

SILDOV – Localizador de Defeitos para Sistemas de Distribuição por Ondas Viajantes

E. T. Pereira, FURB; P. B. Uliana, DOCUMENTTA; S.H.L. Cabral, FURB; M. Wendhausen, DOCUMENTTA; R.J.O. de Carvalho, FURB; L.F. Passos, DOCUMENTTA; J. Bachmann, CELESC; C.C. da Silva, FURB; A.C. Eble, CELESC; R.E. da Silva, CELESC

Resumo—Este trabalho apresenta os resultados de 12 meses de desenvolvimento de um protótipo tecnológico, denominado SILDOV. O SILDOV localiza defeitos com uma precisão de ± 500 metros sobre troncos de alimentadores de distribuição. Defeitos ocorridos em ramais são localizados no ponto de derivação do ramal sobre o tronco do alimentador. Resultados experimentais obtidos a partir da instalação do sistema em circuito piloto são apresentados. A situação atual desse desenvolvimento é discutida e recomendações para trabalhos futuros são apresentadas. O SILDOV é de *know-how* nacional, os softwares são proprietários, amigáveis e em língua portuguesa, não existe equipamento similar nacional e o sistema oferece alta relação custo x benefício.

Palavras-chave—Continuidade de Fornecimento, Localização de Faltas, Ondas Viajantes, Sistemas de Distribuição.

I. INTRODUÇÃO

Atualmente se constata no setor elétrico brasileiro uma grande preocupação em relação à qualidade da energia elétrica fornecida e também, com a definição de novos padrões da qualidade acompanhando a crescente exigência por parte dos consumidores.

Dentre todos os fenômenos que afetam a qualidade da energia elétrica dois se destacam pela sua importância: as interrupções e as variações momentâneas de tensão, causadas principalmente por defeitos ou acidentes envolvendo os sistemas de transmissão e distribuição de energia.

Assim sendo, não se pode iniciar uma conversa sobre qualidade de energia em empresas de transmissão ou de distribuição, sem tratar inicialmente dos dois grandes problemas:

- A localização rápida de um defeito permanente;
- A localização precisa de um defeito transitório;

Esse trabalho foi em maior parte apoiado pela Centrais Elétricas de Santa Catarina, no escopo de seu Programa Anual de P&D e foi apoiado parcialmente pela Fundação Universidade Regional de Blumenau.

E.T. Pereira; S.H.L. Cabral; R.J. O. Carvalho; C.C. da Silva; trabalham no Departamento de Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Regional de Blumenau (e-mail: elisete@furb.br; scabral@furb.br; ricjose@furb.br; ccamara@furb.br). P.B. Uliana; M. Wendhausen e L.F. Passos trabalham na Documentta Tecnologia Ltda. (e-mail: poli@atomlig.com.br; moacir@equalix.com.br; luis@documentta.com.br). J. Bachmann; A.C. Eble e R.E. da Silva trabalham na Centrais Elétricas de Santa Catarina (e-mail: julianob@celesc.com.br; aloizioe@celesc.com.br; regis@celesc.com.br).

Dependendo do sistema, é freqüente que o tempo investido para identificar o local de um defeito seja maior do que o tempo investido para corrigi-lo e o tempo empregado para localizar o defeito se soma ao tempo de reparo na contabilização dos indicadores de continuidade DEC/FEC e DIC/FIC.

No caso de falhas não permanentes o conhecimento sobre o local da falha é muito relevante para as equipes de manutenção, pois problemas como esses tendem a se repetir causando desligamentos que poderiam ser evitados.

Para linhas de transmissão o problema da localização de defeitos está praticamente resolvido. Principalmente por meio de localizadores baseados no cálculo de impedância (utilizando dados coletados por oscilógrafos e relés digitais) que apresentam bons resultados para quase todos os tipos de defeito, com exceção daqueles de impedância muito alta. Além disso, está disponível no mercado internacional equipamentos de localização que se baseiam na captação e análise das ondas viajantes geradas pelo evento. Esses apresentam excelentes resultados para qualquer tipo de defeito, mas também apresentam grandes inconvenientes. Os inconvenientes estão relacionados principalmente com os altos custos de aquisição, treinamento e manutenção e com o fato de as interfaces com o equipamento estarem em língua estrangeira.

Já para a distribuição, a localização rápida e precisa dos defeitos é um problema ainda não resolvido e de natureza complexa. Principalmente para o sistema de distribuição brasileiro típico, onde as estruturas são radiais, possuem ramais muito longos, devido à extensão territorial, e a topologia da rede sofre expansões e alterações freqüentes, isso para citar somente alguns dos complicadores da questão.

As diversas técnicas de localização de defeitos na distribuição podem ser agrupadas nas seguintes categorias:

- Sistemas de sinalizadores locais - Compostos de conjuntos de equipamentos que identificam uma condição de defeito realizando uma sinalização visual ou luminosa. São instalados ao longo do ramal de distribuição, principalmente nas bifurcações. A linha deve ser percorrida para inspeção visual dos sinalizadores no trecho sob defeito. Para ser eficiente, o sistema depende de um grande número de equipamentos instalados e de manutenção contínua dos mesmos.

