

Sistema Especialista Inteligente para Identificação e Localização de Defeitos em Cabos Subterrâneos de Média Tensão - MT

André Nunes de Souza¹, Ricardo de Oliveira Brandão², Sunny Jonathan², Pedro da Costa Junior¹, Paulo Sérgio da Silva¹, João Paulo Papa¹, Maria Goretti Zago³, Danilo Sinkiti Gastaldello¹.

Resumo – Este projeto de pesquisa é dedicado ao desenvolvimento de técnicas de Sistemas Inteligentes dentro da perspectiva de identificação, localização e diagnóstico de falhas em cabos subterrâneos de média tensão, sobretudo, nos sistemas reticulados (híbridos), visando aperfeiçoar os procedimentos do sistema de manutenção subterrânea da AES Eletropaulo no sentido de diminuir os tempos de reparo e de interrupções não planejadas, os quais podem representar elevados custos operacionais.

Palavras-chave – Cabos Subterrâneos, Localização de Defeitos, Sistemas de Distribuição.

I. INTRODUÇÃO

Localização de falhas é o ato de descobrir a exata posição no cabo de energia onde há quaisquer ocorrências indesejáveis, como curtos-circuitos, circuitos em aberto, ruptura do isolamento, falhas de alta impedância, etc.

Em virtude do enorme dano e conseqüências desses incidentes, as concessionárias requerem um método de detecção de defeitos que permita o restabelecimento das condições normais de operação das redes de energia elétrica tão logo quanto possível. Diversos métodos têm sido desenvolvidos no tocante à redução dos danos e suas conseqüências. Todavia, a porção majoritária desses processos possui deficiências. Alguns possuem uma baixa precisão, enquanto outros encontram dificuldades em sua aplicabilidade e outros ainda podem provocar danos indesejáveis nas instalações e cabamentos vizinhos.

Entre todos os métodos de localização de falha, aqueles fundamentados em ecos de pulsos são reconhecidos como sendo os de maior utilidade. Tal processo faz uso da diferença de tempo entre os pulsos emitidos e refletidos para estimar o local de ocorrência do defeito. Quando pulsos de baixa duração são injetados em uma linha de transmissão, ocorrerá reflexões de ondas conforme o “status” atual do cabo de energia. Por exemplo, linhas curtas abertas refletem tipos distintos de ondas, e a localização das falhas depende do tempo de retorno dos pulsos. Dessa forma, analisando estes

atrasos entre pulsos, é possível estimar onde estão localizados os defeitos e o tipo de falha ocorrida. Métodos baseados em de pulsos possuem uma elevada precisão em virtude do uso de pulsos de largura estreita ou curta duração.

Tendo em vista que a aquisição de geradores de alta tensão para serem usados em localização de defeitos constituem alto investimento, há necessidade de se avaliar novos métodos que sejam precisos e comportem uma monitoração on-line viável. Tais requerimentos estão sendo buscados por meio de novas pesquisas e desenvolvimentos.

Neste contexto, o projeto P&D “Sistema Inteligente para Identificação e Localização de Defeitos em Cabos Subterrâneos de Média Tensão – MT - Código ANEEL 0390-0360/2006” busca, de maneira inovadora, o desenvolvimento de técnicas utilizando sistemas inteligentes dentro da perspectiva de identificação, localização e diagnóstico de falhas em cabos subterrâneos de média tensão, sobretudo, nos sistemas reticulados (híbridos), visando otimizar os procedimentos do sistema de manutenção subterrâneo da AES Eletropaulo no sentido de diminuir os tempos de reparo e de interrupções não planejadas, os quais podem representar elevados custos operacionais. Este projeto P&D já foi concluído, sendo que o laboratório móvel de localização de falhas está em plena operação e o software desenvolvido está em fase de implantação.

II. HISTÓRICO

Estudos sobre os efeitos do aterramento em sistemas subterrâneos vêm sendo uma tônica na avaliação de desempenho de circuitos subterrâneos e de seus efeitos, principalmente no que tange a problemas referentes aos cabos de energia elétrica. Nesses trabalhos são abordados aspectos direcionados à segurança dos operadores, bem como procedimentos para melhorar os tempos de reparos das interrupções. Não obstante, são relatadas algumas falhas influenciadas pelas impedâncias dos cabos e também pelos acoplamentos magnéticos envolvidos [1].

A literatura enfatiza um número muito elevado de falhas que ocorrem em junções de cabos subterrâneos, sendo que a maioria dessas falhas é devido à degradação da conexão elétrica das junções e à degradação correspondente de sua isolamento elétrica. Nesses estudos, constata-se a adoção de programas de manutenção preventiva para melhorar este panorama. Entretanto, o principal problema é a identificação e o diagnóstico preciso dos tipos de falhas por intermédio de ferramentas convencionais [2].

Existem também estudos com a finalidade de avaliar

¹André Nunes de Souza, Paulo Sérgio da Silva, Pedro da Costa Junior, João Paulo Papa, Danilo Sinkiti Gastaldello trabalham na UNESP-Bauru - LSISPOTI (e-mail: andrejau@feb.unesp.br).

²Ricardo de Oliveira Brandão trabalha na AES-ELETROPAULO (e-mail: ricardo.brandao@AES.com).

