

# *Desenvolvimento de um sistema de localização de falhas das capas plásticas e vazamentos de óleo em cabos subterrâneos.*

*Tarcísio M. de Lima, José Aquiles Baesso Grimoni, Sylvio Bistafa e Jorge Luís Porsani.*

**Resumo** – Este artigo apresenta duas metodologias (GPR e hidráulico) de avaliação de localização de vazamentos de cabos subterrâneos a OF (Óleo Fluido) e apresenta as análises dos dados gerados pelo método GPR e dos dados gerados pelo algoritmo hidráulico implementado no Sistema de Monitoramento Inteligente de Cabos Subterrâneos Versão 2.4 (ADTS 2008). O Sistema de Monitoramento está instalado no servidor da CTEEP- LIMÃO e foi utilizado para monitorar e determinar a pré-localização de vazamentos de Óleo LAB (Fluxo Vazante) na linha de transmissão XAV-BAN-2, a qual está composta por três Cabos OF (Fases Azul, Branca e Vermelha). Especificamente a análise dos dados é feita no trecho entre a Subestação Bandeirantes (SE-BAN) e a Subestação Caixa 8 (CX8), sendo o comprimento deste trecho de 4250.

**Palavras-chave** – localização, falhas, vazamentos, cabos, subterrâneos.

## I. INTRODUÇÃO

Este artigo apresenta a aplicação e o desenvolvimento de duas tecnologias aplicadas no problema de localização de possíveis vazamentos de óleo em cabos subterrâneos de alta tensão de linhas da empresa CTEEP na cidade de São Paulo. Resultados de aplicação destas metodologias também são relatados.

O artigo é produto do desenvolvido do projeto de P&D da ANEEL sob número 0068-09/2006 (A7) no CICLO II cujo título é “Desenvolvimento de um sistema de localização de falhas das capas plásticas e vazamentos de óleo em cabos subterrâneos.”.

## II. AVALIAÇÃO DO MÉTODO GEOFÍSICO GPR PARA MAPEAR INTERFERÊNCIAS NO SUBSOLO

A localização de interferências no subsolo é um dos problemas usuais encontrados no ambiente urbano. O crescente desenvolvimento tecnológico nos grandes centros tem pro-

vocado uma intensa ocupação do espaço físico em subsuperfície, principalmente para atender obras subterrâneas para a passagem de cabos elétricos e telefônicos, tubulações de gás, galerias de canalização de águas pluviais, redes de esgotos, túneis do metrô, etc.

Devido a esse crescimento, vários problemas são gerados, dentre eles, destacam-se: os rompimentos de cabos elétricos e telefônicos pré-existentes, oleodutos, gasodutos, tubulações de água, esgotos, dentre outros, provocando transtornos no trânsito e colocando a vida da população em risco.

Dentre os diferentes tipos de interferências presentes no ambiente urbano, neste trabalho o enfoque será dado aos cabos elétricos de média e alta tensão que estão diretamente enterrados no subsolo. Segundo Baldan (2007)[1] existem na cidade de São Paulo mais de 10 km de cabos elétricos, pertencentes à rede da AES-Eletropaulo, sendo cerca de 1,042 km de rede primária (média tensão) e 1,746 km de rede secundária (baixa tensão), ambos trifásicos.

Segundo Grimoni et al. (2004)[3], a CTEEP (Companhia de transmissão de Energia Elétrica Paulista) tem cabos de alta tensão (230KV e 345KV) instalados ao longo das marginais Pinheiros e Tietê. A linha da marginal Tietê, cujo circuito vai da SE-subestação elétrica Anhanguera até a SE Centro na cidade de São Paulo, tem um total de cabos de 58,5 km com 33 lances, com distância média entre lances de 295 m. Esta linha utiliza o sistema de *cross-bonding*. O cabo tem 1200 mm<sup>2</sup> de seção, a tensão de operação do cabo é de 230 kV e a potência nominal de cada circuito é de 400 MVA, totalizando 800 MVA. Estes cabos têm em média cerca de 10,16cm (4”) de diâmetro e normalmente estão instalados a 0,5; 1,0 e 1,5 metros de profundidade. Esses são cabos especiais que abastecem de energia elétrica bairros inteiros e seus núcleos internos são constituídos pela presença de um óleo especial composto por uma mistura de derivados de hidrocarbonetos e óleos minerais, sendo altamente contaminante para o meio ambiente.