- Sistemas de monitoração remota: Compostos de

conjuntos de equipamentos que identificam uma condição de defeito e se comunicam com uma central remota. São instalados ao longo do ramal de distribuição principalmente nas bifurcações. A informação sobre onde se encontra o trecho sob defeito é quase instantânea. Para serem eficientes dependem de um bom número de equipamentos instalados, sob contínua manutenção e de canais de comunicação confiáveis e de baixo custo.

- Sistemas de localização baseados na simulação da impedância do defeito: Compostos por equipamentos instalados em SE's que monitoram as correntes e tensões com registro oscilográfico ou fasorial e calculam a posição do defeito com base na simulação do ramal e das cargas nele instaladas. Para serem eficientes dependem de uma grande precisão dos modelos utilizados, que devem estar sob atualização permanente, tanto do ramal como das cargas conectadas no momento do defeito.

O sistema de sinalizadores locais é a solução mais empregada hoje, mas apresenta uma série de problemas de operação e manutenção, além do tempo necessário para percorrer as linhas e ramais que por si só é um problema. Os sistemas de monitoração remota poderiam ser uma boa opção, mas hoje não existe sistema comercial de baixo custo que viabilize este tipo de aplicação. Quanto aos sistemas de simulação, apesar de alguns trabalhos de pesquisa terem apresentado resultados de localização extremamente precisos, a experiência mais comum com este tipo de abordagem na localização de defeitos em linhas de transmissão é infrutífera em diversas condições. Adicionando-se o fato de os sistemas de distribuição serem muito mais complexos, são grandes os questionamentos quanto ao emprego dessa prática. Assim, pode-se afirmar que hoje, a localização de defeitos em alimentadores de distribuição ainda é um problema em aberto; não resolvido de forma prática, eficiente e economicamente viável.

O esquema de localização de defeitos por ondas viajantes, que apresenta excelentes resultados para os sistemas de transmissão [1] [2], foi por longo tempo considerado inviável para aplicação na distribuição, especialmente devido às limitações da tecnologia e a complexidade dos sistemas de distribuição. Com o surgimento de tecnologias de alta velocidade e precisão, como o GPS, PLD's e GSM, as limitações tecnológicas desapareceram e nos ciclos 1999/2000 e 2001/2002 do Programa Anual de P&D da CELESC, a equipe de pesquisadores da Universidade Regional de Blumenau (FURB) integrada por pesquisador da Universidade de Nottingham, Inglaterra, demonstrou em trabalho preliminar [3] a [6] que um sistema de localização de defeitos através de ondas viajantes poderia ser desenvolvido com sucesso para aplicações junto a sistemas de distribuição.

Por se tratar de um trabalho pioneiro, tanto no Brasil quanto a nível mundial, essa pesquisa teve que su-

perar uma série de dificuldades e limitações, principalmente aquelas associadas aos equipamentos utilizados no trabalho preliminar, os quais foram originalmente projetados para operar em linhas de transmissão e tiveram que ser adaptados para a distribuição. E também, a um conservadorismo típico (por vezes salutar) por parte de engenheiros e especialistas da área de distribuição, que acreditavam que as ondas viajantes só encontravam aplicabilidade junto à transmissão.

Realmente, embora esse trabalho preliminar tenha permitido a validação de uma técnica de localização precisa de faltas para sistemas de distribuição, através de modelos teóricos e medições em campo, estabelecendo assim as bases para o desenvolvimento de um novo sistema de localização de defeitos por ondas viajantes, a tecnologia empregada era um limitante. Os equipamentos envolvidos na localização por esse novo método ficavam muito distantes de constituir um sistema funcional e economicamente viável, que pudesse ser imediatamente empregado na prática. Assim, no Ciclo 2004/2005 de P&D da CELESC, a equipe da FURB, agora em parceria com a empresa Documenta Tecnologia Ltda. muito experiente no desenvolvimento de equipamentos de alta tecnologia para sistemas de potência, propôs novo projeto. Objetivando este, o desenvolvimento de hardware e softwares próprios para a localização de defeitos em sistemas de distribuição brasileiros, por ondas viajantes, de precisão de ± 500 metros, de excelente desempenho e de baixo custo. Esse projeto, intitulado SILDOV, foi desenvolvido num período de 12 meses e é objeto desse artigo.

II. DESCRIÇÃO GERAL DO SILDOV

O Sistema de Localização de Defeitos por Ondas Viajantes para Sistemas de Distribuição, é composto basicamente por uma central de análise que se comunica por canal telefônico com um par de equipamentos que monitora o tronco de um alimentador de distribuição, a fim de coletar dados armazenados que após processados podem resultar na localização de defeitos sobre o tronco do alimentador com precisão de aproximadamente 500 metros.

O tronco do alimentador de distribuição é monitorado por um equipamento instalado na SE e outro instalado em ponto sobre o tronco, definindo assim o intervalo de monitoração, conforme Fig.1. As faltas ocorridas nesse intervalo são localizadas com a precisão especificada e as faltas em ramais que iniciam dentro do intervalo monitorado são localizadas sobre o tronco no ponto de derivação do ramal.

