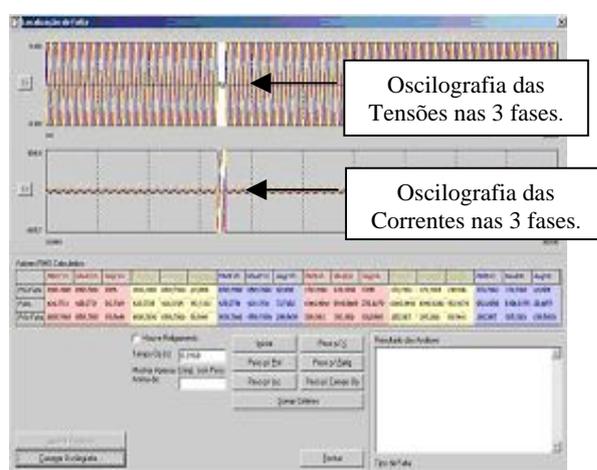


Figura 18 - Sinal de Oscilografia importado para o software

Trata-se de uma falta trifásica e os próximos itens irão apresentar os resultados obtidos pelos vários critérios acima descritos. Posteriormente eles serão somados de modo a definir o local de maior probabilidade.

### 2.5.1. Resultado pelo Critério de Peso da Corrente de Curto

O software identificou o tipo de falta corretamente e o fusível onde o curto ocorreu foi identificado na lista com peso máximo, como apresentado na Figura 19.

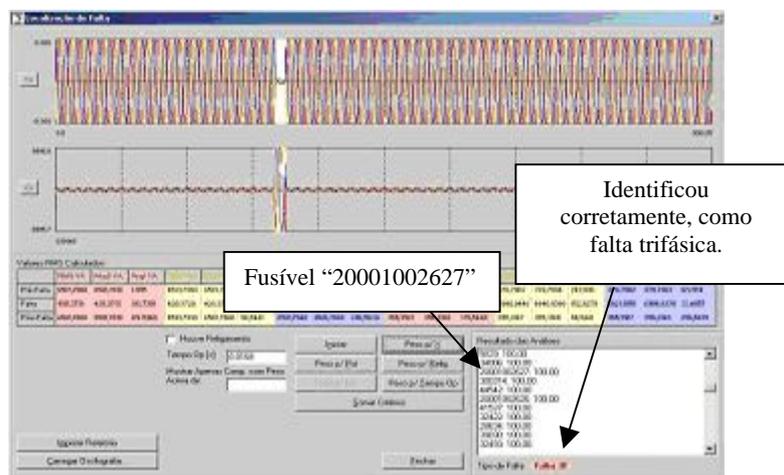


Figura 19 - Resultado pelo Critério de Peso por Corrente

### 2.5.2. Resultado pelo Critério de Peso pela Perda da Potência

Pelo critério da potência perdida devido à atuação do fusível "20001002627", ele aparece em 1º na lista como indicado na Figura 20.



Figura 20 - Resultado pelo Critério de Perda da Potência

### 2.5.3. Resultado pelo Critério de Peso pela Reatância X medida durante a falta

Alguns dispositivos foram identificados com pesos iguais, e o fusível "20001002627" encontra-se entre os que ficaram com o maior peso na lista da Figura 21.



O exemplo acima ilustrou que o programa identificou corretamente o dispositivo com maior possibilidade de ter sofrido a falta.

### **3. CONCLUSÕES**

O trabalho apresenta o estudo, projeto e o desenvolvimento de um sistema de localização de faltas em redes de distribuição, que importa dados do COD, realiza a coordenação da rede, e tem por objetivo auxiliar as pessoas que trabalham na operação na identificação dos locais onde ocorrem os defeitos. A partir do COD o operador comunica-se com o relé pela rede da empresa e obtém o sinal de oscilografia de falta em formato COMTRADE (que é o formato gravado nos relés numéricos). O sistema foi exaustivamente testado sob diferentes situações, resistências de falta e tipos de faltas, e os resultados mostraram-se bastante confiáveis.

### **4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- 1 P. Jarvetausta & outros: Using Fuzzy sets do Model the uncertainty in the Fault location process of Distribution Network,IEEE Transctions on Power Delivery,Vol 9,N.2 April 1994
- 2 Seung-Jae Lee & outros: An intelligent and Efficient Fault Location and Diagnosis Scheme for Radial distribution System,IEEE Transctions on Power Delivery Vol19 N.1 April 2004
- 3 Giovanni Manassero Jr & outros: Sistema Automatizado para localização de Faltas, VII STPC-28 de Junho a 1 de Julho de 2005 – Rio de Janeiro.
- 4 Eduardo Gonzaga da Silveira & Clever Pereira : Localização de Faltas em Linhas de Transmissão utilizando dados de Tensão e Corrente de um Terminal ,XVI SNPTEE 21 a 26 de Outubro de 2001-GPC/015
- 5 Jun Zhu & outros: Automated Fault Location and Diagnosis on Electrical Power Distribution Feedes, IEEETransctions on Power Delivery, Vol 12,N.2 April 1997
- 6 Mario Oleskovi Denis Vinicius & outros: Um Esquema Completo para Detecção ,Classificação e localização de Faltas em Linhas utilizando Redes Neurais ,XVI SNPTEE, 21 a 26 de Outubro de 2001, Campinas- S. Paulo-GPC /021
- 7 Edson Aparecido Goesw & outros; Uma abordagem baseada em redes Neurais Artificiais para Identificação de Trechos Submetidos a Curtos-Circuitos em Sistema de Distribuição, XVI SNPTEE 21 a 26 de Outubro de 2001-Campinas S.Paulo . GPC?001.
- 8 Gieger Sergio, Proteção de Sistemas de Distribuição, Porto Alegre: Sagra Editora ,1988
- 9 Eletrobrás, Proteção de Sistemas Aéreos de Distribuição, vol II. Rio de Janeiro: Campus, 1982
- 10 Cipoli José Adolfo -Engenharia de Distribuição, Quality Editora 1993
- 11 Sanderson J V H –IEE 1997, Developments in Power System Protection, Conference Publication 434