³Maria Goretti Zago trabalha na FATEC-Bauru (e-mail: mgzago@uol.com.br).

corretamente a confiabilidade do sistema subterrâneo de distribuição. O tempo de interrupção e o número de clientes afetados pela interrupção do sistema são considerados um índice importante para estimar a confiabilidade de um sistema subterrâneo de distribuição. Assim, são apresentados algoritmos que avaliam a confiabilidade de um sistema subterrâneo de distribuição usando um sistema como modelo (piloto) [3]. Do mesmo modo, estão sendo desenvolvidas técnicas para a detecção e a localização de falhas incidentes em cabos de sistemas de distribuição subterrâneos. A técnica consiste em piorar a condição de falha para facilitar a detecção. Esses dados são analisados, observando a mudança do sinal em determinados valores de frequência, possibilitando a identificação do local de ocorrência da falha [4].

Outra técnica bastante difundida tem sido a técnica não invasiva de descarga parcial de faixa ultra-larga (UWB), a qual tem sido empregada no diagnóstico de cabos de alimentadores subterrâneos de distribuição da Cidade do México.

A técnica tem permitido a classificação do circuito de acordo com os níveis de campo eletromagnético produzido pelas descargas parciais e gravados em cada poço de inspeção com uma junção ao longo dos circuitos avaliados em 12 subestações [4].

De maneira semelhante, existem estudos sobre uma técnica automática de localização de falhas permanentes em redes de distribuição subterrâneas. Nesses estudos, utilizam-se sinais de um instrumento existente de reflectometria no domínio do tempo (TDR). Nesse caso, utilizam-se um filtro para separar o sinal do TDR do sinal das falhas encontradas. Essencialmente, o procedimento minimiza a dependência na habilidade de interpretação requerida pelo usuário do TDR. O desempenho relativo do sistema é demonstrado usando dados reais de campo [5, 6].

Em algumas circunstâncias, as falhas em condutores isolados de baixa tensão, podem demorar ou acontecer intermitentemente por dezenas de minutos, gerando grandes quantidades de calor e de gases. De maneira geral, constata-se que nos dutos e também nos cabos secundários, os gases da decomposição podem se localizar nas extremidades. A detecção destas falhas pode ser uma tarefa difícil de ser percebida porque algumas dessas falhas geram correntes relativamente baixas. Neste sentido, a solução deste problema pode auxiliar na detecção destas falhas, aumentando assim, os níveis de segurança desses circuitos [7-10].

Desta forma, verifica-se que estudos envolvendo a identificação e a localização de falhas em sistemas subterrâneos, ainda apresentam um alto grau de empirismo. Portanto, o desenvolvimento de um Sistema Especialista Inteligente para a identificação e a localização de falhas em sistemas subterrâneos de média tensão, caracteriza-se como um estudo inovador que está trazendo ganhos efetivos, tanto para AES Eletropaulo, como também para os seus clientes de uma maneira geral.

III. METODOLOGIA E ENSAIOS EXPERIMENTAIS NO LABORATÓRIO

No Laboratório de Alta Tensão do Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo – IEE-USP foram realizados ensaios de alta tensão para verificar o comportamento dos cabos subterrâneos do sistema AES Eletropaulo.

A. *Ensaio de Suportabilidade e Descargas Parciais*

A sistemática adotada na execução desses ensaios foi fundamentada em normas técnicas em vigência e também na experiência dos operadores da AES Eletropaulo. Nesse laboratório foram realizados ensaios de suportabilidade dos cabos e também ensaios para verificar o nível de descargas parciais e de tangente delta. Sendo que, todos esses resultados serão comparados com os resultados em campo para a elaboração e validação do sistema inteligente em desenvolvimento.

A seguir são apresentados os dados dos cabos que foram ensaiados no IEE-USP, com lances de 30m:

- Cabo 3x1x240 mm² - Cu - EPR/XLPE - 15/25 kV – Cabo seco.
 - Capacitância: 0,3234 µF/km.
 - Resistência: 0,1048 Ω/km.
 - Reatância: 0,1546 Ω/km.
- Cabo 3 x 500 MCM - Cu - Papel Impregnado - 20/35 kV.
 - Capacitância: 0,1000 mF/km.
 - Resistência: 0,0926 Ω/km.
 - Reatância: 0,1183 Ω/km.

A Figura 1 apresenta os três cabos isolados (seco) ensaiados no laboratório de alta tensão. Na parte superior os terminais externos e na inferior os terminais blindados.



Figura 1. Esquema dos Três Cabos .Montados no Laboratório do IEE-USP.

A Figura 2 ilustra a montagem de uma das fases para os ensaios de Tangente Delta e Descargas Parciais. A Figura 3

mostra os terminais dos cabos blindados. A Figura 4 apresenta o circuito de medição para os ensaios de Tangente Delta. Esse sistema é formado basicamente por uma fonte de tensão alternada e um capacitor de acoplamento. O aparelho utilizado nas medições foi uma Ponte Schering tipo 2901.



Figura 2. Montagem de uma Fase (azul).



Figura 3. Emenda tipo desconectável formada por 2 TBB's (Terminal Básico Blindado).



Figura 4. Sistema de Medição de Tangente Delta.

O sistema de medição das descargas parciais foi composto de dois módulos, um utilizando um registrador Marca Tektronix modelo TDS 3012, 100 MHz, 1,25 GS/s, DPO, para aquisição e tratamento de sinal e um outro módulo utilizando um sistema analógico Marca ERA, modelo 5, tipo 700, para a comparação das medições. A Figura 5 apresenta a composição deste sistema de medição.



Figura 5. Sistema de Medição de Descargas Parciais.