Para evitar o *blackout* de energia elétrica em bairros inteiros da grande São Paulo, torna-se necessário uma rotina de prevenção e de manutenção desses cabos elétricos. A manutenção desses cabos é uma tarefa difícil que exige bastante atenção por parte dos técnicos e das empresas prestadoras de serviços na área de transmissão de energia elétrica. Neste sentido, podem ocorrer vazamentos de óleo provenientes de cabos elétricos de alta tensão instalados no subsolo. Normalmente o vazamento ocorre na junção de dois cabos elé-

---

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL.

Tarcísio M. de Lima trabalha na CTEEP (e-mail: tlima@ctEEP.com.br).

José Aquiles Baesso Grimoni, Sylvio Bistafa e Jorge Luís Porsani trabalham no IEEUSP, EPUSP e IAGUSP respectivamente (e-mails: aquiles@iee.usp.br, sbistafa@usp.br, prosani@iag.usp.br).

tricos, devido às falhas construtivas do próprio cabo, devido à presença de insetos, i.e., cupins e formigas e fungos que comem as capas plásticas isolantes que protegem os cabos elétricos, além de acidentes durante a instalação de obras geotécnicas, sendo este último o mais freqüente.

Neste trabalho, o método GPR-Ground Penetrating radar foi empregado no Sítio Controlado de Geofísica Rasa do IAG/USP (Porsani et al., 2006)[5] e na Usina Elevatório da Traição, localizada às margens do rio Pinheiros, em São Paulo, visando mapear cabos elétricos de baixa, média e de alta tensão. Para dar suporte às interpretações dos resultados, também são apresentados resultados de simulações numéricas 2D para o caso da Usina Elevatório da Traição.

#### A. Método GPR

O GPR-Ground Penetrating Radar ou radar de penetração no solo é um método geofísico, não destrutivo, não invasivo, de alta resolução, que utiliza ondas eletromagnéticas de altas freqüências (normalmente entre 10 MHz e 2,5 GHz) para localizar estruturas e feições geológicas rasas da subsuperfície ou localizar objetos enterrados pelo homem (Porsani, 1999)[4]. A propagação do sinal EM depende da freqüência do sinal transmitido e das propriedades elétricas dos materiais (condutividade elétrica, permissividade dielétrica e permeabilidade magnética). As mudanças nas propriedades elétricas em subsuperfície fazem com que parte do sinal seja refletido. A energia refletida é registrada em função do tempo de percurso (i.e., tempo duplo), que é amplificada, digitalizada e gravada no disco rígido de um computador, deixando os dados prontos para o processamento posterior, tendo inúmeras aplicações em geologia, geotécnica, meio ambiente, planejamento urbano, arqueologia etc (Daniels, 1996[2]; Porsani, 1999[4]).

#### B. Modelagens numéricas

Para simular a propagação e a reflexão de ondas eletromagnéticas usadas no método GPR foi empregado o método numérico das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo-FDTD (Yee, 1966)[6]. Este método consiste na implementação de códigos matemáticos através de aproximações numéricas sucessivas, substituindo as equações diferenciais por diferenças finitas obtidas por meio de expansão de Taylor. Assim, as equações de Maxwell envolvidas no método GPR são resolvidas por meio de equações algébricas.

#### C. Discussão dos resultados

A Figura 1 mostra o perfil GPR obtido com as antenas blindadas de 200 MHz, e espaçamento entre traços de 2 cm, sobre quatro cabos elétricos de média e baixa tensão instalados na Linha 7 do Sítio Controlado de Geofísica Rasa-SCGR do IAG/USP. Note que os cabos elétricos foram nitidamente detectados, sendo caracterizados por hipéboles de difração de alta amplitude de reflexão devido à presença de material metálico.

