



**SENDI 2004**  
**XVI SEMINÁRIO NACIONAL DE**  
**DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

**Sistema de Localização de Falhas em Redes de Distribuição por Ondas Viajantes**

Elisete T. Pereira	Ricardo J. O Carvalho	Juliano Bachmann	Aloizio C. Eble
elisete@furb.br	ricjose@furb.br	julianob@celesc.com.br	aloizioe@celesc.com.br
Universidade Regional de Blumenau		Centrais Elétricas de Santa Catarina	
FURB		CELESC	

**PALAVRAS-CHAVE**

**Localização de falhas; Ondas viajantes; Sistemas de distribuição**

**RESUMO**

**Esse trabalho apresenta resultados obtidos a partir de uma experiência piloto de um sistema de localização de falhas em redes de distribuição, que utiliza a teoria das ondas viajantes. O presente sistema de localização de falhas encontra-se instalado num trecho da rede de distribuição da concessionária de energia do estado de Santa Catarina (CELESC). O sistema compreende uma estação base, instalada na SE de Blumenau, monitorando três alimentadores de 23,8 kV derivados a partir do mesmo barramento, e uma estação remota, instalada na cidade de Pomerode, monitorando dois desses alimentadores resultando num esquema de localização de falhas em dupla terminação. O artigo apresenta ainda o registro de quatro distúrbios que foram localizados com sucesso, isto é com um erro menor que 500 metros, demonstrando a viabilidade da aplicação desta técnica em redes de distribuição.**

## 1. INTRODUÇÃO

A localização rápida e precisa dos defeitos numa rede de distribuição é um problema complexo tendo em vista que os alimentadores típicos dos sistemas de distribuição brasileiro são estruturas radiais, com dezenas e até centenas de quilômetros de comprimento, possuem diversas ramificações além de estarem constantemente submetidos a alterações topológicas.

A localização de faltas através da análise dos transitórios por ela gerados, e baseada na teoria das ondas viajantes, tem sido utilizada e apresenta bons resultados quando aplicada a sistemas de alta e extra-alta tensão, ou seja, em linhas de transmissão [1]. Embora esta técnica tenha sido considerada inviável para sistema de distribuição, um trabalho de pesquisa, recentemente desenvolvido pela FURB em parceria com a CELESC vem demonstrando que, apesar da complexidade da questão, a metodologia de localização de faltas por ondas viajantes, em redes de média tensão, ou seja, em sistemas de distribuição, pode ser empregada com sucesso [2 e 3].

Esse trabalho apresenta um sistema de localização de faltas em redes de distribuição, que utiliza a teoria das ondas viajantes, e demonstra sua viabilidade técnica quando aplicado aos níveis de tensão correspondentes. Essa demonstração é realizada através da análise de resultados reais obtidos com a operação desse projeto piloto de localização de faltas. O sistema de localização de faltas é constituído basicamente de duas unidades, uma principal e outra remota, instaladas nas terminações do alimentador de distribuição, de 23,8 kV. Um aplicativo computacional que inclui software de comunicação e o algoritmo de localização de falta, instalado numa estação base, adquire e processa os registros dos transitórios gerados pela falta. Assim, na ocorrência de uma falta os equipamentos efetuam o registro dos transitórios em ambas as terminações do alimentador da falta, comunicam-se com uma central, a qual localiza o ponto da falta com precisão de até 500 metros.

O trabalho vem sendo desenvolvido junto com a CELESC, Centrais Elétricas de Santa Catarina, no âmbito do programa anual de P&D da Aneel, desde o ano de 2001. Inicialmente foi desenvolvida uma metodologia de localização de faltas por ondas viajantes, voltada para a distribuição, utilizando-se ferramentas computacionais de simulação. Em seguida, para validar a metodologia, foi feita uma experiência piloto, utilizando-se tecnologia importada e originalmente desenvolvida para aplicações na transmissão. Os resultados demonstraram a viabilidade da técnica em aplicações na distribuição. Atualmente o grupo da pesquisa vem trabalhando no desenvolvimento de uma tecnologia inteiramente nacional, mais amigável e de maior precisão, voltada especificamente para sistemas de distribuição. Aqui, são apresentados e analisados resultados de dados reais, obtidos através desse sistema instalado.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO DA TEORIA