Os ensaios realizados no Laboratório de Alta Tensão do Instituto de Eletrotécnica e Energia da USP – IEE-USP foram utilizados como subsídios para a comparação dos ensaios realizados com o novo equipamento que foi adquirido para este projeto.

Esses resultados foram considerados na adoção de limites inferiores e superiores na execução de novos ensaios com o novo equipamento. As amplitudes das medições, bem como a influência das interferências são levadas em consideração na elaboração da metodologia empregada no campo.

A partir dos resultados apresentados ficou evidenciado que os procedimentos adotados pela AES Eletropaulo na confecção e manuseio dos cabos subterrâneos são adequados, uma vez que não foi constatado nos ensaios nenhum tipo de falha nos cabos para as condições nominais. Os resultados dos ensaios de Descargas Parciais e de Tangente Delta foram todos satisfatórios.

B. Ensaios Utilizando o CENTRIX

Os primeiros ensaios realizados com o CENTRIX no Laboratório de Alta Tensão do IEE-USP tiveram como objetivo avaliar o funcionamento do sistema em um ambiente controlado, além de verificar a integridade operacional para posterior utilização no campo.

A Figura 6 apresenta o veículo identificado como "Laboratório Móvel de Localização de Falhas em Sistemas Elétricos Subterrâneos" com o logotipo da AES Eletropaulo.



Figura 6. Laboratório móvel de localização de falhas.

Para esses ensaios foi utilizado um conjunto de cabos secos cujos terminais foram identificados através de cores (branca, vermelha e azul). Em todos os ensaios adotou-se a velocidade do impulso de 820 m/μs. Os demais dados do cabo estão reunidos na Tabela I.

Tabela I. Dados do Cabo.

ID:	3x1x240mm
Tipo:	EPR 15-25 kV
Fabricante:	PIRELLI
Tensão nominal:	20 kV
Número de Fases:	3
Nome da Fase:	L1
	L2

	L3
Ano de fabricação:	2008

A Figura 7 mostra o detalhe dos terminais dos cabos identificados com cores e usados nos ensaios.



Figura 7. Detalhe dos terminais dos cabos.

A Figura 8 apresenta a operação do CENTRIX.

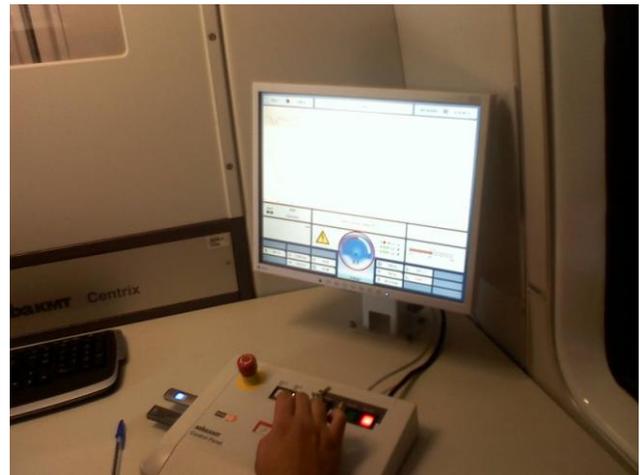


Figura 8. Operador realizando os ensaios dentro do Laboratório Móvel.

A Figura 9 ilustra um dos ensaios realizados no laboratório de alta tensão utilizando o CENTRIX. Observa-se nesta figura que o defeito ocorreu a partir de 8 kV DC a 52,5 m.

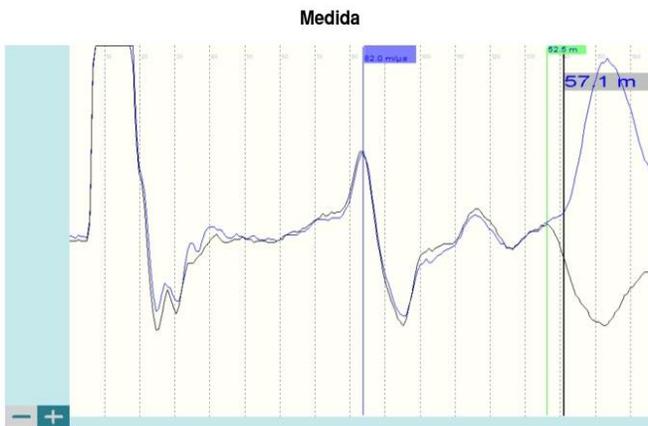


Figura 9. Cabo seco + Cabo a Óleo - defeito a 52,5 m.

IV. METODOLOGIA E ENSAIOS EXPERIMENTAIS NO CAMPO

Nesta seção serão apresentados os resultados dos ensaios realizados com o CENTRIX em campo. Esses ensaios tiveram como objetivo avaliar o funcionamento do sistema em condições reais em circuitos subterrâneos.

A Figura 10 mostra o Laboratório Móvel sendo preparado para realização dos ensaios em campo, levando-se em conta todos os aspectos de segurança.