As limitações do sistema serão discutidas em detalhes mais adiante.

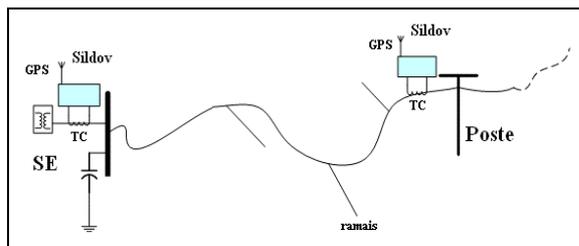


Figura 1. Esquema de monitoração de terminação dupla.

Cada equipamento monitora correntes de alta frequência (ondas viajantes originadas em eventos transitórios) e tensões de baixa frequência nas três fases do alimentador. As correntes de alta frequência, ou ondas viajantes, são captadas por transdutores de corrente (TC) de alto tempo de resposta. As tensões de baixa frequência são também extraídas do TC através de um derivador de tensão. Integrado ao sistema há um mecanismo de recepção de tempo de alta precisão que utiliza tecnologia GPS. O SILDV emprega tecnologia PLD para a qual foi desenvolvido software embarcado específico. Os equipamentos em ambas as extremidades do intervalo monitorado, se comunicam com a central via modem, podendo transmitir tanto as informações de localização quanto as formas de onda de corrente dos sinais captados.

A central de análise se comunica com os equipamentos sempre que desejar, verificando se os mesmos detectaram uma condição de disparo. A central de análise é constituída por computador, modem para comunicação telefônica e software de alto nível. O software, inteiramente desenvolvido no escopo desse trabalho, é amigável e admite vários níveis de análise, podendo fornecer somente a informação sobre a distância da SE até a um ponto de defeito persistente. Ou informações sobre eventos não permanentes, como faltas automaticamente recompostas, ou operações de cargas e de bancos de capacitores ocorridas no intervalo monitorado, oferecendo em qualquer caso e se desejado as formas de onda correspondentes aos eventos.

O sistema emprega algoritmos de localização de defeitos por ondas viajantes utilizando dados de corrente armazenados nos discos rígidos e utiliza um algoritmo para tratamento dos dados de tensão a fim de expurgar os registros gerados por ruídos sem interesse, podendo apresentar ao usuário somente dados relativos a defeitos persistentes. Dados sobre defeitos automaticamente recompostos pela rede podem, opcionalmente, serem visualizados pelo operador para fins de análise.

Transdutores de Corrente:

Os transdutores de corrente (TC) utilizados na captação das ondas viajantes são os olhos do sistema. Eles são uma parte crítica e vital para o conjunto. Esse TC foi desenvolvido independentemente e o Sildov foi projetado a partir a existência do mesmo. Trata-se de uma bobina de Rogowski a qual, ao contrário do transformador de corrente, não possui núcleo de material magnético, o que permite elevada sensibilidade e con-

seqüente facilidade de reprodução das formas de onda das perturbações na corrente primária uma vez que sua resposta em frequência torna-se mais ampla. Mais detalhes sobre esse TC são encontrados em: [7] a [9].

Embutido nos objetivos do projeto Sildov estava à necessidade de que os equipamentos fossem de baixo custo, para permitir que um grande número deles pudesse ser instalado em rede de Distribuição. Essa meta foi atingida. Estimou-se que uma unidade Sildov, se produzida em larga escala e em valores atuais, teria custo unitário de aproximadamente dez mil reais.

III. CARACTERIZAÇÃO DO PROTÓTIPO

O Sildov recebe e digitaliza sinais enviados pelos transdutores de corrente e tensão e tem as seguintes características:

- Três entradas para medição de corrente em alta frequência (até 2 MHz);
- Três entradas para medição de tensão em frequência (1.2kHz), com possibilidade de uso de apenas duas entradas para arranjos onde somente as tensões fase-fase estiverem disponíveis;
- Circuito de compensação para conexão no secundário dos transdutores de medição das correntes de altas frequências;
- Sistema de medição de tempo integrado ao medidor, a partir de antena para recepção direta de sinais GPS;
- Modem externo para comunicação via linha telefônica discada ou dedicada;
- Alimentação em $125V_{cc} \pm 20\%$.

A arquitetura do Sildov, conforme Fig.2, inclui as seguintes placas:

Placa CAD-OV: Placa com três entradas para os transdutores de corrente (TC) que captam as ondas viajantes. A placa está baseada em CAD que possui 4 canais de 12 bits (sendo que somente 3 canais são utilizados), com frequência máxima de amostragem de 2 MHz por canal. Um circuito de condicionamento é utilizado para compatibilizar os níveis de sinal e impedâncias de saída dos TC's com as entradas do CAD. O CAD é controlado por um PLD que armazena os registros de ondas viajantes em uma memória de 128kbytes. O PLD da CAD-OV recebe o sinal de PPS e sua aquisição é sincronizada pelo GPS. A placa gera um novo registro de ondas viajantes a cada segundo gerando um fluxo contínuo de dados para a CPU a qual decide por meio de algoritmo se os registros realmente correspondem a sinais de falta. A placa é conectada por meio de um *flat-cable* de 10 vias, que implementa uma serial de alta velocidade, recebe o sinal PPS e também um sinal de *reset* para a contagem de segundos.