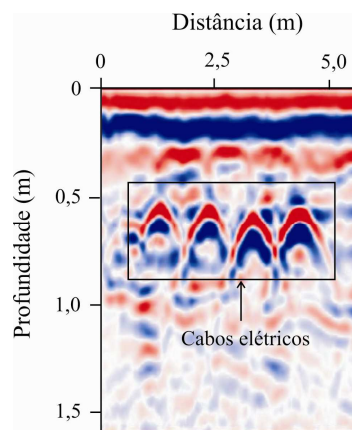


Figura 1. Perfil GPR de 200 MHz sobre cabos elétricos instalados na Linha 7 do Sítio Controlado de Geofísica Rasa do IAG/USP.

A Figura 2 mostra o perfil GPR de 200 MHz realizado na Usina Elevatório da Traição. Note neste perfil que até a posição de 65 m o subsolo representa o background, ou seja, sem a presença de alvos no subsolo. A partir daí inicia-se um forte refletor sub-horizontal relacionado com a tampa de concreto armado com ferro em sua estrutura comprovado por furos de sondagem. Esta interpretação está de acordo com as informações dos engenheiros da CTEEP sobre os modos construtivos de instalação dos cabos elétricos de alta tensão no subsolo, onde sobre os cabos existe uma tampa de concreto com ferro que tem a finalidade de prevenir acidentes. A Figura 3 mostra novamente o topo da tampa de concreto que protege os cabos elétricos de alta tensão no subsolo.

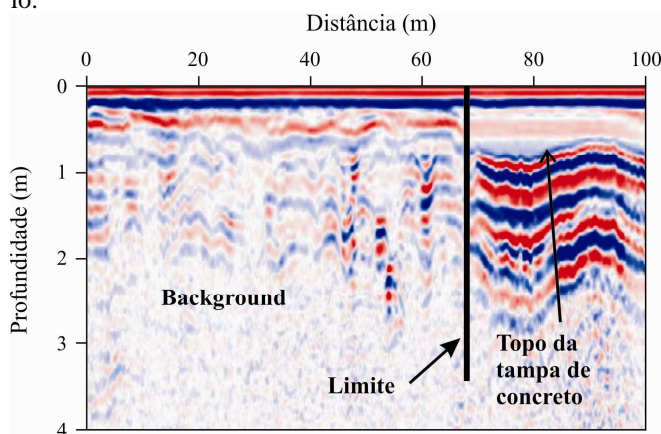


Figura 2. Perfil GPR de 200 MHz realizado na Usina Elevatório da Traição, mostrando o limite entre o background e o início da tampa de concreto.

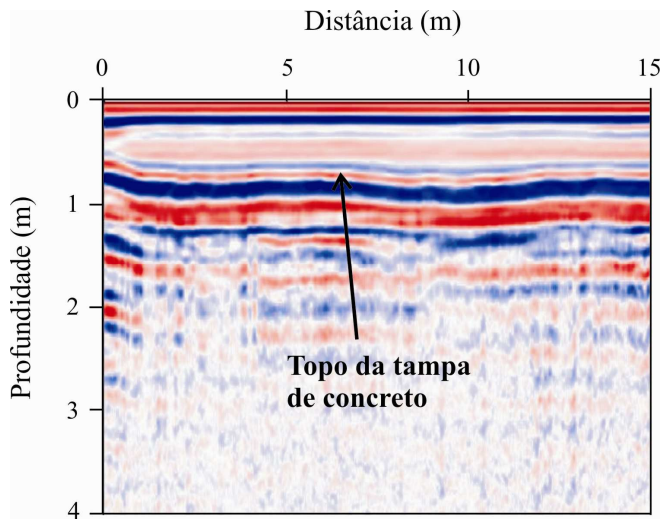


Figura 3. Perfil GPR de 200 MHz realizado na Usina Elevatório da Traição, mostrando o topo da tampa de concreto.

