

Um Sistema de Detecção e Localização de Falhas de Alta Impedância

Benemar A. Souza, Núbia S. D. Brito, George R. S. Lira, Wellinsílvia C. Santos, José A. C. B. da Silva, J. P. P. Andrade, Flávio B. Costa, Marcelo R. C. Paes Jr.

Resumo – O produto final de um Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento – P&D desenvolvido pelo Grupo de Sistemas Elétricos – GSE do Departamento de Engenharia Elétrica – DEE da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG para o Grupo Energisa é apresentado. Trata-se de um *software*, denominado de ANFAI, que aplica redes neurais artificiais e transformada wavelet para detectar e localizar faltas de alta impedância em sistemas de distribuição de energia elétrica. Atualmente, o *software* está instalado em escala piloto em um dos alimentadores da distribuidora Energisa Borborema/PB.

Palavras-chave – Falta de alta impedância, redes neurais artificiais, transformada wavelet.

I. INTRODUÇÃO

Conceitualmente, sistema de distribuição de energia elétrica (SDEE) compreende instalações e equipamentos elétricos pertencentes a uma distribuidora em sua área de concessão, inclusive às demais instalações de distribuição e de transmissão, contratualmente disponibilizadas à distribuidora, não integrantes da rede básica [1]. Conforme Artigo 22 do Código de Defesa do Consumidor [2], as distribuidoras são obrigadas a fornecer serviços adequados, eficientes, seguros e, quanto aos essenciais, *contínuos*. Dentre esses parâmetros, a *continuidade* de serviço é considerada como sendo da maior relevância, visto que afeta o cotidiano das pessoas e causa grandes transtornos por comprometer serviços essenciais ao consumidor.

A continuidade corresponde ao grau de disponibilidade de energia elétrica ao consumidor. O ideal é que não haja interrupção no fornecimento de energia elétrica, ou, se houver que seja mínima e informada ao consumidor em tempo hábil, a fim de prevenir possíveis prejuízos decorrentes da falta de energia. Entretanto, os consumidores estão sujeitos a interrupções no fornecimento de energia, em decorrência de defeitos e também da execução de serviços de manutenção

preventiva na rede. Dentre os defeitos, os mais preocupantes são as *faltas*, que levam a desligamentos não-programados dos componentes, provocadas por problemas de natureza elétrica, mecânica ou térmica, originadas das condições adversas às quais o sistema está sempre sujeito.

Na prática, as faltas são causadas por rompimentos dos cabos em linhas ou por falhas nos equipamentos. Algumas faltas podem ser evitadas através da manutenção programada dos equipamentos, no entanto, a maioria das faltas é ocasionada por fenômenos naturais, tais como: raios, acumulação de poeira nos isoladores, chuvas ou ventos fortes e queimadas. Vandalismo também pode ser a causa de alguns curtos-circuitos.

No caso dos SDEE, uma classe especial de faltas denominadas *faltas de alta impedância* (FAI) é motivo de preocupação constante, principalmente em redes de distribuição aéreas. Normalmente, uma FAI ocorre quando há queda ou contato de um condutor energizado do circuito da rede primária com uma superfície de alto valor resistivo, a exemplo de árvores, vias públicas ou construções. Como consequência, uma FAI pode expor a população ao risco de choques elétricos e comprometer a integridade dos equipamentos do sistema, podendo inclusive, provocar inúmeros danos às propriedades privadas.

Devido à topologia predominantemente radial dos SDEE, um grande número de consumidores pode permanecer sem fornecimento de energia após a atuação do sistema de proteção. O problema se agrava em redes de distribuição rurais, nas quais os alimentadores são de grande extensão e percorrem longos trechos desabitados.

Os problemas decorrentes das FAI se devem principalmente, aos *níveis de corrente* resultantes, que são insuficientes para sensibilizar a operação dos relés de proteção. Devido a essa característica, as FAI são muitas vezes confundidas com transitórios oscilatórios na rede, decorrentes da inserção/remoção de cargas ou chaveamento de bancos de capacitores. Como resultado, o defeito pode persistir.

Para se reduzir a duração da interrupção e minimizar os custos operacionais é extremamente importante um diagnóstico rápido, exato e confiável do evento. No contexto de sistemas elétricos de potência, isso se traduz na execução de etapas de detecção, classificação e localização do evento. Em termos do estado da arte, desenvolvimento de soluções para automação do restabelecimento de energia constitui-se em um tema atual e de importância crescente.

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VI CITENEL), realizado em Fortaleza/CE, no período de 17 a 19 de agosto de 2011.

B.A. Souza, N.S.D. Brito, G.R.S. Lira, W.C. Santos, J.A.C.B. Silva, J.P.P. Andrade fazem parte do GSE/UFCG (e-mails: benemar.nubia,george@dee.ufcg.edu.br;wellinsilvia.santos,candido.joao.andrad@ee.ufcg.edu.br).

F.B. Costa trabalha na UFRN (e-mail: flabc01@yahoo.com.br).

M.R.C. Paes Jr trabalha no grupo Energisa (e-mail: mcerqueira@energisa.com.br).

Neste sentido, o Grupo Energisa/PB e a UFCG desenvolveram o **ANFAI**, um *software* que detecta e localiza FAI em SDEE e que constituiu-se no produto final do Projeto de P&D intitulado *Sistema de detecção e localização de faltas de alta impedância em redes de distribuição*. Atualmente, o **ANFAI** está implantado, na forma de um projeto piloto, em um dos alimentadores da empresa. Apresenta-se neste artigo uma sinopse do *software*, notadamente quanto ao processo de construção e às suas características.

II. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

A pesquisa que resultou no **ANFAI** foi desenvolvida conforme a execução das etapas apresentadas a seguir.