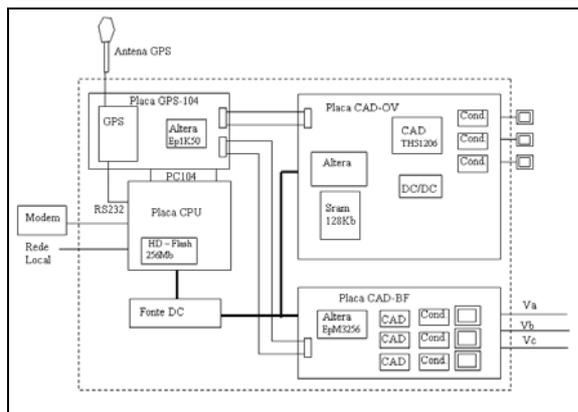


Figura 2. Arquitetura do Sildov.

Placa CAD-BF: Placa de leitura de tensões em frequência (5khz). Esta placa está baseada em PLD que controla os 3 CAD's de 16 bits, que são lidos em tempo real. Cada conversor é ligado a um circuito de medição de tensão baseado em transformador de instrumentação. Os dados lidos são transmitidos por uma interface serial de alta velocidade implementada por meio de um *flat-cable* de 10 vias.

Placa GPS-104: Placa de controle de tempo e comunicação. A placa também serve de base para um receptor GPS de mercado. O coração da placa é um PLD que implementa relógio de grande precisão, sincronizado pelo GPS, que armazena os tempos de início dos registros e também a comunicação serial com a placa CAD-BF. Os dados recebidos via serial, são transferidos por controle DMA para memória da placa CPU.

Placa CPU: Placa CPU industrial adquirida no mercado. Esta placa é um PC que roda sistema LINUX e contém memória não volátil de 256Mbytes. Esta placa controla a placa GPS-104 a qual está conectada por meio de um barramento PC104. A CPU recebe os dados do GPS por meio de uma interface RS232, além disso, se comunica através de modem e de interface de rede local. A CPU recebe continuamente dados de aquisição em baixa frequência e também pode ler os registros de OV armazenados, bem como as contagens de tempo armazenadas na placa GPS-104. Com base nestas informações a CPU gera registros de ondas viajantes que são armazenados na memória não volátil.

Fonte DC: A fonte fornece todas as tensões necessárias ao sistema, podendo ser alimentada com 125Vcc ou 110/220Vac.

IV. SISTEMA PILOTO

Para testar a eficiência da localização de eventos transitórios na rede de distribuição, duas unidades Sildov foram instaladas nas extremidades de um trecho de alimentador. A central de análise remota, constituída por PC, software próprio e modem, se comunicou com os equipamentos através de linha telefônica fixa.

O piloto foi instalado junto ao alimentador BND08, de 23,8 kV da Celesc, conforme Fig.3. Uma unidade de hardware foi instalada na subestação SE Blumenau II (Equipamento A) e outra montada em poste no centro do Município de Pomerode (Equipamento B). A Fig.4 mostra os dois equipamentos que foram instalados no piloto. A SE Blumenau II e o poste em Pomerode definiram assim o intervalo monitorado.

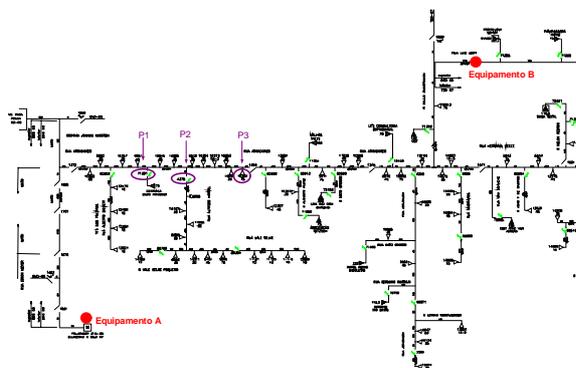


Figura 3. Unifilar parcial do alimentador BND08- CELESC.



Figura 4. Fotografia das duas unidades Sildov instaladas.

V. RESULTADOS

O protótipo foi desenvolvido em um período de 12 meses a partir de resultados obtidos no projeto de P&D anterior, que comprovou a aplicabilidade da teoria e método de localização por ondas viajantes para sistemas de distribuição. A validação do sistema tinha que partir de eventos de localização conhecida, mas o relativamente curto período de 12 meses e a impossibilidade de provocar faltas verdadeiras de localização conhecida na rede onde o protótipo do sistema se encontrava instalado impôs que os resultados para validação se limitassem a eventos de manobra de cargas e de abertura de bancos de capacitores.

Os casos a seguir apresentam resultados de localização de pontos de manobra previamente definidos com o propósito de testar o Sildov.