Os ensaios realizados na Estação de Morungaba foram: Teste CC, Arc Reflection Method (ARM), Reflectometria de Baixa Tensão (TDR), Audio Freqüência (FERROLUX e DIGIPHONE). Os ensaios foram realizados de acordo com a seguinte sistemática:

- Montagem e conexão do veículo 4707 (Sistema de ensaio CENTRIX) na antiga ETSD Morungaba.
- Teste de tensão aplicada em corrente contínua para verificar se o cabo estava em boas condições ou danificado.
- Ensaio de “queima” visando reduzir a tensão de ruptura do defeito.
- Após constatar o defeito nos cabos, foi realizado o ensaio com o gerador de impulsos (onda de choque - Arc Reflection Method) em conjunto com a reflectometria.
- Identificação e visualização da distância do ponto do defeito.
- Ensaio de onda de choque no valor de 7 kV com a finalidade de poder “ouvir” o ruído provocado pelo defeito.
- Procura do ponto do defeito utilizando o geofone (microfone acústico de solo) no itinerário do cabo.



Figura 10. Laboratório Móvel no local de ensaio.

A Tabela II apresenta os dados do circuito da Estação Morungaba:

Tabela II. Dados do circuito ensaiado.

Local: Jardim Europa - São Paulo
Circuito: BAN-313 e BAN-314 - ETSD Morungaba
Extensão:
BAN-313 = 450 m
BAN-314 = 672 m
Ponto do Defeito: 620 m
Seção dos condutores: 3 x 1 x 2/0 AWG
Isolação: EPR
Data de Instalação: 1984

A Figura 11 ilustra o circuito subterrâneo da Estação de Morungaba com detalhamento das conexões dos cabos de medição com os cabos de energia ensaiados.

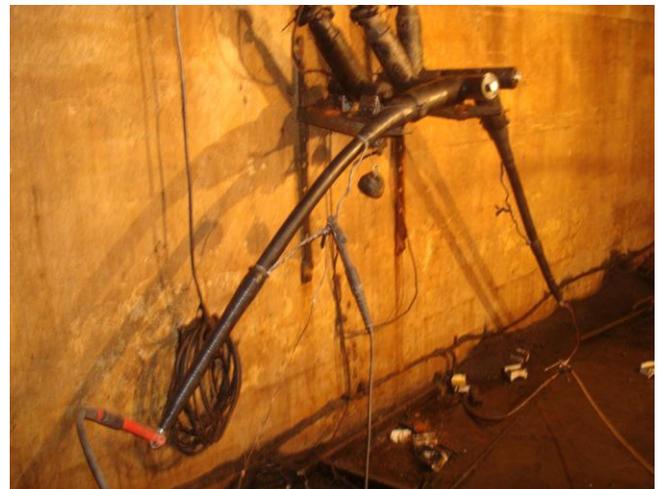


Figura 11. Conexão dos cabos de medição com o cabo do circuito ensaiado.

A Figura 12 mostra o painel do receptor de áudio frequência FERROLUX usado para localização exata do ponto de falha.



Figura 12. Detalhe do painel do receptor de áudio frequência.

A Figura 13 mostra o engenheiro da equipe técnica da AES Eletropaulo realizando a localização exata da falta usando o receptor de áudio frequência portátil FERROLUX.



Figura 13. Operação do receptor de áudio frequência portátil FERROLUX.

A Figura 14 apresenta uma das medições realizadas em campo, levando-se em conta um range de 25000 ns e um pulso de 500 ns, sendo a distância encontrada de 277,3 m.

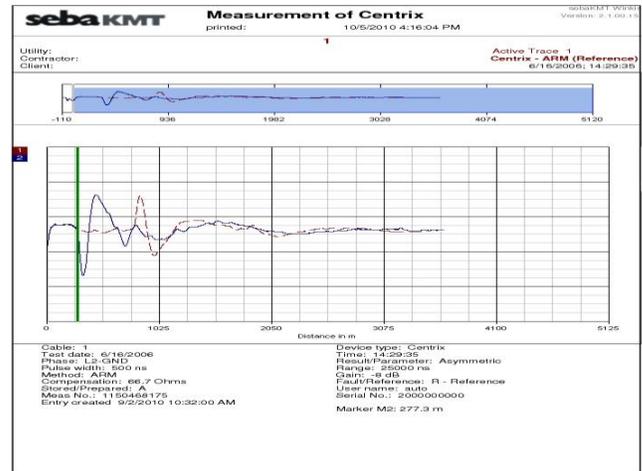


Figura 14. Falha encontrada a 277,3 m.

V. DESENVOLVIMENTO DA ABORDAGEM INTELIGENTE

Como mencionado anteriormente, a técnica TDR permite a identificação da falha no momento em que ocorre um “descolamento” entre o sinal referência e o sinal com a falta, conforme ilustrado na Figura 9. Essa etapa é observada por um técnico que, após utilizar o aplicativo e equipamentos do Laboratório Móvel (Figuras 6 e 8), identifica visualmente o ponto de deslocamento dos sinais e, posteriormente, obtém a posição da falha.

Contudo, existem dois fatores principais que podem enfraquecer tal metodologia:

- a análise visual é totalmente subjetiva, ficando sob a responsabilidade do técnico em questão e
- a análise visual de uma grande quantidade de dados é uma tarefa custosa e, muitas vezes, inviável em termos de tempo e precisão.

Baseado nessas premissas, o presente trabalho propõe uma solução inovadora baseada em redes neurais artificiais e técnica de janelamento de sinais para a identificação da falha e, posteriormente, a sua localização.

Dado que uma simples extração do valor da correlação entre o sinal referência e o sinal de falha já poderia informar uma possível falha, essa medida foi mantida. Entretanto, a correlação leva em consideração todo o sinal, perdendo a informação de localidade da falha. A idéia utilizada no presente trabalho consiste no emprego de técnicas de janelamento com tamanho fixo sobre o sinal. Os sinais referência e com falta são divididos em um número m de janelas, sendo a sua correlação calculada para cada janela.