A. Modelagem do Sistema Piloto

O primeiro passo consistiu na escolha do sistema piloto, que se baseou nas características técnicas do alimentador e nas baixas probabilidades de riscos financeiros e físicos decorrentes de eventuais falhas no sistema. Após análise criteriosa do sistema de distribuição da Energisa/PB, escolheu-se o alimentador de 13,8 kV conectado à subestação de Boa Vista/PB como sistema piloto (figura 1).

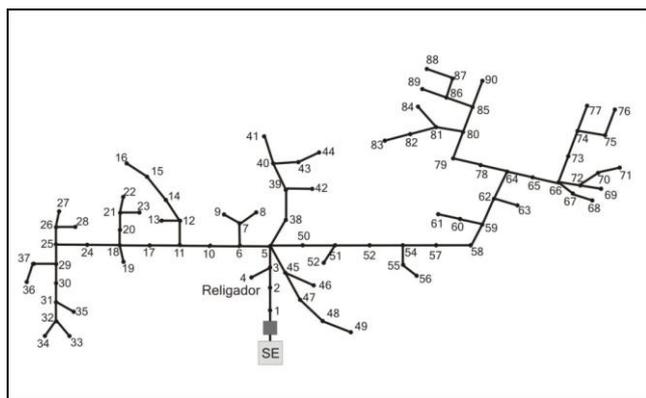


Figura 1. Diagrama unifilar do sistema piloto.

Nessa etapa se utilizou o *software* ATP [3], considerando:

- Linhas trifásicas a parâmetros distribuídos e constantes com a frequência.
- Trechos compostos por um único tipo de cabo e constituídos de linhas trifásicas não transpostas, com os vértices formando um triângulo equilátero. A modelagem dos trechos foi feita utilizando a sub-rotina LINE CONSTANTS do ATP.
- Cargas de pontos próximos ao longo do alimentador, agrupadas em uma única barra, resultando em um alimentador com 90 barras (figura 1).
- Fator *skin* para os cabos de 0,33.
- Resistividade da terra de 350 Ωm .
- Modelo de impedância constante para as cargas.
- Religador e chaves seccionadoras modelados como chaves simples.
- Cargas modeladas como circuitos RL paralelos conectados entre cada fase de cada barra e a terra.
- Fator de potência médio de 0,955.

B. Ensaios de Campo

Para completar o modelo representativo da FAI e validar

o método de diagnóstico em desenvolvimento, diversos ensaios de campo foram realizados. Ao final, obteve-se um conjunto de registros oscilográficos correspondentes a FAI capturados pelos registradores digitais de perturbação (RDP) instalados:

- No local de aplicação das FAI, visando obter as tensões e correntes do evento para posterior identificação do comportamento (*assinatura*) das FAI.
- Em pontos remotos ao longo de um ramal de alimentação. Esta estratégia de medição teve como objetivos: avaliar os níveis de amortecimento e distorção nos sinais de corrente e tensão oriundos das FAI e estimar o alcance (em termos de distância) do sistema de detecção e localização de FAI em desenvolvimento.

O *layout* da estrutura montada e fotografias de um dos ensaios são mostrados nas figuras 2 a 5.



Figura 2. *Layout* da estrutura montada.

Os testes foram realizados em seis tipos de superfícies, constituídas de pequenas áreas dispostas paralelamente e revestidas de grama, calçamento de concreto, asfalto, areia grossa, além da terra nua e arbusto (levando-se em consideração as superfícies secas e molhadas). Para a realização dos ensaios foram utilizados:

- Um poste de transição de dois metros implantado próximo às superfícies de contato, no qual foram instalados o transformador de potencial (TP) e o transformador de corrente (TC), para medição dos sinais de tensão e corrente produzidos pela FAI.
- Escada e vara de manobra para instalação e substituição dos elos fusíveis danificados durante os ensaios.
- Um cabo energizado com 13,8 kV vindo de um poste comum, no qual uma extremidade foi conectada a um dos isoladores do poste de transição, enquanto a outra foi conectada a um isolador em série com uma vara de manobra, que foi manipulada pelo técnico em linha viva.
- Uma plataforma isolante instalada de forma a possibilitar que o técnico manipulasse com mais segurança o cabo energizado.

Essa etapa foi de maior importância, visto que contribuiu de forma decisiva no entendimento do fenômeno, no aperfeiçoamento dos procedimentos experimentais e na habilita-

ção da equipe (pesquisadores, engenheiros e técnicos) na execução desse tipo de experimento.



Figura 3. Estrutura montada para realização dos ensaios.



Figura 4. Eletricista de linha viva manobrando o condutor.



Figura 5. Fotografia de uma FAI na superfície grama seca.

C. Modelagem das FAI

De um modo geral, uma FAI provoca o surgimento de arcos elétricos, que resultam em correntes com as seguintes peculiaridades:

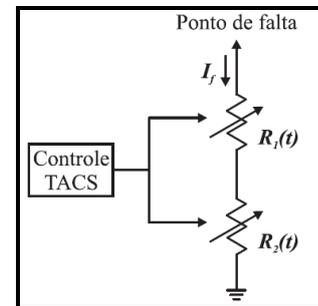
- **Assimetria:** a corrente de falta apresenta valores absolutos diferentes para os semiciclos positivo e negativo.
- **Não-linearidade:** a curva característica tensão *versus* corrente é não-linear.
- **Buildup:** a amplitude da corrente aumenta gradualmente em direção ao seu valor máximo.

- **Shoulder:** o fenômeno de *buildup* cessa durante poucos ciclos.
- **Intermitência:** corresponde aos ciclos nos quais o condutor energizado interrompe o contato com o solo.