A. Casos 1 a 3:

No dia 21 de outubro de 2006 foram programadas manobras, aberturas e fechamentos de chaves fusíveis de transformadores e ramais de distribuição. O tempo total entre o início e término das operações foi inicialmente estimado em 1 minuto. Os dados sobre essas operações podem ser verificados em Documento Celesc (SD's) referente a operações no sistema.

Os três locais de manobra estão indicados na Fig.3. Os pontos P1, P2 e P3 são as chaves 71301, 4370 e 10352 respectivamente, escolhidas para manobra e verificação da eficiência do sistema. A Tabela 1 abaixo apresenta as distâncias das chaves até a SE. Esses testes, assim como os demais, consistiram em verificar as distâncias de localização das chaves através do Sildov; se os resultados apresentassem precisão de $\pm 500\text{m}$ o sistema poderia ser validado com sucesso.

TABELA I
IDENTIFICAÇÃO DAS CHAVES MANOBRADAS E
DISTÂNCIAS ATÉ A SUBESTAÇÃO

ID das Chaves	Distância até a SE
71301	8.882m
4370	10.700 m
10352	13.150 m
Dist. entre equipamentos A e B	16.000 m

Caso 1:

Os eventos observados pelo Sildov devido à abertura e fechamento da chave 71301, localizada a 8.882 metros da SE, podem ser vistos na tela do software Sildov, conforme Fig.5. Esse software está instalado na central remota de análise, a qual poderia estar localizada em Centro de Operação (COD) da concessionária, por exemplo.

As três linhas selecionadas na Fig.5, correspondem aos fechamentos das três fases (uma chave fusíveis por fase) da chave 71301, manobrada no local P1 da Fig. 3. Na Fig.5, a coluna 'Equipamento A' informa a data e horário de chegada da onda viajante na SE Blumenau II e a coluna 'Equipamento B' fornece a mesma informação relativamente ao poste em Pomerode.

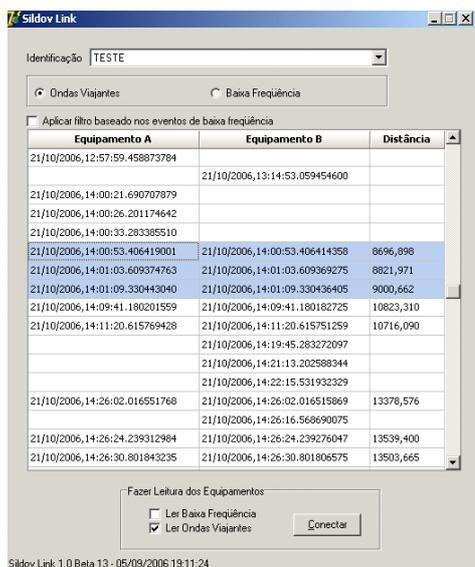


Figura 5. Tela do software Sildov com registros correspondentes ao fechamento das três chaves fusíveis monopolares na manobra da chave 71301.

Na mesma figura, a coluna 'Distância' informa ao despachante onde o evento ocorreu. No caso da manobra no local P1, o sistema localizou o fechamento monopolar das três chaves fusíveis. As aberturas das chaves não foram localizadas porque os transitórios

gerados na abertura são de menor intensidade devido ao *load-buster* e assim, não são suficientes para sensibilizar o equipamento. Os sinais transitórios gerados em uma falta são, em geral, muito mais intensos do que os produzidos pela abertura ou fechamento de chaves fusíveis.

A Tabela II apresenta os erros nas localizações.

TABELA II
ERROS NA LOCALIZAÇÃO DA CHAVE 71301

Evento 21/10/2006	Local Informado (m)	Local Conhecido (m)	Erro (m)
14:00:53	8.882	8.696	186
14:01:03	8.882	8.821	61
14:01:09	8.882	9.000	118

O sistema localizou o evento com sucesso, o maior erro está abaixo da precisão de $\pm 500\text{m}$.

Caso 2:

Durante a execução da manobra da chave 4370 ocorreu um rompimento de *jumper* na fase A, como pode ser verificado em SD correspondente. Esse evento também foi localizado, conforme exposto a seguir.

Os eventos observados pelo Sildov devido à abertura e fechamento da chave 4370, localizada a 10.700 metros da SE, podem ser vistos na tela do software Sildov, conforme Fig.6 e Fig.7.

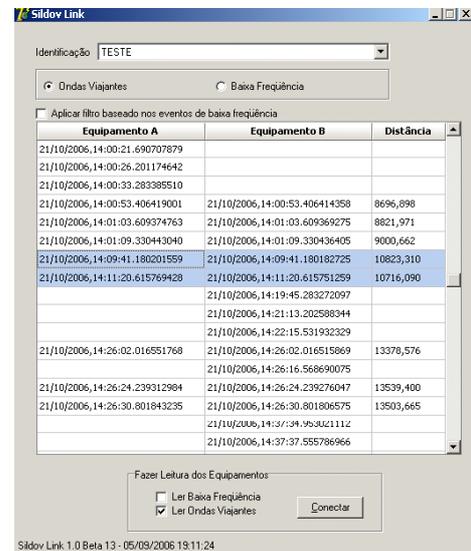


Figura 6. Tela do software Sildov com registros correspondentes a abertura de duas entre três chaves fusíveis monopolares na manobra da chave 4370.