Seja C_i a medida de correlação em cada janela i . Como C_i é um número real e queremos evitar trabalhar com aproximações, aplicamos a seguinte condição a cada janela dos sinais: se $C_i < \beta$, então $C_i = 1$. Caso contrário, $C_i = 0$. A variável β denota um valor de limiar de correlação previamente estipulado. Desta forma, cada sinal é representado por uma cadeia S de m bits, onde m corresponde ao número de janelas. Cada elemento S_i dessa cadeia será então utilizado como entrada para uma rede neural do tipo MLP (*Multilayer*

Perceptron) [11], cuja saída será a distância estimada em metros. A Figura 15 ilustra o conjunto de etapas descrito anteriormente.

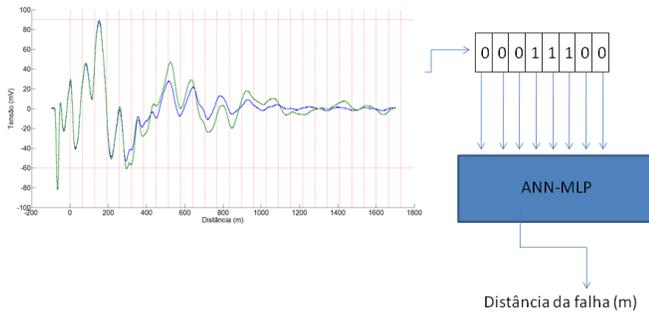


Figura 15. Esquema proposto para a localização de falhas utilizando redes neurais artificiais e técnica de janelamento fixo do sinal.

Assim, cada cadeia de bits será utilizada como entrada para uma rede neural artificial do tipo MLP, cuja arquitetura utilizada foi $n_i:20:20:1$, onde n_i corresponde ao número de neurônios da camada de entrada, 20:20 denotam duas camadas escondidas com 20 neurônios cada e 1 denota o número de neurônios da última camada, o qual contém um único valor que define a saída da rede, ou seja, o valor aproximado da localização da falta. O algoritmo de treinamento utilizado foi o Levenberg-Marquardt [12], sendo que 80% das amostras foram utilizadas para treinamento e os 20% restantes para o conjunto de teste. A base utilizada em nossos experimentos é composta por 120 pares de sinais referência e com falta.

Vários testes foram executados com o intuito de identificarmos os valores de m e β que maximizam a taxa de acerto da rede neural. Assim sendo, os seguintes valores foram adotados: $m = 80$ e $\beta = 0.6$. A Figura 13 mostra a o erro médio quadrático ($mse - mean\ squared\ error$) da rede neural MLP utilizada para os valores de tamanho de janela e limiar de correlação citados. A arquitetura final adotada foi 80:20:20:1. Os testes foram realizados em 100 diferentes conjuntos de treinamento e teste gerados aleatoriamente.

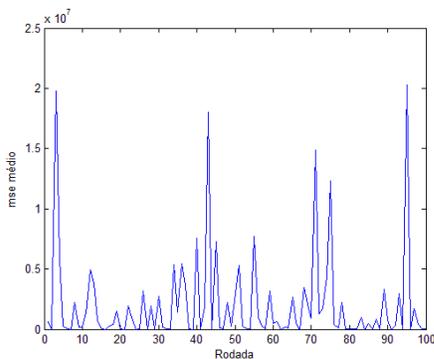


Figura 16. Simulações utilizando tamanho de janela $m = 80$ limiar de correlação $\beta = 0.6$.

Outros testes foram realizados com o intuito de determinar a arquitetura neural mais apropriada fixando os parâmetros

acima. Entretanto, foi constatado que a melhor relação custo/benefício foi a arquitetura 80:20:20:1.

VI. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA ESPECIALISTA

Um sistema especialista denominado “*Sub.ExSys*” foi desenvolvido para sistematizar o processo de determinação da distância à falha em cabos subterrâneos de média tensão, visando aperfeiçoar os procedimentos de manutenção do sistema subterrâneo da AES Eletropaulo. O objetivo é diminuir os tempos de reparo e de interrupções não planejadas, os quais podem representar elevados custos operacionais.

O modelo arquitetônico utilizado no desenvolvimento dessa ferramenta é mostrado na Figura 17. Basicamente, o software foi dividido em camadas.

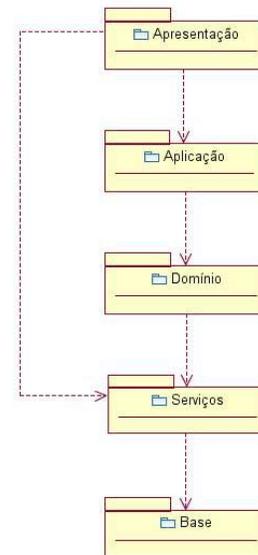


Figura 17. Camadas Arquitetônicas Representadas por Pacotes UML

A camada de apresentação é responsável pela interface com o usuário. Portanto, os elementos dessa camada são as janelas que compõem a interface gráfica de usuário. A camada de apresentação é relativamente livre de processamento ligado à aplicação e suas janelas repassam as solicitações de tarefas para a camada de aplicação. A camada de aplicação é responsável por lidar com as solicitações da camada de apresentação, pelo fluxo de trabalho (workflow), pelo estado das sessões, pelas transições entre as janelas da camada de apresentação e pela consolidação/transformação de dados dispersos para a apresentação. A camada de domínio é responsável pelos elementos que encapsulam as informações e os comportamentos (regras de negócio) relacionados à lógica da aplicação, contendo os objetos de software que representam os conceitos do domínio. A camada de serviços é constituída por objetos e subsistemas de propósito geral que fornecem serviços técnicos de suporte, tais como interface com o banco de dados, geração de relatórios e registro de erros.