A localização de faltas pela teoria das ondas viajantes pode ser executada basicamente de dois métodos: pela monitoração dos transitórios que surgem pela ocorrência de uma falta, em uma única ou em ambas as extremidades do alimentador. A nomenclatura em inglês se refere a estes métodos como sendo do tipo single-end e double-end respectivamente. Esse trabalho trata do emprego do método de dupla terminação de localização de faltas o qual utiliza os registros, nas duas terminações, dos transitórios gerados na ocorrência de uma falta. O método em sua essência é simples pois sabe-se que, na ocorrência de uma falta, são gerados sinais transitórios de tensão e corrente que viajam para a direita e para a esquerda a partir do ponto da falta, atingindo as terminações da linha, conforme representado na Figura 1.

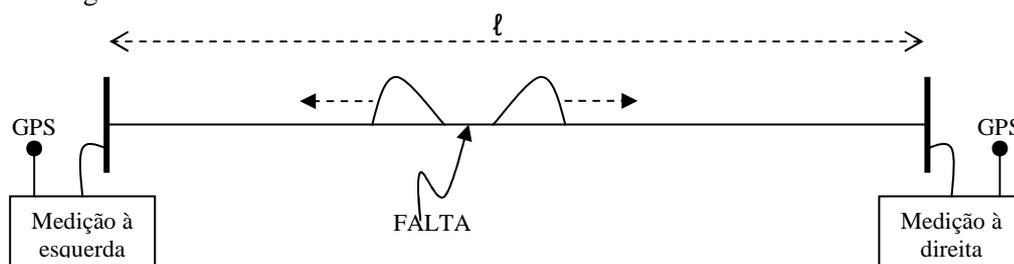


Figura 1: Representação das ondas viajantes

Se em cada equipamento de medição existir o registro desse transitório com precisão de tempo, que atualmente pode ser obtido via GPS, a falta poderá ser localizada. Sendo  $t_1$  e  $t_2$  os tempos em que as ondas transitórias, que viajam a partir do ponto de falta, atingirem as medições à esquerda e à direita respectivamente, e conhecendo-se a distância  $L$  do alimentador e a velocidade  $v$  de propagação das ondas, a localização pode ser obtida pelo cálculo da distância de cada ponto de medição, pelas equações:

$$\text{distância à esquerda} = \frac{(t_1 - t_2) \times v}{2} + \frac{L}{2} \quad (1)$$

$$\text{distância à direita} = \frac{(t_2 - t_1) \times v}{2} + \frac{L}{2} \quad (2)$$

Apesar da simplicidade da teoria, a aplicação da mesma somente foi possível com o desenvolvimento de novas tecnologias que utilizam altas taxas de amostragem, elevada velocidade de processamento e precisão de tempo, visto que este fenômeno transitório se desenvolve com velocidades próximas da velocidade da luz [4]. Isso vem sendo realizado com os avanços tecnológicos em micro controladores, DSPs (processador digital de sinal) e GPS (sistema de posicionamento global). Mesmo assim, essa metodologia vinha sendo empregada somente na localização de faltas em linhas de transmissão. Isso porque acreditava-se que a complexidade inserida pela existência das várias discontinuidades na impedância de uma linha de distribuição, devidas especialmente aos diversos ramos característicos desse sistema, seria aumentada em demasia impossibilitando a localização da falta.

Os ramos, derivados dos alimentadores, introduzem discontinuidades que interferem na propagação das ondas viajantes. Para entender o que acontece quando uma onda viajante encontra uma bifurcação com uma segunda linha de impedância característica diferente podemos recorrer a figura 2, onde apenas a onda de tensão está sendo representada.