A área selecionada na Fig. 6 corresponde aos registros de abertura de duas das três chaves fusíveis manobradas no local P2 (Fig. 3), correspondente a chave trifásica 4370. Essa chave, ao contrário das outras duas, conecta um ramal de carga significativa ao tronco do alimentador BND08. Nesse ramal também está presente um Banco de Capacitores como pode ser observado na Fig.3. Esses dois fatores resultam em transitórios mais intensos na operação da chave. Por isso, essa foi a única dentre as três manobras que apresentou registros correspondentes as aberturas das

tou registros correspondentes as aberturas das chaves fusíveis. Além da abertura também foi localizado o fechamento das três chaves fusíveis, como pode ser observado na área selecionada da Fig.7.

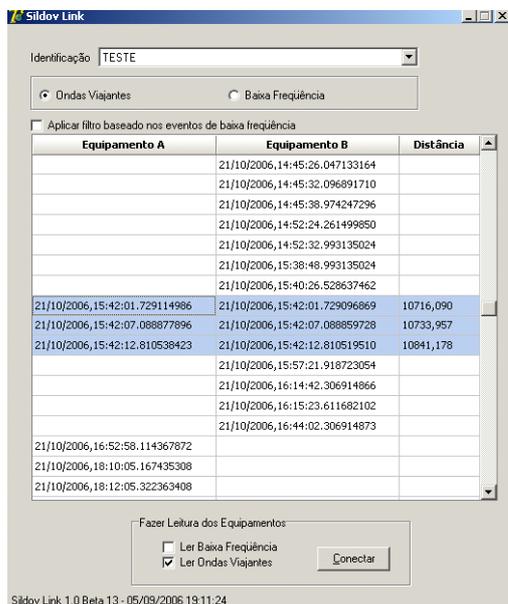


Figura 7. Tela do software Sildov com registros correspondentes ao fechamento das três chaves fusíveis monopolares na manobra da chave 4370.

Nessa manobra não foi observado o tempo de 1 minuto de intervalo entre a abertura e fechamento como inicialmente planejado. Necessidade imposta pela presença do Banco de Capacitores de Linha no ramal e ao conserto do *jumper* rompido no momento do fechamento da chave conforme relatado na SD.

A Tabela 3 abaixo resume as informações desse teste:

TABELA III
ERROS NA LOCALIZAÇÃO DA CHAVE 4370

Evento 21/10/2006	Local Informado (m)	Local Conhecido (m)	Erro (m)
14:09:41 – Abe.	10.700	10.823	123
14:11:20 – Abe.	10.700	10.716	16
15:42:01 – Fech.	10.700	10.716	16
15:42:07 – Fech.	10.700	10.733	33
15:42:12 – Fech.	10.700	10.841	141

O Sildov localizou o evento com sucesso. O maior erro verificado foi de 141 metros e está abaixo da precisão de $\pm 500m$ especificada.

Caso 3:

Os eventos observados pelo Sildov devido à manobra da chave 10352, localizada a 13.150 metros da SE, podem ser vistos na tela do software Sildov, conforme Fig.8.

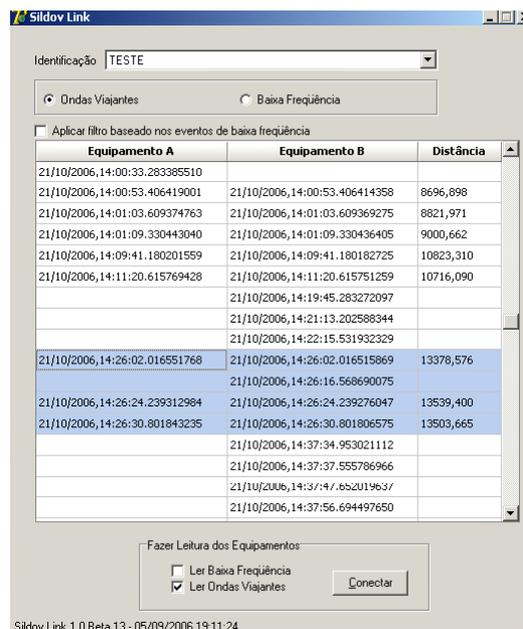


Figura 8: Registros da manobra da chave 10352, conforme tela do software Sildov.

A área selecionada na Fig. 8 informa os fechamentos das três chaves fusíveis manobradas no ponto P3 (Fig.3), correspondente a chave 10352 (sistema trifásico). A coluna 'Equipamento A' indica a data e horário de da chegada da onda viajante na SE Blumenau II e a coluna 'Equipamento B' fornece as mesmas informações em relação ao poste em Pomerode.

Também na Fig.7, podemos observar na coluna 'Distância' onde o defeito ocorreu, em metros contados a partir da SE. Essa é a informação relevante para o despachante.