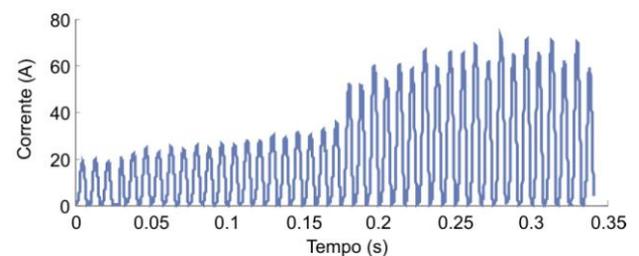
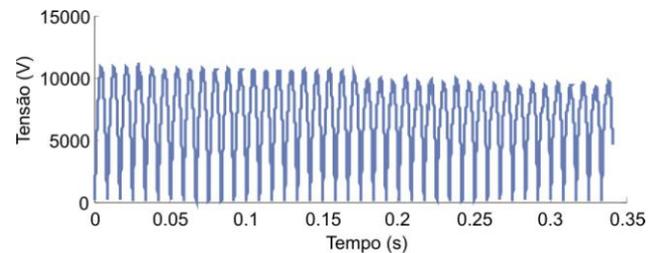
Tais características do fenômeno devem ser consideradas na concepção do modelo de uma FAI. O estado da arte mostra que a maioria das pesquisas baseia-se nos modelos que usam diodos ou associação de impedâncias não-lineares [4], [5]. Embora esses métodos representem bem a assimetria e a não-linearidade, eles não abrangem as demais características

No Projeto de P&D a que se refere este artigo, o modelo aplicado foi o proposto por [6], que inclui as características de não-linearidade, assimetria, *buildup* e *shoulder*. Para isso, o modelo utiliza duas resistências variantes no tempo, em série e controladas por TACS (*Transient Analysis of Control Systems*) no ATP, conforme mostrado na figura 6a. A resistência R_1 representa as características de não-linearidade e assimetria da FAI e a resistência R_2 representa os fenômenos de *buildup* e *shoulder*. A conexão das duas resistências em série permite que os efeitos de cada uma sejam sobrepostos, resultando em um modelo que adere bem aos propósitos práticos.

Ao final, os dados obtidos nos ensaios de campo (figura 6b) foram utilizados para parametrizar o modelo da FAI. Com as características v_{xi} obtidas das FAI em cada superfície, foi possível utilizar o método dos mínimos quadrados para obter as expressões em função do tempo que descrevem as resistências R_1 e R_2 [7], [8].



(a)



(b)

Figura 6. (a) Modelo de Nakagoni. (b) Exemplo das formas de onda das tensões e correntes correspondentes a uma FAI, obtidas nos ensaios de campo.

D. Construção das Bases de Dados

As Bases de Dados (BD) foram construídas com o intuito de auxiliar na etapa de desenvolvimento dos métodos de detecção e de localização de FAI, haja vista a escassez de registros reais de FAI. A metodologia adotada para se construir as BD baseou-se no método proposto por [9], que consiste na execução dos seguintes passos:

1. Seleção do sistema elétrico: sistema piloto mostrado na figura 1.
2. Seleção do *software*: ATP.
3. Modelagem do sistema elétrico: conforme seção A.
4. Modelagem da FAI: conforme seção C.
5. Seleção das variáveis de simulação das FAI: conforme tabela 1
6. Construção dos cenários de falta: conforme tabela 1.
7. Simulação das FAI.

Tabela 1. Variáveis de simulação e cenários de falta.

Variáveis de simulação	Especificação
Tipo de falta	AT
Carregamento (%)	25, 50, 75, 100
Angulo de incidência (°)	0, 30, 60, 90, 120, 150, 180
Local de falta (Barra)	10, 23, 30, 44, 49, 56, 63, 68, 90
Superfície de contato	Brita, grama, terra local, calçamento e areia

As simulações foram feitas no ATP, utilizando-se a rotina \$PARAMETER para ajustar as variáveis de simulação listadas Tabela 1 para cada cenário de falta. Como os dados fornecidos pelo ATP não obedecem à formatação IEEE COMTRADE [10], fez-se uso da rotina MODELS do ATP. Para isso, adotou-se a seguinte metodologia:

- Extraem-se os valores de tensão e corrente fornecidos pelo ATP no início do alimentador na frequência de amostragem de 15360 Hz (mesma frequência dos RDP adquiridos no Projeto de P&D).
- Cria-se um arquivo com os dados convertidos para um formato similar ao IEEE COMTRADE.
- Aplica-se um conversor aos dados.

Ao final, obtêm-se os dados correspondentes a um dado tipo de falta. Para construir uma BD é necessário unir as diversas situações de falta, que são obtidas a partir da combinação das variáveis de simulação. Para isso:

- Ajustou-se o instante de tempo no qual cada chave envolvida com o evento é fechada com o ângulo de incidência escolhido.
- Concentraram-se as variáveis de cada caso no início do arquivo (.atp), fazendo-se uso da função \$PARAMETER do ATP.

Mediante a criação de um arquivo para processamento em lote (.BAT), a simulação de todos os casos definidos nos arquivos .ATP é realizada automaticamente. O arquivo .BAT: simula cada caso, apaga os arquivos de saída do ATP que não são de interesse da aplicação em questão, executa o conversor e reescreve os arquivos de saída de forma padronizada. Baseando-se na rotina \$PARAMETER do ATP, programou-se uma rotina em MATLAB[®] [11] para gerar todas as configurações de faltas desejadas. Para isso, a rotina escreve:

- Os arquivos .ATP de todas as combinações possíveis das variáveis.

- O arquivo .BAT, seguindo uma nomenclatura sistemática para os arquivos.
- Os arquivos .CFG do padrão IEEE COMTRADE, conforme BD a ser construída.

O processo completo de construção das BD é apresentado de forma sucinta na figura 7.

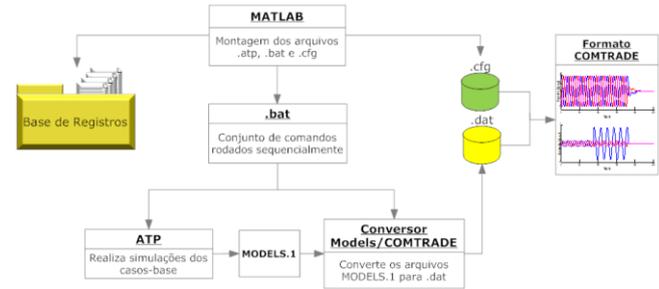


Figura 7. Construção das Bases de Dados.