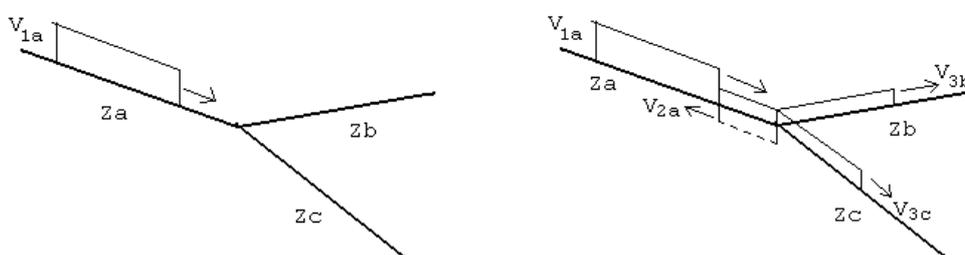


Figura 2: Onda viajante frente a uma bifurcação

Conforme pode ser observado a onda incidente dá origem a uma onda refletida, que viaja de volta ao ponto de origem, e duas ondas refratadas. Essas reflexões adicionais interferem no sinal de alta frequência gerado pela falta dificultando sua interpretação.

No sistema real, as bifurcações são estabelecidas nos locais de derivação dos ramos, conforme exemplificado no diagrama unifilar da figura 3.

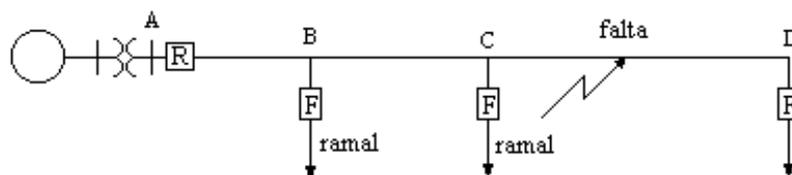


Figura 3: Exemplo de um alimentador com derivações

Conforme pode ser constatado entre o ponto de falta e o ponto de registro dos transientes (A) existem duas descontinuidades (pontos B e C). Para avaliar os efeitos dessas descontinuidades, introduzidas pelos ramos, foram realizadas duas simulações:

A primeira simulação não considera a existência dos dois ramais entre o ponto de defeito e o ponto de registro dos dados (ponto A). Na segunda simulação os dois ramais existentes entre o ponto de defeito e a medição foram modelados e inseridos nos estudos.

A Figura 4 apresenta resultado de simulações para dois casos. No quadro superior da figura observa-se o registro de sinal de alta frequência, de uma onda da corrente incidente e refletida a partir de um ponto de falta numa linha sem ramais. O quadro inferior mostra o mesmo registro considerando a presença de dois ramais. Observa-se claramente os efeitos das discontinuidades introduzidas, que produzem reflexões adicionais que se adicionam às ondas refletidas a partir do ponto de falta.

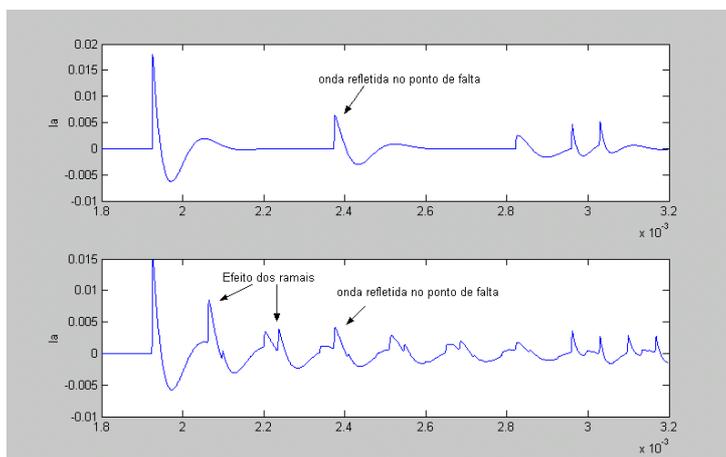


Figura 4: Simulação dos efeitos dos sub-ramais

Estes resultados foram obtidos através de simulações desenvolvidas no ambiente computacional Simulink, do MatLab, utilizando-se os recursos do toolbox Power System Blockset [5].