Nessa manobra o sistema localizou o fechamento monopolar das três chaves fusíveis. A abertura dos fusíveis não foi localizada, devido a uma baixa intensidade dos transitórios por ela produzida.

A Tabela 4 abaixo, resume o erro do sistema:

TABELA IV
ERROS NA LOCALIZAÇÃO DA CHAVE 71301

Evento 21/10/2006	Local Informado (m)	Local Conhecido (m)	Erro (m)
14:26:02	13.150	13.378	228
14:26:24	13.150	13.539	389
14:26:30	13.150	13.503	353

O Sildov localizou o evento com sucesso.

A chave 10352 opera um transformador de 75 kVA. Quando originalmente a manobra foi programada não se esperava sucesso nessa localização, mesmo porque essa operação não foi localizada com sucesso pelo sistema importado empregado nos primeiros dois anos da pesquisa. Esse resultado parece indicar que o sistema Sildov é mais eficiente para redes de distribuição, como almejado.

B. Caso 4:

Os três casos anteriormente discutidos apresentaram uma das possíveis telas do software Sildov, onde se visualizam somente os resultados de registros de ondas transitórias de alta frequência e localizações de eventos. Um despachante pouco treinado poderia limitar-se as informações oferecidas nessa tela (exemplificada nas figuras de 5 a 8). O software, entretanto, oferece outras opções de análise. Em alguns casos, o exame das formas de onda verificadas num distúrbio pode ser de interesse para um especialista bem treinado. O presente caso exemplifica essa situação.

No dia 03 de setembro a Celesc operou o Banco de Capacitores (BC) localizado na barra da SE Blumenau II. Esperava-se que o Sildov localizasse o evento a 0 ± 500 metros da SE, ou seja, no início da linha. O Sildov localizou a o fechamento do BC da seguinte forma:

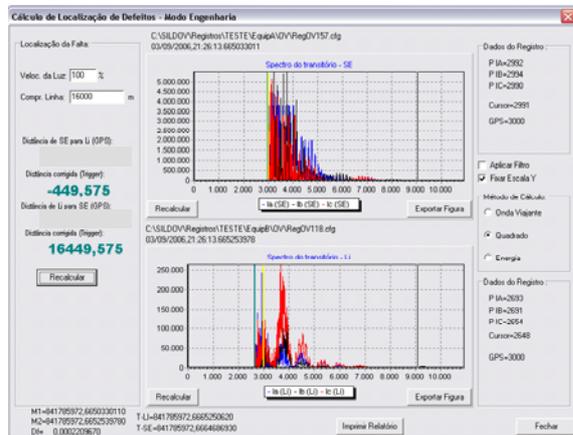


Figura 9: Localização da operação do Banco de Capacitores na barra da SE Blumenau II. Tela do software Sildov.

A Fig.9 mostra a tela do software Sildov no Modo Engenharia, onde, além das distâncias do ponto do evento até os equipamentos de monitoração, as formas de onda também podem ser visualizadas. Não houve registros quando da abertura do BC, como esperado. O fechamento do BC ocorreu às 21:26:13 horas e ambos equipamentos registraram o evento, a localização deu-se com um erro de -449,575 metros.

Nesse teste a velocidade de propagação das ondas viajantes havia sido calibrada como 100% da velocidade da luz, conforme pode ser visto na Fig. 9. Isso certamente introduziu um erro maior na localização, pois embora em sistemas de distribuição a velocidade de propagação seja mais alta do que em sistemas de transmissão, jamais será 100% da mesma, mesmo assim o erro ficou dentro dos limites especificados.

VI. LIMITAÇÕES DO PROTÓTIPO

1. É importante observar que o protótipo Sildov (-v2 -04) foi desenvolvido para uso em SE, embora também possa ser montado em poste da rede de distribuição como de fato se encontra na instalação piloto. Para a instalação no poste foi utilizado um gabinete de mercado que abriga o equipamento, modem e *no-*

break. Um projeto final deveria diferenciar os equipamentos conforme seus locais de instalação.

2. O Sildov-v2-04 pode e provavelmente deve ser desenvolvido enquanto produto. Na transformação do protótipo do equipamento em produto, o sistema pode ser otimizado em suas funcionalidades especialmente no que se refere aos seguintes pontos: (1) Possibilidade de monitoração das três fases de mais de um alimentador. (2) Projetar um equipamento especializado para montagem em poste e para monitorar um único alimentador. (3) Fazer com que o equipamento se comunique automaticamente com a central na ocorrência de um disparo em condições desejada. (4) Os resultados das localizações poderem ser publicados em página web, atualizada automaticamente pelo software da central de análise, que pode opcionalmente enviar e-mail ou mensagens SMS para endereços pré-definidos informando dados de localização e/ou possíveis problemas no sistema.