Ao final, obteve-se uma BD com 1260 registros oscilográficos dividida em cinco partes, sendo cada parte referente a uma dada superfície de contato. A quantidade de registros obtida é apresentada na tabela 2.

Tabela 2. Quantidade de registros gerada por Base de Dados.

Base de Dados	Superfície de contato	Número de registros
I	Brita	252
II	Grama	252
III	Terra local	252
IV	Calçamento	252
V	Areia	252

Além dessas BD, um segundo conjunto foi construído com o intuito de avaliar a influência do modelo dos transformadores de potencial (TP) e de corrente (TC). Para isso, repetiu-se todo o processo descrito anteriormente, agora sem a presença desses equipamentos e com a configuração mostrada na tabela 3. Neste caso, obteve-se uma BD com 1080 registros oscilográficos dividida em duas partes, sendo cada parte referente a uma dada superfície de contato. A quantidade de registros obtidos é apresentada na tabela 4.

Tabela 3. Variáveis de simulação e cenários de falta.

Variáveis de simulação	Especificação
Tipo de falta	AT
Carregamento (%)	25, 50
Angulo de incidência (°)	60, 90, 120
Local de falta (Barra)	Todas as 90 barras
Superfície de contato	Brita e terra local

Tabela 4. Quantidade de registros gerada por Base de Dados.

Base de Dados	Superfície de contato	Número de registros
I	Brita	540
II	Terra local	540

E. Método de Detecção de FAI

Estudo minucioso dos sinais com FAI obtidos nas simulações e nos ensaios de campo conduziu às seguintes constatações:

- Transitórios referentes à FAI são mais amortecidos que os transitórios relacionados às faltas sólidas.
- Faltas sólidas normalmente apresentam afundamento na tensão, o que não acontece em FAI.
- Faltas sólidas normalmente são detectadas pelo sistema de proteção, o que resulta na isolamento da parte defeituosa do sistema e no retorno das energias aos valores de

regime permanente após alguns poucos ciclos. No caso de FAI, isso não acontece e as energias apresentam valores acima do limiar por vários ciclos.

- Transitórios de chaveamento normalmente apresentam aumento de energia durante um ou dois ciclos, enquanto que transitórios referentes à FAI podem apresentar aumento de energia por tempo indeterminado.
- Falta sólida e transitórios de chaveamento apresentam aumentos de energia, os quais podem ser centenas de vezes maiores que o valor de referência, enquanto que as FAI apresentam pequeno aumento de energia.

Baseando-se nesses fatos e no método de diagnóstico de faltas sólidas em sistemas de transmissão de energia elétrica proposto por [12], desenvolveu-se um novo método de detecção de FAI, o qual se baseia no uso da transformada *wavelet* discreta (TWD). Um resumo do método é apresentado no fluxograma mostrado na figura 8 e descrito nos passos a seguir.

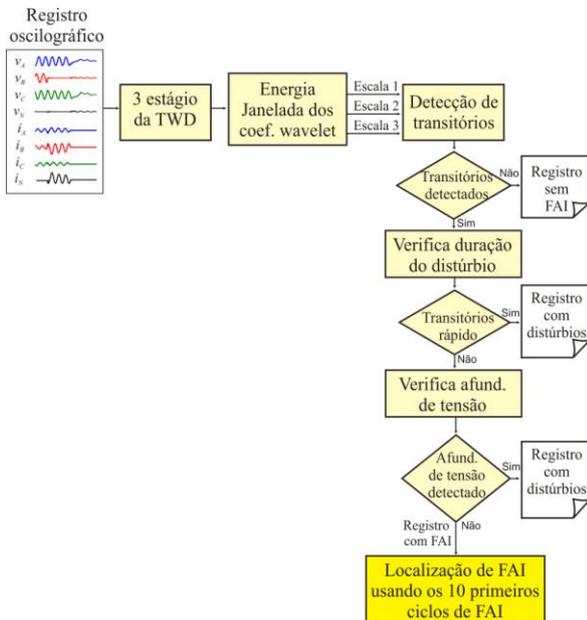


Figura 8. Fluxograma do método de detecção de FAI.

1. Aplicam-se três estágios da TWD às tensões e correntes do registro oscilográfico.
2. Calculam-se as energias janeladas e normalizadas dos coeficientes *wavelet* das tensões e correntes nas três primeiras escalas de resolução, conforme proposto por [12].
3. Verifica se pelo menos uma das energias ultrapassa um limiar previamente estabelecido.
4. Caso nenhum transitório seja detectado, então o registro não corresponde a uma FAI. Caso contrário, o registro contém algum distúrbio.
5. Em seguida, mede-se a duração do distúrbio.
6. Caso o distúrbio possua duração longa e apresente afundamento de tensão, então o registro não corresponde a uma FAI. Caso contrário, o registro corresponde a uma FAI.
7. Informações sobre os dez primeiros ciclos do evento são então, encaminhadas para a etapa de localização de FAI.

Para ilustrar o método, selecionou-se um registro oscilográfico real de uma FAI aplicada em grama molhada. O sinal no domínio do tempo, com as respectivas energias janeladas dos coeficientes *wavelet*, nas três primeiras escalas são apresentados na figura 9.

Conforme se vê, uma FAI pode ser detectada por meio da análise das energias dos coeficientes *wavelet*. Em cada uma das três escalas *wavelet*, um limiar duas vezes maior que um valor de referência do regime permanente foi estabelecido. Caso uma das energias ultrapasse o respectivo limiar por vários ciclos, então uma FAI é detectada. Um resumo do desempenho do método é apresentado na tabela 5.