### 3. EXPERIÊNCIA PILOTO

Uma experiência piloto com um esquema de localização de faltas por ondas viajantes vem sendo realizada na empresa distribuidora de energia do estado de Santa Catarina (CELESC). Este projeto piloto foi financiado pelo programa de P&D da concessionária no ciclo 2000 – 2002. O projeto piloto contemplou a instalação de duas unidades de localização de faltas: uma unidade principal e uma unidade remota. Optou-se por instalar as unidades num trecho do sistema elétrico da CELESC, sob a responsabilidade da regional de Blumenau-SC, sendo que a primeira unidade foi instalada na subestação Blumenau-II e monitora três alimentadores de 23.8kV, os quais derivam de um mesmo barramento, denominados BND5, BND6 e BND7. A segunda unidade está instalada num ponto da rede de distribuição, na cidade de Pomerode-SC, monitorando dois desses alimentadores: BND6 e BND7. Portanto, dois alimentadores de média tensão (BND6 e BND7) estão sendo avaliados num esquema de dupla terminação e um terceiro alimentador (BND5) está sendo avaliado num esquema de terminação simples. O esquemático mostrado na figura 5 ilustra o trecho do sistema elétrico com a indicação dos locais de instalação das estações de registro dos sinais gerados pela falta.

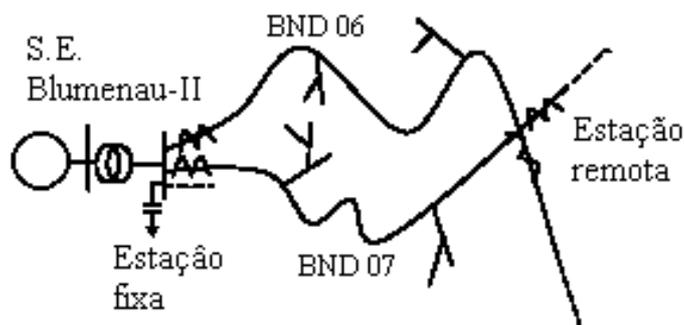


Figura 5: Esquemático do sistema CELESC

Este sistema de localização de faltas vem apresentando resultados confiáveis desde o início de 2003 sendo que nos últimos quatro meses tivemos o registro de três faltas que foram localizadas com sucesso. Estes três casos serão discutidos a seguir juntamente com um quarto caso que correspondente ao registro da manobra de um banco de capacitores na SE Blumenau II.

### 3.1 Distúrbio 1 - Colisão na BT

Este caso retrata uma falta ocorrida em 26//06/2004, provocada pelo abalroamento de um caminhão diretamente com cabos de baixa tensão. O curto propagou-se para o lado de alta, possivelmente em decorrência do chicoteamento dos cabos de BT. O local foi identificado precisamente. Os detalhes da ocorrência estão descritos nos arquivos de CELESC.

A figura 6 mostra o resultado da correlação dos registros dos dados obtidos simultaneamente nas estações fixa e remota localizadas na SE de Blumenau e na cidade de Pomerode respectivamente.