3. O protótipo foi desenvolvido em um período de 12 meses a partir de resultados obtidos em projeto de P&D anterior que comprovou a aplicabilidade da teoria e método para sistemas de distribuição. Esse curto período e a impossibilidade de se provocar faltas verdadeiras na rede impõe que os resultados para validação do sistema de localizações se limite a eventos de operação de carga e bancos de capacitores, como os apresentados. Embora não possa haver dúvidas, dado os resultados obtidos até então, que o sistema Sildov apresente um excelente desempenho na localização precisa de defeitos no circuito piloto, outras configurações de alimentadores devem ser testadas por períodos de tempo mais longos, antes que se possa considerar atendidas todas as questões dignas de análise. Por exemplo, em projeto de P&D anterior, que serviu de base ao presente projeto, realizado com o emprego de tecnologia importada e adaptada a distribuição, pode-se precisar que o limite da impedância de falta para fins de localização era de 7 k Ω . Não houve tempo hábil de teste para que se possa precisar o limite de impedância de falta da tecnologia presentemente desenvolvida embora estime-se que seja melhor ou igual a 7k Ω . Há também que se avaliar se a presença de bancos de capacitores, unidades geradoras e outros possíveis elementos no tronco de alimentadores, prejudicam a localização da falta e, nesse caso, desenvolver esquemas de localização que possam contornar essas situações.

A equipe de desenvolvimento e execução do presente trabalho recomenda que se providencie a montagem de mais unidade do Sildov, para serem instaladas e testadas junto a alimentadores de distribuição de outras topologias, além daquela já experimentada em circuito piloto. Sendo este um trabalho inovador a nível mundial, acredita que tal investimento poderia resultar em enormes benefícios não somente para a Celesc, como também para a comunidade científica e tecnológica da área de Sistemas de Potência no Brasil.

VII. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as contribuições do Dr. Da-

vid P.W. Thomas, da Universidade de Nottingham, Inglaterra, pelos valiosos comentários e discussões durante a execução desse trabalho. Agradecem também o valioso apoio do Sr. Rafael Martelli durante a elaboração desse documento e execução do projeto. Agradecem ainda aos diversos funcionários da Centrais Elétricas de Santa Catarina, pela inequívoca colaboração, sem a qual esse trabalho não seria possível

VIII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] JENSEN, Roger; GALE, Philip. At last, locate faults by recording travelling waves. In: ELECTRICAL WORLD, February 1996.
- [2] ANSELL, G B; PAHALAWATHA N C. Maximum likelihood estimation of fault location on transmission lines using traveling waves. In: IEEE Trans. On Power Delivery, Vol.9 No. 2, 1994 pp 680-689.
- [3] CARVALHO, Ricardo José de Oliveira; THOMAS, David W P; PEREIRA, Elisete Ternes. Fault Location in Distribution Systems Based on Traveling Waves. In: IEEE - POWER TECH 2003, 2003, Bolonha. Proceedings. 2003.
- [4] CARVALHO, Ricardo J O; PEREIRA, Elisete Ternes; BACHMANN, Juliano; EBLE, Aloizio C. Sistema de Localização de Falhas em Redes de Distribuição por Ondas Viajantes. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 2004, Brasília. Proceedings. 2004.
- [5] THOMAS, D W P; CARVALHO, Ricardo J O; PEREIRA, Elisete Ternes; CHRISTOPOULOS, C. Single and Double Ended Travelling-Wave Fault Location on a MV System. In: 8TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEVELOPMENTS IN POWER SYSTEM PROTECTION, 2004, Amsterdam. Developments in Power System Protection. Londres: IEE: Institution of Electrical Engineers, 2004. v.1, p. 200-203.
- [6] PEREIRA, Elisete Ternes; THOMAS, David W P; CARVALHO, Ricardo José de Oliveira; CABRAL, Sérgio Henrique Lopes; BACHMANN, Juliano. Localização de Falhas em Sistemas de Distribuição por Ondas Viajantes. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS 2006, 2006, Campina Grande - Paraíba. Anais do SBSE2006. 2006.
- [7] CABRAL, Sérgio Henrique Lopes; PEREIRA, Elisete Ternes; RIBEIRO, João Marcos; MEYER, Luis Henriquer; WERLICH, Rafael Eduardo. Utilização de Bobinas de Rogowski para Registro de Transitórios de Corrente em redes de Distribuição de Energia Elétrica. In: UNDÉCIMO ENCUESTRO REGIONAL IBEROAMERICANO DEL CIGRÉ - XI ERIAC, 2005, Hermandarias. XI eriac. 2005. v. A3.07.
- [8] CABRAL, Sérgio Henrique Lopes; PEREIRA, Elisete Ternes; MEYER, Luis Henriquer; WERLICH, Rafael Eduardo; RIBEIRO, João Marcos. Utilização da Bobina de Rogowski para Detecção de Transitórios Visando a Localização de Falhas em Redes de Distribuição de Energia Elétrica. In: VI SEMINÁRIO BRASILEIRO SOBRE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA - SBQEE, 2005, Belém - Pará. Anais do VI SBQEE. 2005. v. I, p. 193-198.
- [9] CABRAL, Sérgio Henrique Lopes; PEREIRA Elisete Ternes; BACHMANN, Juliano; SILVA, Régis E. Development of a voltage differentiator for fault location in power distribution systems. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS 2006, 2006, Capina Grande - Paraíba. Anais SBSE2006. 2006. v. 101.