Esses serviços são, geralmente, independentes da aplicação e reutilizáveis entre diversos sistemas. A camada base é

responsável pelos serviços técnicos de baixo nível, tais como estruturas de dados, funções matemáticas, criação e controle de *threads*, manipulação de arquivos, rotinas de entrada e saída de dados, estabelecimento e gerenciamento de conexões de rede, etc. Geralmente tais serviços também são independentes do aplicativo e reutilizáveis entre diversos sistemas.

A tela principal da ferramenta, mostrada na Figura 18, permite ao operador criar e manter uma base de dados que contenha: as ocorrências atendidas; os equipamentos utilizados e a equipe envolvida no atendimento de cada uma, bem como as etapas a serem seguidas para a determinação da solução.



Figura 18. Tela principal do sistema especialista

A Figura 19 mostra uma visão ampliada dos menus disponíveis. Observam-se os seguintes menus: Arquivo, Cadastro, Ocorrência, Ferramentas e Ajuda. A seguir detalham-se cada um desses menus.

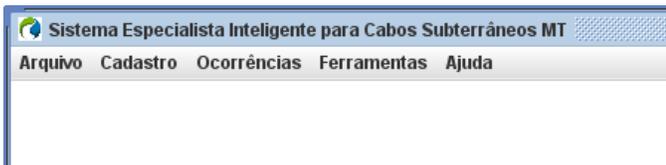


Figura 19. Detalhe da barra de menus da ferramenta

A Figura 20 mostra detalhes do menu Arquivo. Pode-se notar que esse menu abriga as funcionalidades de importação e exportação da base de dados, tanto de ocorrências quanto de dados.

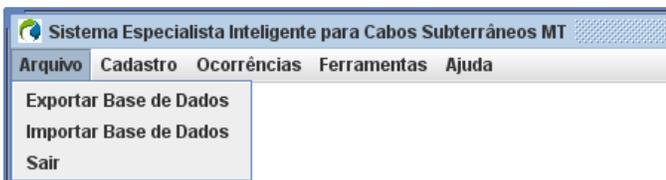


Figura 20. Tela Principal – Menu Arquivo

A Figura 21 mostra detalhes do menu Cadastro. Este menu proverá funcionalidades que permitem ao administrador autorizado incluir, no banco de dados, informações sobre novos funcionários, unidades, cabos, procedimentos de correção, instrumentos e seus respectivos fabricantes. Também

será possível modificar ou excluir informações relativas aos itens já armazenados. O acesso a essas funcionalidades se dará por meio de senha com privilégio de administrador.



Figura 21. Tela Principal – Menu Cadastro

A Figura 22 mostra detalhes do menu Ocorrência. Como se observa, duas opções serão oferecidas ao usuário: inserir os dados de uma nova ocorrência a ser atendida ou visualizar uma tela com as informações de uma ocorrência já solucionada. Neste caso, dever-se-á especificar qual ocorrência se deseja rever.

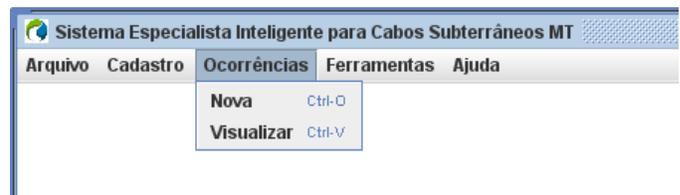


Figura 22. Tela Principal – Menu Ocorrência

A Figura 23 mostra detalhes do menu Ferramentas. Este menu oferece ao usuário as funcionalidades necessárias para: iniciar a análise de uma ocorrência atendida, isto é, a localização à distância da falha, por meio da técnica inteligente descrita na Seção V, visualizar os resultados da análise e gerar relatório impresso com as informações das análises.

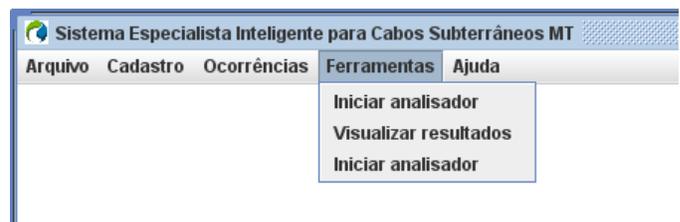


Figura 23. Tela Principal – Menu Ferramentas

Finalmente, a Figura 24 mostra detalhes do menu Ajuda. Este menu permite ao usuário obter informações sobre o uso do aplicativo (Manual) e sobre a sua versão e os responsáveis pelo seu desenvolvimento (Sobre).