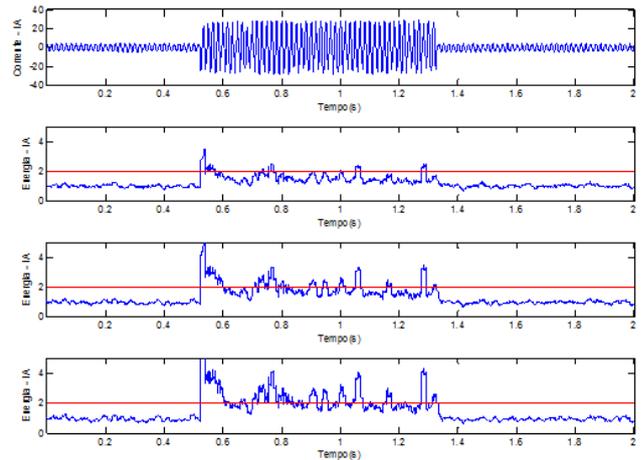


Figura 9. Representações nos domínios do tempo e *wavelet* de um registro oscilográfico real com FAI.

Tabela 5. Desempenho do método de detecção de FAI.

Terreno		Número de registros	Diagnósticos corretos	Taxa de acerto (%)
Areia fina	Seca	6	3	50
	Molhada	4	4	100
Areia grossa	Seca	9	7	78
	Molhada	6	5	83
Asfalto	Seco	5	1	20
	Molhado	7	6	86
Brita	Seca	5	0	0
	Molhada	5	5	100
Caçamento	Seco	5	4	80
	Molhado	8	6	75
Grama	Seca	5	5	100
	Molhada	5	5	100

F. Método de Localização de FAI

Conforme mostrado na figura 8, o módulo de localização de FAI é acionado quando uma FAI é detectada. O localizador desenvolvido baseia-se no uso de redes neurais artificiais, em particular de uma rede MLP [13] com as seguintes características:

- Rede MLP com arquitetura: 40-50-1.
- Função de ativação tangente hiperbólica para a camada oculta.
- Função de ativação sigmóide para a camada de saída.
- Algoritmo de treinamento RPROP [14].
- Saída da rede: distância normalizada da subestação ao ponto de ocorrência da FAI em km.
- Entrada da rede composta de oito variáveis:
 - o Amplitude do fasor normalizado da componente fundamental da corrente pós-falta.
 - o Amplitude do fasor normalizado das 2ª, 3ª, 5ª, 7ª e 9ª harmônicas da corrente pós-falta.

- o Diferença entre as fases dos fasores da componente fundamental e da 3ª harmônica da corrente.
- o Diferença entre as fases dos fasores da componente fundamental e da 3ª harmônica da tensão.

Para estimar os fasores utilizou-se o algoritmo de Fourier de meio ciclo e para executar as etapas de treinamento, validação e teste da rede neural elaborou-se um conjunto de padrões (base de dados), que foi subdividido da seguinte forma: 55% para o treinamento, 25% para a validação e 20% para o teste.

Na etapa de treinamento, cada variável de entrada foi agrupada em cinco amostras, conforme processo de janelamento padrão, o que resultou em um vetor de entrada de tamanho 40 (8 variáveis com 5 amostras). Além disso, foi feita uma mistura aleatória dos padrões da base de dados de modo a evitar a perda da capacidade de generalização da rede e adotou-se um número máximo de 30.000 épocas para apresentação dos padrões de entrada.

Ao final, obteve-se um erro médio quadrático de 0,0233 na etapa de treinamento e na etapa de validação, o número máximo de épocas não foi atingido. Em relação ao teste, dividiu-se o conjunto de teste em arquivos, nos quais todos os fasores foram calculados e apresentados à RNA.

Considerou-se como saída da rede neural, o valor mais frequente estimado e normalizado em função da máxima distância do alimentador à subestação.

Os resultados obtidos apresentaram um erro médio de 9,14% em relação à máxima extensão do alimentador. Trata-se de um resultado preliminar animador, visto que melhorias no localizador ainda estão sendo realizadas.

G. Sistema de Gatilamento

Um RDP normalmente permite detectar e armazenar alguns tipos de eventos, tais como: sobretensões, sobrecorrentes, afundamentos de tensão e corrente, distorções harmônicas. Para isso, ele faz uso de um sistema interno de identificação e gatilho, que dispara o processo de gravação automática desses eventos. Como as FAI (objetos da pesquisa do Projeto de P&D) não fazem parte do elenco de eventos do RDP, várias tentativas foram realizadas no sentido de se conseguir um sistema de disparo do processo de gravação pelo RDP de eventos relacionados à FAI.

Ao final, desenvolveu-se um *hardware* dedicado que gera pulsos de tensão (gatilhos) em uma das entradas digitais do RDP, segundo comandos de um *software* instalado em um computador utilizado na aquisição e tratamento dos dados oriundos do RDP.

O sistema de gatilamento consiste basicamente de uma fonte de tensão com saída controlada, conforme mostrado no diagrama esquemático da figura 10, em que o módulo denominado de *Fonte DC* corresponde a um circuito retificador de onda completa com capacitor de amortecimento na saída. Este circuito faz a retificação do sinal de entrada, ou seja, converte a tensão alternada (AC) de entrada em tensão contínua (DC). Essa conversão foi necessária, pois a entrada digital do RDP foi projetada para suportar uma tensão nominal de 125 Vdc. A alimentação da Fonte DC pode ser feita

via estabilizador ou *no-break* que alimenta o computador e o RDP.

Conforme se vê na figura 10, um relé foi colocado entre o capacitor e o resistor de saída com o objetivo de aplicar os pulsos de tensão na entrada do RDP permitindo assim, o processo de gatilamento de eventos. Para isso, utilizou-se um relé de 6 Vdc/60 mA e um driver de corrente (constituído de um divisor de tensão, sendo um dos resistores conectado a base de um transistor) para energizar a bobina do relé.