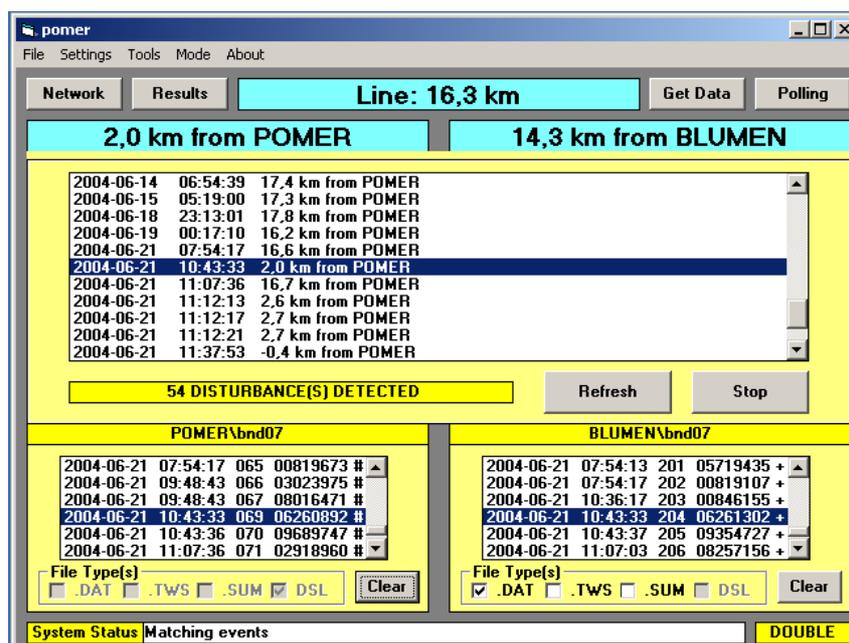


Figura 6: Registro do primeiro distúrbio

Observa-se que a correlação dos registros indica que a falta ocorreu a 14,3 km da SE de Blumenau-II e, conseqüentemente a 2,0 km de Pomerode. A correlação via software nem sempre apresenta boa precisão sendo necessário, em alguns casos, um ajuste manual na referência de “trigger” baseado na representação gráfica dos registros. Neste caso específico o ajuste manual mostra que a falta ocorreu a 13.8 km de Blumenau conforme ilustrado na figura 7.

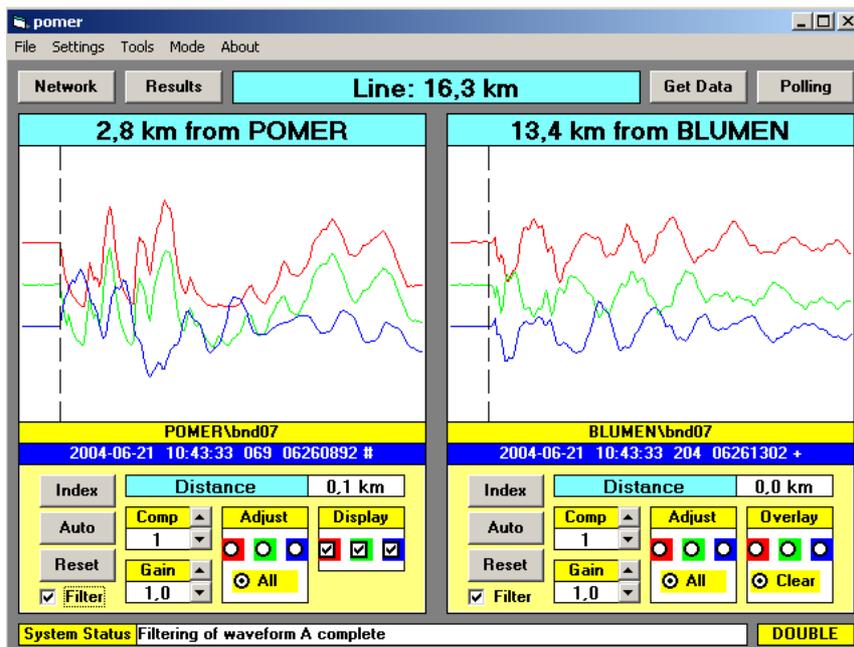


Figura 7: Representação gráfica do distúrbio

De fato a falta ocorreu a 12.96 km da subestação de Blumenau resultando assim num erro de 440 metros.