Para averiguar se o forte horizonte refletor observado nas Figuras 2 e 3 estava relacionado com a presença da tampa de concreto armado com ferro sobre os cabos elétricos, um estudo de modelagem numérica foi realizado. A Figura 4 mostra o modelo sintético caracterizado por dois cabos elétricos pilotos, seguidos por nove cabos elétricos de alta tensão sobre uma camada de areia seca, todos sob uma placa de 10 cm de espessura constituída de concreto armado com ferro. Neste modelo o *background* foi caracterizado por uma camada uniforme de solo argiloso típico da bacia sedimentar de São Paulo. A Figura 5 mostra os resultados da simulação numérica. Note que somente a tampa da placa de concreto pode ser detectada pelo GPR, ou seja, os cabos elétricos não puderam ser detectados devido à tampa de concreto servir como uma superfície refletora, impedindo a penetração do sinal eletromagnético do GPR a maiores profundidades. As simulações numéricas comprovaram os resultados obtidos pelos perfis GPR mostrados nas Figuras 2 e 3.

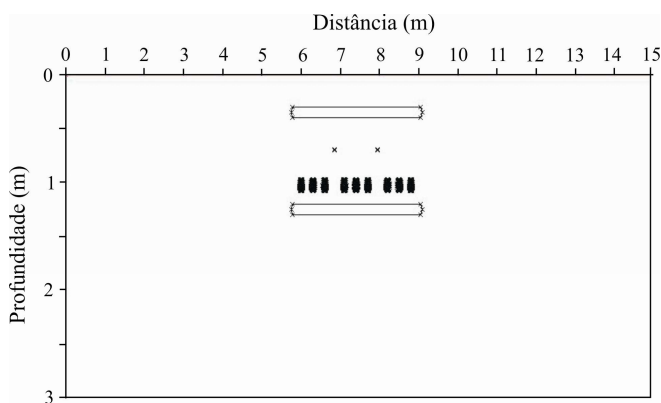


Figura 4. Modelo sintético caracterizado por dois cabos pilotos, seguidos por nove cabos elétricos de alta tensão sobre uma camada de areia seca, sob uma placa de 10 cm de espessura constituída de concreto armado com ferro.

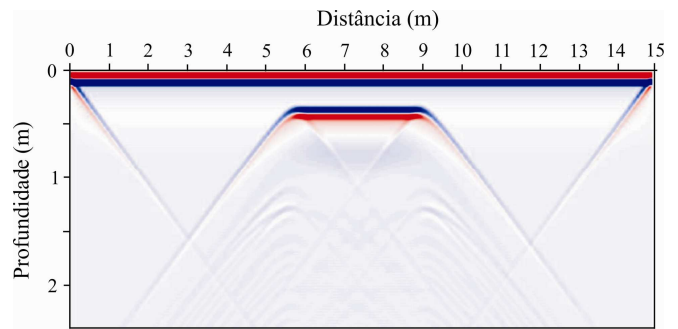


Figura 5. Resultado da simulação numérica GPR de 200 MHz da Figura 4.

Na Figura 6 observa-se novamente o topo da tampa de concreto e um nítido alvo hiperbólico na posição de 20 m, estando relacionado com uma galeria de canalização de águas pluviais, conforme observações locais. Note a reverberação do sinal GPR sob a galeria, sendo esta uma característica deste tipo de alvo, uma vez que a onda eletromagnética fica reverberando na camada de ar dentro da galeria.

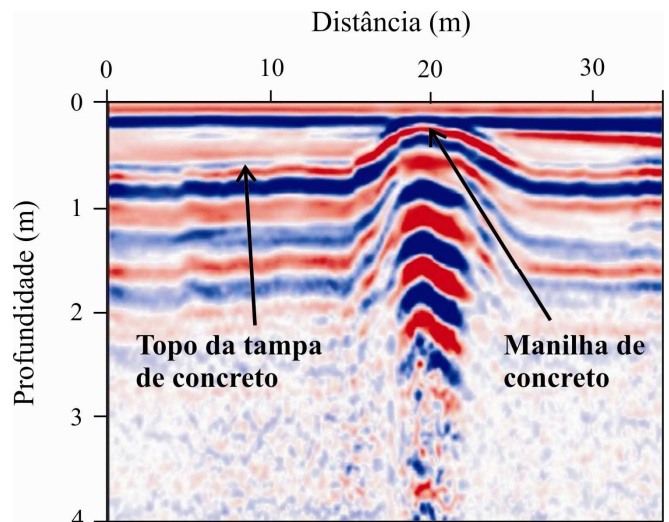


Figura 6. Perfil GPR de 200 MHz na Usina Elevatório da Traição, mostrando o topo da tampa de concreto de uma galeria de canalização de águas pluviais.