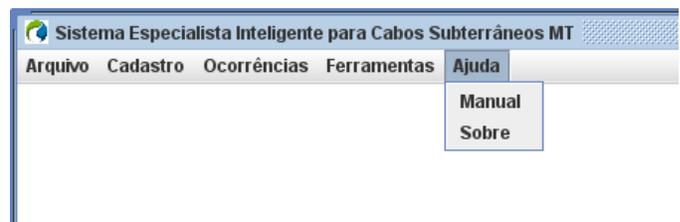


Figura 24. Tela Principal – Menu Ajuda

Como exemplo das telas de cadastro, apresenta-se na Figura 25 a tela de Cadastro de Funcionários. Essa opção possibilita a edição, inclusão e exclusão das informações de um dado funcionário. Ao selecionar essa opção, abre-se a janela mostrada na Figura 25 permitindo a atualização do banco de dados. Caso seja necessário localizar um funcionário específico, utiliza-se a aba Pesquisa, ilustrada na Figura 26. O resultado da pesquisa pode ser visualizado a partir da aba Resultados, mostrada na Figura 27.

The screenshot shows the 'Cadastro de Funcionários' application window with the 'Formulário' tab selected. The window has a blue title bar and a standard Windows-style interface. Inside, there are several input fields: 'Nº Funcional', 'Nome', 'Cargo', and 'Data de Inclusão no Setor'. Below these is a larger text area labeled 'Observações'. At the bottom of the window, there is a row of navigation buttons including arrows and symbols for adding, deleting, and saving records.

Figura 25. Tela Cadastro de Funcionário

The screenshot shows the 'Cadastro de Funcionários' application window with the 'Pesquisa' tab selected. It features a search interface with a 'Localizar por:' section containing a 'Propriedade' dropdown menu (set to 'Nome') and a 'Valor:' text input field. Below this, there are two radio buttons for 'Pesquisar por': 'Iniciais' (selected) and 'Qualquer parte'. At the bottom, there are two buttons: 'Pesquisar' and 'Limpar Pesquisa'.

Figura 26. Tela Cadastro de Funcionário - Pesquisa

The screenshot shows the 'Cadastro de Funcionários' application window with the 'Resultados' tab selected. The window displays a table with two columns: 'Nome' and 'Nº Funcional'. The table is currently empty. At the bottom center of the window, there is a button labeled 'Exibir'.

Figura 27. Tela Cadastro de Funcionário - Resultados

Após todas as informações relativas à ocorrência em atendimento terem sido inseridas no sistema, o operador pode começar a realização dos ensaios para a localização da distância da falha. Basicamente, o procedimento é o seguinte: aterrar o cabo tronco ou ramal, conectar o carro de teste, realizar testes DC nas três fases simultaneamente para determinação do condutor defeituoso e classificação do defeito. Em seguida, na fase com defeito, realizar por trechos, a medição TDR para a pré-localização do ponto de defeito. Para cada medição TDR realizada, as curvas relativas ao sinal de referência e ao sinal de defeito devem ser exportadas do CENTRIX e importados no sistema especialista. Uma vez que estas curvas estejam disponíveis no sistema especialista, elas podem ser visualizadas por meio da opção Iniciar Analisador do menu Ferramentas. Isso faz com que a tela da Figura 25 seja mostrada ao usuário. Ao clicar no botão Analisar, a ferramenta inteligente descrita na Seção V é executada e a distância ao defeito no trecho em questão é apresentada ao operador, graficamente (linha verde na Figura 28) e numericamente, como pode ser visto em detalhes na Figura 29.

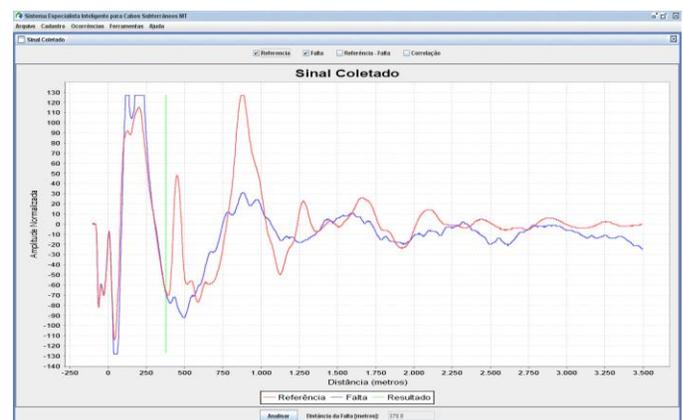


Figura 28. Tela Ferramenta - Análise



Figura 29. Tela Ferramenta – Resultado da Análise

VII. CONCLUSÃO

Após uma profunda investigação científica sobre as diversas técnicas de localização de defeitos em sistemas subterrâneos de distribuição de energia elétrica, optou-se pela aquisição de um sistema de medição móvel capaz de manter um registro de todos os ensaios realizados. A escolha do sistema de equipamentos de medição que contemplasse os requisitos de precisão e qualidade foi realizada a partir de um estudo do funcionamento do sistema de localização de defeitos em cabos subterrâneos da Sebakmt, denominado CENTRIX. A grande vantagem apresentada por esse sistema é a integração e a portabilidade dos equipamentos, os quais mostraram-se adequados para a realização de todos os tipos de testes necessários para auxiliar na localização de faltas em cabos de energia subterrâneos da AES Eletropaulo.

Após as primeiras avaliações de desempenho no laboratório de alta tensão do IEE-USP, o Laboratório Móvel foi considerado apto para ser utilizado em campo. Para verificar seu emprego em campo, diversos ensaios foram realizados em um circuito piloto da AES Eletropaulo. Esse circuito foi escolhido em função da sua representatividade em relação aos circuitos subterrâneos existentes na malha de distribuição da AES Eletropaulo.