Para alimentar o transistor, utilizou-se a porta USB do computador como fonte de alimentação. No emissor do transistor, conectou-se o relé e em paralelo com ele, um diodo de roda livre visando garantir a segurança do componente.

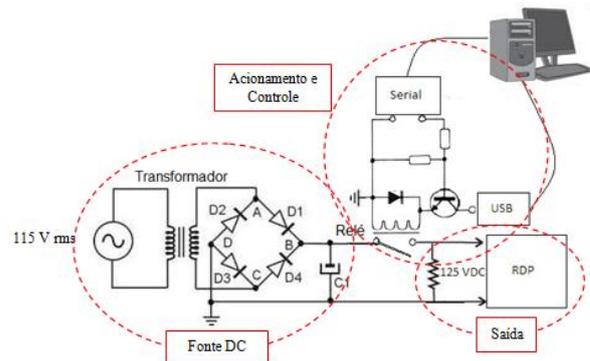


Figura 10. Diagrama esquemático do circuito de gatilamento do RDP.

Diversos testes em laboratório e em campo foram realizados visando verificar o funcionamento e a robustez do circuito, os quais foram todos bem sucedidos, ou seja, conseguiu-se gerar a tensão contínua necessária para sensibilizar a entrada digital do RDP.

Em seguida, confeccionou-se o protótipo em placa de circuito impresso cujo *layout* final é mostrado na figura 11. Obteve-se um circuito compacto (aproximadamente 06 x 04 cm) e que pode ser facilmente acomodado e instalado em campo. A placa depois de confeccionada foi colocada numa caixa de PVC feita especialmente para este propósito, visando resguardá-lo de danos mecânicos ou elétricos, além de proteger as pessoas envolvidas em relação a choques elétricos.

Por fim, desenvolveu-se em linguagem de programação C, o *software* de envio de comandos de abertura e fechamento do relé através da porta serial do computador.

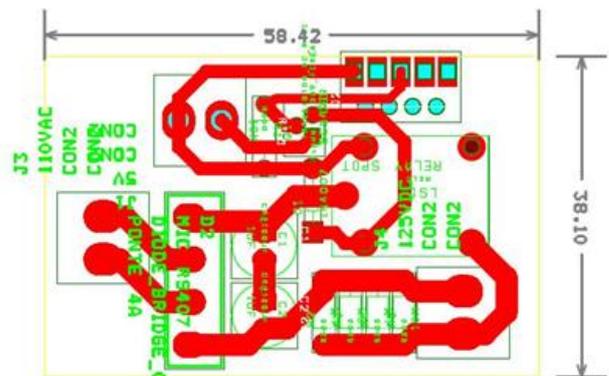


Figura 11. *Layout* final da placa de circuito impresso do circuito de gatilamento do RDP.

III. O PRODUTO FINAL

Projeto de P&D produziu um *software* que realiza, de forma automática, uma triagem e análise efetiva dos registros oscilográficos provenientes dos RDP. Atualmente, o **ANFAI**, como foi denominado o *software* que detecta e localiza falta de alta impedância foi instalado, em escala piloto, em um dos alimentadores da empresa Energisa/PB conforme mostrado na figura 12.

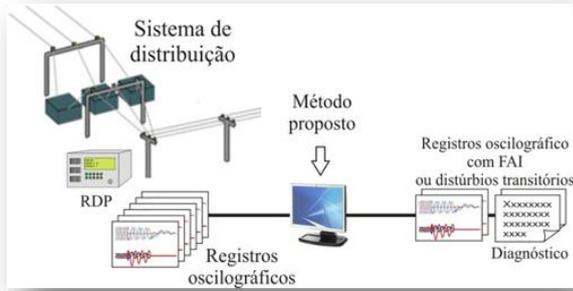


Figura 12. Inserção do ANFAI no sistema piloto.

O **ANFAI** possui um ambiente amigável para análise de registros oscilográficos baseado em interfaces gráficas que foram implementadas fazendo-se uso do paradigma de orientação a objetos da linguagem de programação C++ e de recursos da biblioteca MFC (*Microsoft Foundation Class*) [15]. Além de fornecer um diagnóstico para cada registro oscilográfico analisado, o **ANFAI** traça as formas de onda das tensões e correntes.

Na interface gráfica principal do **ANFAI** (figura 12) há uma barra de título com o nome do programa e logo abaixo, uma barra de *menus* tipo *pull-down* que exibe algumas opções de utilização do programa.

Para progredir na navegação do programa o usuário deve selecionar na barra de *menus* uma das seguintes opções: ANÁLISE DE REGISTROS, CONFIGURAÇÕES e HELP, o que resultará na abertura de uma janela específica.

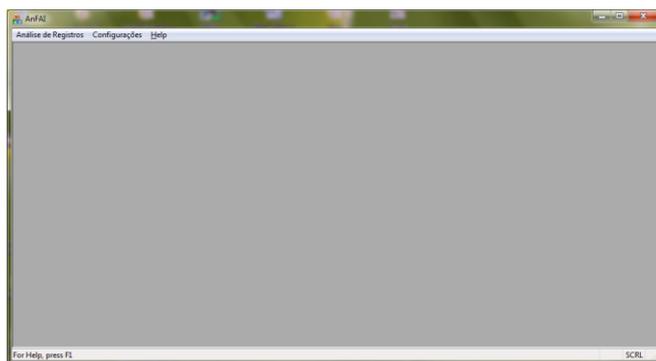


Figura 14. Janela principal do *software*.

O *menu* ANÁLISE DE REGISTROS é composto de três *submenus*:

- ANÁLISE INDIVIDUAL: análise de um único registro oscilográfico.
- ANÁLISE EM LOTE: análise simultânea de diversos registros.
- ANÁLISE AUTOMÁTICA: análise dos registros provenientes de um RDP conectado ao computador que possui o *software* **ANFAI**.