### 3.2. Distúrbio 2: Meio Ambiente Animal.

Esta falta, do tipo monofásica, ocorreu em 15/07/2004. O relatório de ocorrência consta causa a ser identificada tendo em vista que num primeiro momento não foi constatada nenhuma causa eminente. O sistema de localização de faltas registrou, naquele instante, uma falta ocorrida a 7.8 km da SE de Blumenau. Numa visita ao provável local da indicação da falta encontrou-se um pássaro, conhecido como João de Barro, caído morto ao chão próximo a um poste (estrutura) que continha uma casa de João de Barro. A localização precisa de referida estrutura é de 7,91 km de Blumenau, sendo que a distancia identificada pelo localizador foi de 7,8 km, conforme ilustra o registro dos dados correlacionados na figura 8.

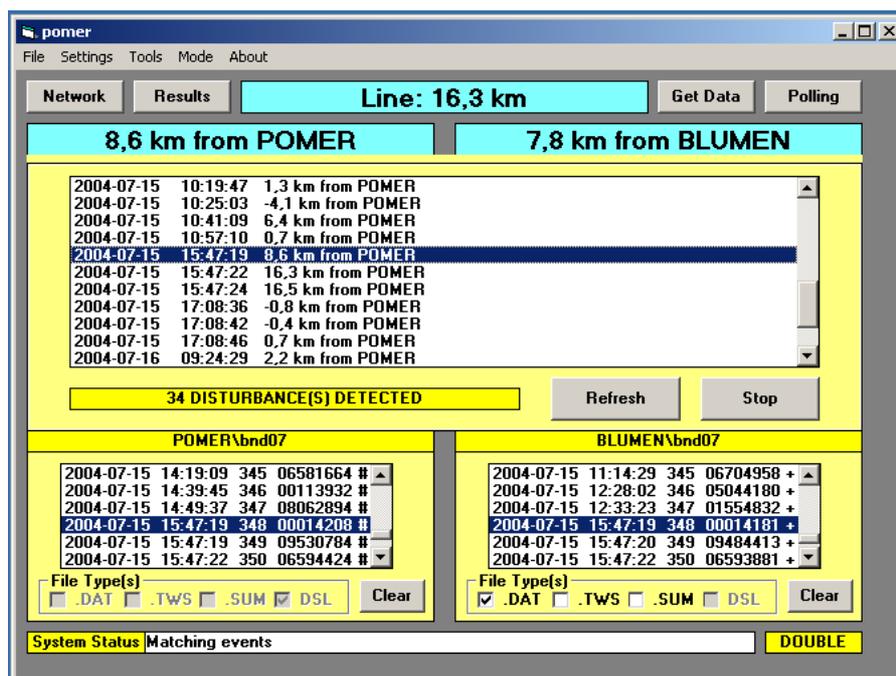


Figura 8: Registro do segundo distúrbio

Conforme pode ser observado a falta foi localizada com uma precisão de 110 metros.

### 3.3. Distúrbio 3: Colisão num Sub-Ramal.

Esta terceira falta ocorreu num sub-ramal derivado do alimentador BND7. A falta resultou de um abalroamento da carga de um caminhão com a rede de BT que se propagou para o lado de alta. Os equipamentos de localização de faltas registraram um distúrbio ocorrido num ponto distante 6,9 km de Blumenau, ponto este correspondente ao ponto de derivação do sub-ramal. Como era de se esperar, a falta foi localizada no ponto aonde ocorre a bifurcação do alimentador com o sub ramal. A localização exata desta bifurcação corresponde a uma distancia de 7,20 km de Blumenau enquanto que o localizador de faltas indicou 6,9 km de Blumenau. Portanto, neste caso foi registrado um erro de 300 metros.

### 3.4. Distúrbio 4: Chaveamento de Banco de Capacitores

Este caso retrata o registro do chaveamento de um banco de capacitores instalado no barramento da subestação Blumenau II. Este registro é interessante pois temos certeza do local, isto é, distancia zero de Blumenau. O registro gráfico do evento, obtido simultaneamente nas estações fixa e remota é ilustrado na figura 9.