### III. DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO HIDRÁULICO PARA LOCALIZAR VAZAMENTOS DE ÓLEO ISOLANTE EM CABOS ELÉTRICOS SUBTERRÂNEOS

Cabos elétricos subterrâneos preenchidos com óleo isolante estão sujeitos a vazamentos, principalmente nas emendas do cabo. Sob condições normais de operação, o primeiro sinal de vazamento será detectado pela necessidade de reposição de óleo nos tanques de alimentação. Ocorre que até que o vazamento seja localizado, a quantidade de óleo perdida poderá ser significativa. A perda de óleo destes cabos é considerada como uma fonte de poluição ambiental.

Consideram-se ‘pequenos’ vazamentos aqueles abaixo de 30-40 litros/mês; ‘sustentáveis’ vazamentos até 100 litros/mês; ‘insustentáveis’ vazamentos acima de 100 litros/mês, quando a pressurização normal não é capaz de manter a isolação e o cabo precisa ser removido de serviço [7].

Desta forma, a pronta detecção e localização de vazamentos são atividades consideradas prioritárias das empresas que fazem uso destes sistemas. Métodos confiáveis para detecção e localização destes vazamentos ainda são alvo de pesquisa e desenvolvimento. Existem dois métodos tradicionalmente utilizados para localização de vazamentos em cabos enterrados: i) método de congelamento; ii) método hidráulico. Esses dois métodos foram utilizados num acidente ocorrido no campo durante o desenvolvimento dos trabalhos. Contudo, o foco principal da pesquisa foi o desenvolvimento do método hidráulico para localizar vazamentos de óleo em cabos elétricos subterrâneos, que operasse autonomamente em tempo real.

O método hidráulico utiliza algoritmos de estimativa do ponto de vazamento, que apresentam variantes em função das características do sistema de cabos. Porém, essencialmente, todos eles se baseiam nas vazões que alimentam o vazamento e que são medidas em ambas as extremidades do cabo. Dependendo da potência elétrica que circula nos cabos, o fluxo térmico varia ao longo de um dia típico de operação, sendo que durante certos períodos, as vazões medidas nas extremidades do cabo, são apenas vazões aparentes, uma vez que estas incluem o fluxo térmico que ocorre devido à contração e expansão do cabo causada pelo efeito Joule. A necessidade de levar-se em consideração, ou não, o fluxo térmico no algoritmo de detecção do ponto de vazamento foi investigada no presente trabalho.

#### A. Primeiro Algoritmo Proposto Para Estimativa do Ponto de Vazamento

O primeiro algoritmo proposto para estimativa do ponto de vazamento, que não leva em consideração o fluxo térmico, mas considera diferença de pressões e de cotas entre os tanques de alimentação em ambas as extremidades da linha escreve-se:

$$d_a = \frac{1}{(Q_a + Q_b)} \left\{ Q_b L + \frac{1}{R} \left[ \frac{(P_a - P_b)}{\gamma} + (z_a - z_b) \right] \right\}, \quad (1)$$

onde:

$d_a$  = distância da Estação  $a$  até o ponto de vazamento,

$L$  = comprimento do cabo entre as Estações  $a$  e  $b$ ,

$Q_a$ ,  $Q_b$  = vazões medidas nas Estações  $a$  e  $b$ ,

$P_a$ ,  $P_b$  = pressões medidas nas Estações  $a$  e  $b$ ,

$z_a$ ,  $z_b$  = cotas das Estações  $a$  e  $b$ ,

$R$  = resistência hidráulica do cabo entre as Estações  $a$  e  $b$ ,

$\gamma$  = peso específico do óleo de resfriamento do cabo.

O algoritmo (1) prevê correções para diferenças de pressões entre os tanques das Estações  $a$  e  $b$ , bem como correções de diferenças de cota entre estas estações.