Os dados coletados durante esses ensaios serviram para delinear e orientar o desenvolvimento e implementação de um Sistema Especialista Inteligente capaz de auxiliar na solução de problemas de identificação e de localização de defeitos em cabos subterrâneos de média tensão da AES Eletropaulo.

Apesar das facilidades de operação dos equipamentos disponíveis no sistema CENTRIX, da excelente documentação e do registro dos procedimentos e dados obtidos em cada ensaio, a precisão e a rapidez no diagnóstico mostrou-se fortemente dependente de fatores subjetivos relacionados com a experiência do técnico responsável pelo ensaio. Uma vez que, a pré-localização do defeito depende de uma inspeção visual das formas de onda obtidas do processo de reflexão de arco (ARM), foi decidido desenvolver um Sistema Inteligente, utilizando as redes neurais artificiais, capaz de minimizar ou eliminar a subjetividade da análise visual do sinal, aumentando a eficiência na precisão da localização do defeito em torno de 20 metros, gerando um ganho de tempo e de recursos necessários para o sucesso na localização exata do defeito.

Com a utilização do Sistema Especialista Inteligente (*Sub.ExSys*) desenvolvido, todas as informações capturadas durante o atendimento de uma ocorrência estarão centralizadas em uma única base de dados. Para cada ensaio realizado, estarão disponíveis os tempos gastos em cada uma de suas etapas, o que permitirá acompanhar o progresso de cada uma das equipes de manutenção e planejar treinamentos adequados para sanar possíveis deficiências observadas e/ou planejar

manutenções com estimativas mais realistas de horas necessárias.

Em resumo, com a aquisição do Laboratório Móvel CENTRIX e com o desenvolvimento do Sistema Especialista Inteligente é possível elencar os seguintes ganhos efetivos com esse P&D:

- Redução de 60% na preparação dos ensaios (de 20 minutos para 08 minutos).
- Simplificação na operação do equipamento, evitando possíveis erros durante os testes.
- Operação completamente informatizada.
- Prevenção de acidentes durante os testes, pois o equipamento não permite que nenhuma etapa seja suprimida, garantindo assim a total segurança dos testes.
- Armazenamento dos resultados para análises e comparações dos resultados, visando aumentar a assertividade dos métodos que utilizam a reflectometria.
- Aumento na confiabilidade nos resultados apresentados pelo equipamento, devido às medições serem realizadas de forma completamente automatizada e com equipamentos digitais.

As pesquisas estão em franco desenvolvimento, no sentido de melhorar ainda mais a precisão na localização de defeitos em cabos subterrâneos da AES Eletropaulo com a realização de novos ensaios para serem incorporados no banco de dados do Sistema Especialista Inteligente denominado de “Sub.ExSys”, um dos produtos desse P&D.

VIII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J.M. Nahman, V.B. Djordjevic, D.D. Salamon, "Grounding effects of HV and MV underground cables associated with urban distribution substations" in IEEE Transactions on Power Delivery, pp 17(1): 111-16, Jan. 2002.
- [2] D. Fournier, N. Amyot, "Diagnostic of overheating underground distribution cable joints" in 16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution IEE Conf. Publ -Nº.48, pp. 10, vol.1, 2001.
- [3] B.C. Sang, K.K. Dae and H.J. Seong, "A study on the reliability evaluation of underground distribution system" in Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, pp .50(7): 309-17, July 2001.
- [4] Y.R Garcia-Colon, "Power cable on-line diagnosis using partial discharges ultra wide band techniques" in IEEE Large Engineering Systems Conference on Power Engineering -Conference Proceedings. Theme: Powering Beyond 2001 Cat Nº.01ex490, pp. 201-5, 2001.
- [5] S. Navaneethan, J.J. Soraghan, W.H. Siew, F. McPherson and P.F. Gale, "Automatic fault location for underground low voltage distribution networks" in IEEE Transactions on Power Delivery. pp. 16(2): 346-51, April 2001.
- [6] S. Navaneethan, J.J. Soraghan, W.H. Siew, F. McPherson and P.F. Gale, "Automatic fault location using intelligent processing" in PowerTech Budapest 99. Abstract Records Cat. Nº.99EX376, pp. 29, 1999.
- [7] W. Charytoniuk, J.L. Wei, S.C., Mo, J. Cultrera and M. Theodore, "Arcing fault detection in underground distribution networks-feasibility study" in IEEE Transactions on Industry Applications, pp. 36(6): 1756-61, Nov.-Dec. 2000.
- [8] J. Cardoso, K.L. Butler and A.E. McBride, "Field studies of incipient behavior in damaged underground cable" in Proceedings of the American Power Conference. Reliability and Economy Technology Focus for Competition and Globalization, pp. 522-6 vol.1, 1998.

- [9] J. Song, H. Xie, Y. Wang and A. Li, "Study on phase-sensitive short-circuit protection in underground LV distribution networks based on detecting power factor" in *Power System Technology*, pp. 23(2): 38-41, Feb. 1999.
- [10] W. Reder and D. Flaten, "Reliability centered maintenance for distribution underground systems" in *2000 Power Engineering Society Summer Meeting* Cat. N^o.00CH37134, pp. 551-6 vol.1, 2000.
- [11] S. Haykin, "Neural Networks: A Comprehensive Foundation", 2ed, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 1999.
- [12] J. J. More, "The Levenberg-Marquardt algorithm: Implementation and theory", *Lecture Notes in Mathematics*, vol. 630, no. x, pp. 105-116, Springer, 1977.