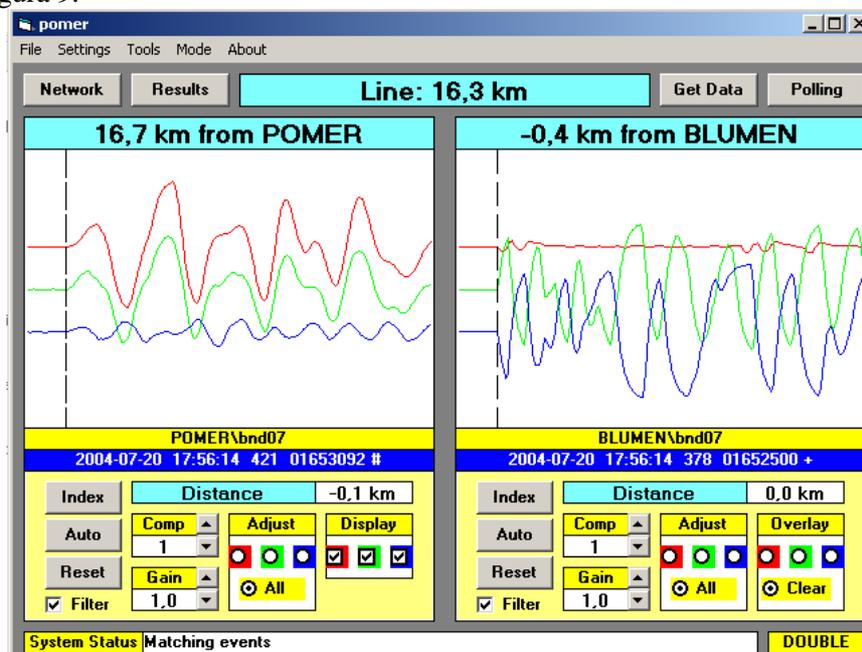


Figura 9: Representação gráfica o chaveamento de capacitores

Conforme pode ser observado a estação fixa mostra uma falta ocorrida a 400 metros (antes do ponto de registro), conduzindo a um erro de igual magnitude.

## 4. ANALISE DOS RESULTADOS

Os distúrbios descritos anteriormente ocorreram no alimentador denominado BND7. Este alimentador atende a cerca de 4.000 consumidores industriais e residenciais nas cidades de Blumenau e Pomerode, no estado de Santa Catarina. Com potência instalada proxima de 25 MVA, o BND7 atende um importante parque industrial totalizando 17.4 MVA de potência instalada. Além dessa região densamente ocupada, o BND7 se estende por uma vasta área rural chegando a totalizar aproximadamente 30 Km de comprimento. Entretanto, após um estudo que levou em conta as ocorrências mais freqüentes, decidiu-se pela instalação da unidade remota num ponto distante 16,3 km da subestação. Portanto, com a instalação das unidades de localização de faltas, este trecho do alimentador BND7 está sendo monitorado num esquema de dupla terminação. O diagrama unifilar da

figura 10 representa o trecho do BND7 com a indicação da localização das unidades principal (TWS) e remota (DSFL) bem como da localização dos distúrbios descritos anteriormente. A tabela 1 apresenta o resumo dos distúrbios analisados.

Tabela 1: Localização de chaveamentos de carga

Distúrbio	Indicação do equipamento (Km)	Distancia real (Km)	Erro absoluto (Km)
Falta 1	13,4	13,8	0,4
Falta 2	7,8	7,9	0,1
Falta 3	6,9	7,2	0,3
Manobra 1	-0,4	0,0	0,4

Os resultados da tabela 1 demonstram a viabilidade da localização de faltas com um esquema de dupla terminação. Resultados de eventos do tipo chaveamento sob carga, com esta experiência piloto, está reportado na referencia [3].