A diferença de cotas é obtida utilizando um cabo sadio, num período de mínima atividade térmica do cabo (vazão térmica próxima de zero), e medindo-se as pressões na entrada (ou saída) dos medidores de vazão nos tanques em ambas as estações e utilizando a seguinte expressão:

$$\Delta z = z_a - z_b = \frac{P_a - P_b}{\gamma_{\text{óleo}}}.$$

A resistência hidráulica do cabo de comprimento  $L$  é estimada criando-se um vazamento artificial  $Q$  na Estação  $b$  e empregando a seguinte expressão:

$$R = \frac{1}{LQ} \left[ \frac{(P_a - P_b)}{\gamma} + (z_a - z_b) \right].$$

Teoricamente, a resistência hidráulica do cabo de comprimento  $L$  e de diâmetro hidráulico  $D_h$ , onde escoo óleo de viscosidade cinemática  $\nu$  é dada por:

$$R = \frac{128\nu}{\pi g D_h^4}.$$

Para o óleo com viscosidade cinemática de  $5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  e diâmetro hidráulico da linha de  $18 \text{ mm}$ , a resistência hidráulica estimada utilizando essa expressão é de aproximadamente  $200 \text{ s/m}^3$ .

#### B. Bancada de Testes – Validação do Algoritmo

Para um melhor entendimento do comportamento do escoamento de óleo nos cabos, montou-se uma bancada de testes para simulação da linha com e sem vazamentos. A linha, de aproximadamente 97 m de comprimento, foi construída com dois tubos de cobre de 3/4" de diâmetro, simulando o escoamento nos dutos de cobre internos a dois cabos no campo. Os dois tubos foram interligados e alimentados com óleo isolante através de um único tanque utilizado no campo, tornando as simulações mais realistas. Diferentes sangrias foram criadas ao longo da linha, simulando vazamentos com vazões variáveis, através da abertura de uma válvula agulha no ponto de sangramento, a distâncias conhecidas do tanque. Os testes eram realizados nas primeiras horas do dia, a fim de evitar fluxos térmicos induzidos pela insolação.

Como foi utilizado um único tanque para alimentar ambas as extremidades da linha na bancada, eliminou-se a dificuldade de se conhecer a diferença de cotas entre os tanques, o que seria necessário no caso de utilização de um tanque em cada extremidade da linha. Conseqüentemente, isso eliminou também a necessidade de monitorar a pressão de trabalho dos tanques. Esse procedimento reduz as incertezas na detecção do ponto de vazamento, pois elimina dois termos do algoritmo de detecção. Outra vantagem, é que esse procedimento é totalmente adequado para ser implementado no campo.

Nos testes de bancada, verificou-se que na pressão de operação do tanque de alimentação, a resistência hidráulica da linha foi de aproximadamente  $50 \text{ s/m}^3$ . Este valor seria utilizado para a resistência hidráulica da linha no campo, caso necessário, enquanto não se dispusesse de resultados específicos para a linha real.

O algoritmo completo foi testado na bancada, onde se ve-



rificou a não necessidade de inclusão da resistência hidráulica do ponto de vazamento criado artificialmente na bancada de testes. Essa constatação foi muito oportuna, pois eliminou a necessidade de se conhecer a resistência hidráulica no ponto de vazamento no campo. Entretanto, o algoritmo inclui as resistências hidráulicas dos cavaletes onde são instalados os fluxímetros.

O algoritmo proposto se aplica à linha duplicada (um mesmo tanque alimentando uma fase boa e a fase com defeito) e escreve-se:

$$d_a = [1 / (Q_a + Q_b)] [2LQ_b + (1/R)(Q_b R l_b - Q_a R l_a)], \quad (II)$$

onde:

$d_a$  = distância do fluxímetro (a) ao ponto de vazamento (m);

$Q_a$  = vazão no fluxímetro a (l/h);

$Q_b$  = vazão no fluxímetro b (l/h);

$L$  = comprimento de 1 fase da linha (m);

$R$  = resistência total do circuito hidráulico (s/m<sup>3</sup>);

$R l_a$  = perda de carga no fluxímetro a (s/m<sup>2</sup>);

$R l_b$  = perda de carga no fluxímetro b (s/m<sup>2</sup>).