Ao se determinar o registro a ser analisado, o usuário se depara com a *interface* gráfica mostrada na figura 15. Conforme se vê, a janela possui uma região contendo os gráficos das tensões e outra das correntes, ambos de todas as fases. Na parte superior da janela tem-se uma barra de ferramentas com a seguinte lista de opções disponíveis:

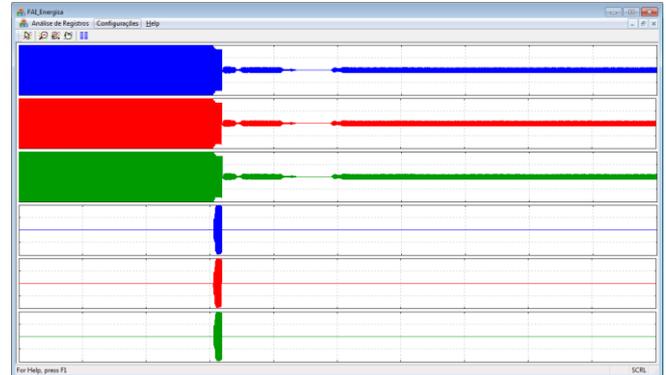


Figura 15. Interface gráfica.

- Ao clicar nessa opção, o usuário pode dar *zoom* em qualquer região dos gráficos.
- Ao clicar nesta opção, se os gráficos estiverem sob efeito de *zoom*, o gráfico volta ao tamanho normal;
- Ao clicar nesta opção, o *software* fornece o diagnóstico do registro (ocorreu ou não uma FAI).
- Esta opção desabilita qualquer outra função que esteja habilitada.
- Ao clicar nesta opção, o usuário pode mover os gráficos ao longo do eixo dos tempos.

O *menu* CONFIGURAÇÕES é composto de três *submenus*:

- MÉTODO DE DETECÇÃO DE FAI: ao clicar nesta opção, o *software* disponibiliza a janela mostrada na figura 16, na qual o usuário pode escolher quais sinais ele deseja analisar.
- MÉTODO DE LOCALIZAÇÃO DE FAI: ao clicar nesta opção, o *software* disponibiliza a janela mostrada na figura 17, na qual o usuário pode escolher a arquitetura da rede neural a ser usada pelo método de localização de FAI: a arquitetura *default* (40-50-1) ou uma nova. Neste caso, o usuário deve clicar na opção NOVA REDE.
- ANÁLISE AUTOMÁTICA: ao clicar nesta opção, o *software* disponibiliza a janela mostrada na figura 18, na qual o usuário pode configurar quais são os diretórios no quais as pastas criadas serão alocadas. Para modificar, basta clicar no ícone ao lado do campo onde mostra o diretório e escolher o novo diretório.

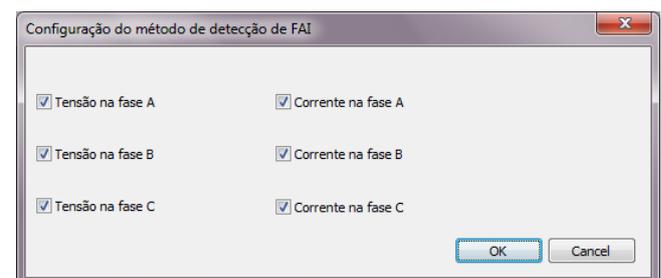


Figura 16. Janela: CONFIGURAÇÃO DO MÉTODO DE DETECÇÃO DE FAI.

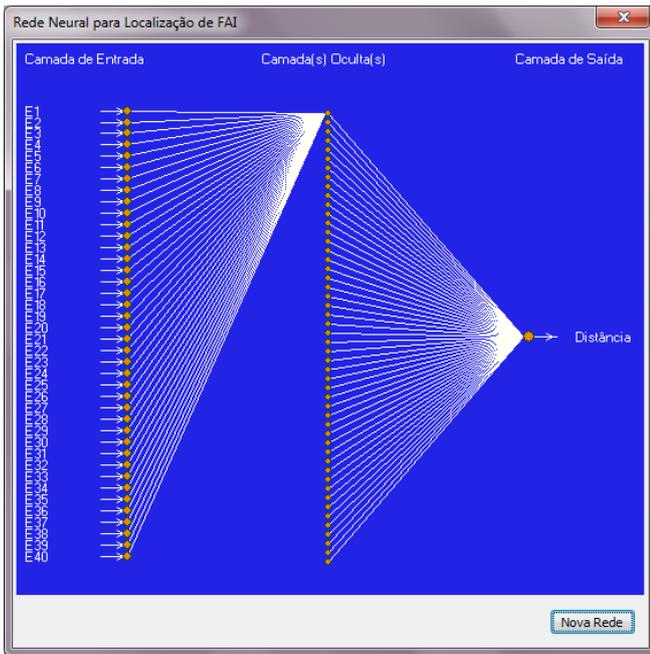


Figura 17. Janela: REDE NEURAL PARA LOCALIZAÇÃO DE FAI.

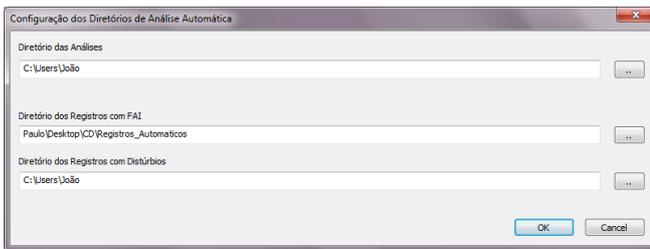


Figura 18. Janela: CONFIGURAÇÃO DOS DIRETÓRIOS DE ANÁLISE AUTOMÁTICA.

Finalmente, o *menu HELP* permite acesso aos créditos do programa e disponibiliza ajuda ao usuário no uso da *interface* com o intuito de facilitar ao máximo a utilização e o aprendizado do *software* (figura 19).