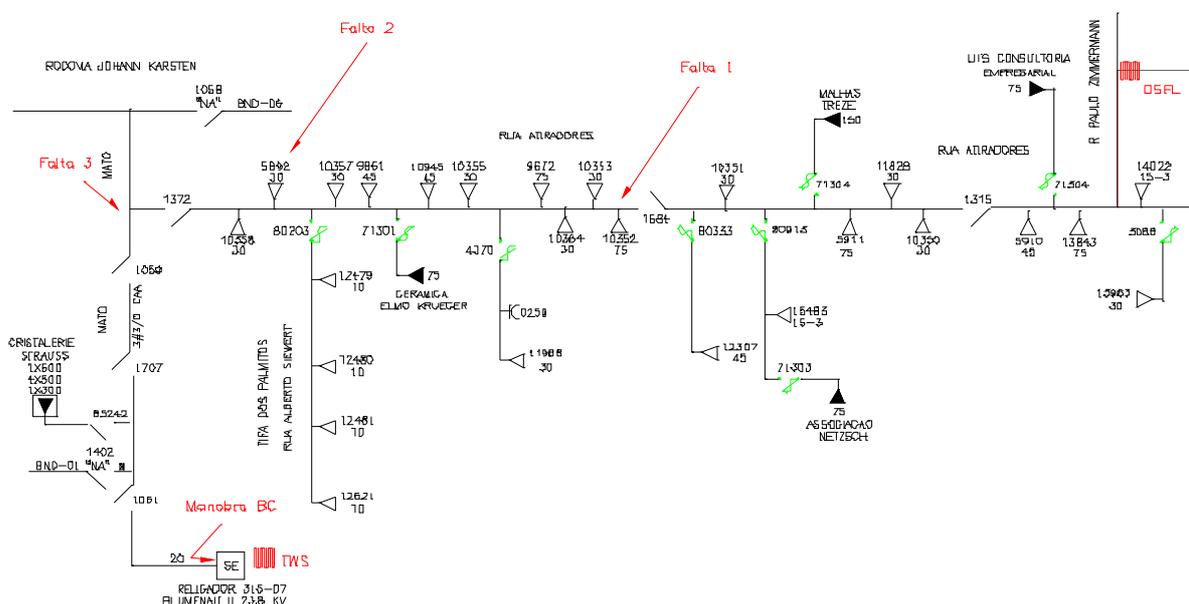


Figura 10: Diagrama Unifilar do alimentador BND7

## 5. CONCLUSÕES

O trabalho mostra resultados reais obtidos com uma experiência piloto de um sistema de localização de faltas por ondas viajantes. A análise de quatro distúrbios, sendo três faltas e um chaveamento de um banco de capacitores mostra a eficiência e precisão do sistema, considerando-se que todos os eventos foram localizados com um erro inferior a 500 metros.

A experiência bem sucedida utiliza um esquema do tipo dupla terminação para monitorar dois alimentadores de 23,8kV.

Resultados preliminares demonstram que o modo de operação tipo terminação simples também é viável para sistemas de distribuição. Pesquisas adicionais estão sendo desenvolvidas buscando melhores resultados para adequação desta técnica a sistemas de distribuição usando os registros dos dados obtidos a partir de um único terminal do alimentador.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Roger Jensen and Philip Gale, *At last, locate faults by recording traveling waves*, ELECTRICAL WORLD, February 1996.

- [2] THOMAS, David W P; CARVALHO, Ricardo J.de O.; PEREIRA, Elisete T. “*Fault Location in Distribution Systems Based on Traveling Waves*”. In: IEEE Power Tech, 2003, Bologna, 2003.
- [3] THOMAS, David W P; Christopolus C., CARVALHO, Ricardo J.de O.; PEREIRA, Elisete T. “*Single and Double Ended Travelling- Wave Fault Location on a MV System*”. In: Eighth International Conference on Developments in Power System Protection, Amsterdam, 2004.
- [3] David W. P. Thomas, Richard E. Batty, Christos Christopoulos and Anding Wang, “*A novel transmission line voltage measuring method*”, IEEE, Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol. 47, no. 5, October 1998.
- [4] Matlab – *Power System Blockset User’s Guide – For use with Simulink*, TEQSIM International, Hydro-Québec, Math Works, 1998.