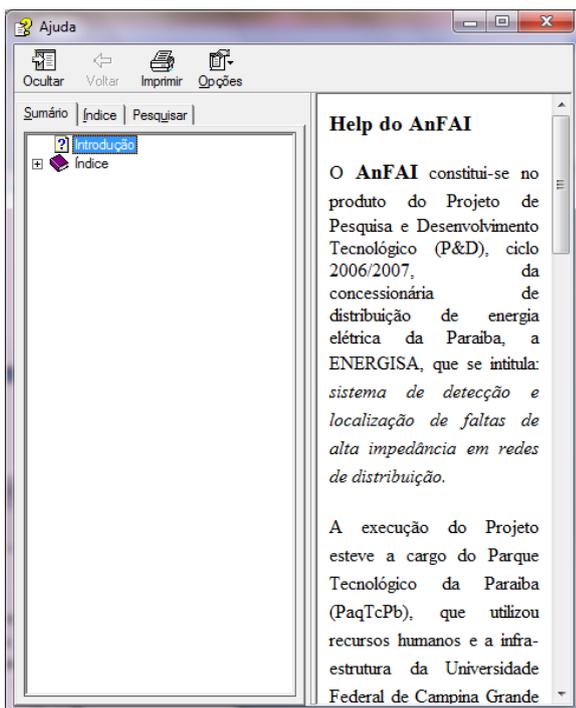


Figura 19. Menu HELP.

IV. CONCLUSÕES

O Projeto de P&D descrito neste artigo resultou em um *software* de detecção e localização de FAI em alimentadores de distribuição de 13,8 kV. Atualmente, o *software* está instalado em um sistema piloto da empresa e apresentando desempenho satisfatório. A aplicação do *software* aos demais alimentadores está dependendo da aquisição de novos RDP.

A expectativa é de que o *software* contribua efetivamente para reduzir o tempo de identificação e eliminação de FAI no sistema, dando suporte e respaldo ao processo de tomada de decisões. Como consequência, os riscos ao consumidor decorrentes da queda de cabos no solo serão reduzidos, a confiança do consumidor nos serviços oferecidos pela concessionária será aumentada e os prejuízos financeiros da concessionária com o pagamento de multas e indenizações serão reduzidos.

O caráter inovador da pesquisa e o bom desempenho do ANFAI em um problema prático, importante e reconhecidamente árduo que é a detecção e localização de faltas de alta impedância em redes de distribuição de energia elétrica, estimularam as duas instituições (UFCG e Grupo Energia/PB) a dar continuidade a pesquisa apresentada neste artigo. Neste sentido, uma nova proposta de Projeto de P&D já está sendo elaborada. Assim, se espera prosseguir com a realização dos ensaios de FAI e conseguir melhoramentos: do modelo da FAI, dos métodos de detecção e sobretudo, de localização de FAI e do sistema de aquisição de dados.

V. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao corpo técnico do Grupo Energia/PB, especialmente aos engenheiros Glêston Agra e Eudes Sobreira, que não mediram esforços em colaborar para que o Projeto de P&D *Sistema de detecção e localização de faltas de alta impedância em redes de distribuição* se desenvolvesse a contento.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANEEL. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST)* - Módulo 1 - Introdução. 2005.
- [2] Brasil, *Código de Defesa do Consumidor*, 1990. <http://www.planalto.gov.br/ccivil/leis/L8078compilado.htm>.
- [3] Leuven EMTP Center. *ATP – Alternative Transient Program – Rule Book*. Herverlee, Belgium, 1987.
- [4] M. Moreto, “Localização de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição de energia: uma metodologia baseada em redes neurais artificiais”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.
- [5] A. E. Emanuel, E. M. Gulachenski, D. Cyganxki, A. J. Orr & S. Shiller, “High impedance fault arcing on sandy soil in 15kV distribution feeders: contributions to the evaluation of the low frequency spectrum”, *IEEE Trans. Power Delivery*, vol.5, n. 2, pp. 676-686, April 1990.
- [6] D. C. Yu, S. H. Khan “An adaptive high and low impedance fault detection method”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 9, n. 4, p. 1812–1821, October 1994.
- [7] R. M. Nakagomi, “Proposição de um sistema de faltas de alta impedância em redes de distribuição”, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 2006.
- [8] W. C. Santos, F. B. Costa, J. A. C. B. Silva, G. R. S. Lira, B. A. Souza, N. S. D. Brito & M. R. C. Paes Jr., “Automatic building of a si-

- ulated high impedance fault database”, in *Proc. 2010 IEEE/PES T&D Latin America*.
- [9] B. A. Souza, N. S. D. Brito, W. L. A. Neves, K. M. C. Dantas, A. V. Fontes, S. S. B. Silva, A. B. Fernandes, “Construção automática de bases de dados – uma experiência de P&D entre a Chesf e a UFCG”, in *Proc. 2005 Seminário Nacional de Produção, Medição e Controle em Sistemas de Potência (SNPTEE)*.
 - [10] IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE. *IEEE Standard Common Format for Transient Data exchange (COMTRADE) for Power Systems*. New York, USA, 1991.
 - [11] MATHWORK, INC. *Matlab: High-performance numeric computations and visualization software. Matlab user's guide*, 1997.
 - [12] F. B. Costa, “Uma técnica de diagnóstico em tempo real de distúrbios transitórios baseada na transformada wavelet para uso em registradores digitais de perturbação”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, 2010.
 - [13] S. Haykin, *RNA: princípios e prática - 2a edição*. Porto Alegre: Bookman, 2001
 - [14] M. Riedmiller. & H. Braun, “A direct adaptive method for faster backpropagation learning: the RPROP algorithm”, in *Proc. 1993 IEEE Int. Conf. on Neural Networks*.
 - [15] Microsoft® *Visual Studio.net professional*, version 2003.