O algoritmo (II) foi testado com os fluxímetros digitais instalados na bancada, monitorando remotamente os sinais de vazão e de pressão, o que permitiu calcular a distância do ponto de vazamento em tempo real.

Alguns dos resultados obtidos com este algoritmo estão abaixo reproduzidos, onde se verifica que os resultados nos testes de bancada foram bastante encorajadores.

Distância:	43,7	84,8	104,8	48,5	149,6	170,0	62,4
Erro %:	-3,2	-2,6	0,92	0,8	-12,5	-2,0	9,5

Tendo em vista erros relativamente pequenos obtidos com o algoritmo (II), acredita-se que a bancada cumpriu o seu papel, fornecendo informações bastante úteis que permitiram a implementação do procedimento desenvolvido no campo.

### C. Atividades em Campo - Aplicação do Algoritmo

Logo nos primeiros experimentos no campo, constatou-se a importância do fluxo térmico no algoritmo de estimativa do ponto de vazamento. Verificou-se que o fluxo térmico se deve a causas mecânicas (expansão e contração do cabo) e não devido a fenômeno de convecção térmica, como inicialmente se pensava, uma vez que, aparentemente, as vazões nas extremidades do cabo são as mesmas. A vazão térmica é variável com o tempo, escoando do tanque para o cabo e vice-versa, dependendo do período do dia, função da demanda de potência elétrica do cabo. Aí reside uma grande dificuldade na inclusão da vazão térmica num algoritmo de detecção que opere autonomamente em tempo real, como se desejava.

Assim, a partir da análise dos primeiros dados de vazão coletados e com a aplicação do primeiro algoritmo de detecção de vazamento, conclui-se que o fluxo térmico deveria ser incluído no algoritmo de detecção a fim de reduzir a incerteza na estimativa do ponto de vazamento.

Entretanto, decidiu-se não se incluir mais no algoritmo a

resistência hidráulica dos cavaletes, pois estas resistências representam uma parcela muito pequena da resistência total do cabo no campo. Como as linhas estão hidráulicamente interligadas, não há também a necessidade de se levar em consideração a diferença de cotas e de pressões dos tanques de alimentação em ambas as extremidades do cabo. Isto dispensa também a necessidade de se conhecer e levar em consideração no algoritmo, a resistência hidráulica do cabo. Tendo em vista estas simplificações no procedimento, recamos no algoritmo mais simples de detecção do ponto de vazamento, e que inclui o fluxo térmico, o qual se escreve:

$$d_a = [2L(Q_b - Q_c) / (Q_a + Q_b - 2Q_c)], \quad (III)$$

onde:

$d_a$  = distância do fluxímetro (a) ao ponto de vazamento (m);

$Q_a$  = vazão no fluxímetro a (l/h);

$Q_b$  = vazão no fluxímetro b (l/h);

$Q_c$  = vazão no fluxímetro c (l/h) = fluxo térmico numa fase sadia do cabo;

$L$  = comprimento de 1 fase da linha (m).

A vantagem do algoritmo (III) é poder levar em consideração a influência do fluxo térmico. Entretanto, esse algoritmo deve utilizar períodos de aquisição de dados com as seguintes características:

- Vazões  $Q_a$  e  $Q_b$  com sentido 'tanque → cabo';
- Vazão térmica  $Q_c$  inferior às vazões  $Q_a$  e  $Q_b$ ;
- Vazão térmica  $Q_c$  com valores entre 0,1 e 0,3 l/h;
- Vazão térmica  $Q_c$  com tendência crescente.

Vale dizer que o algoritmo (III) é essencialmente o algoritmo proposto pela *Pirelli* [8], o qual é tradicionalmente utilizado pelas operadoras e mantenedoras para detecção de vazamentos em cabos elétricos a óleo subterrâneos. A única diferença é a maneira como a vazão térmica é medida no campo.

A Figura 7 apresenta a configuração hidráulica para aplicação do algoritmo (III) no campo.

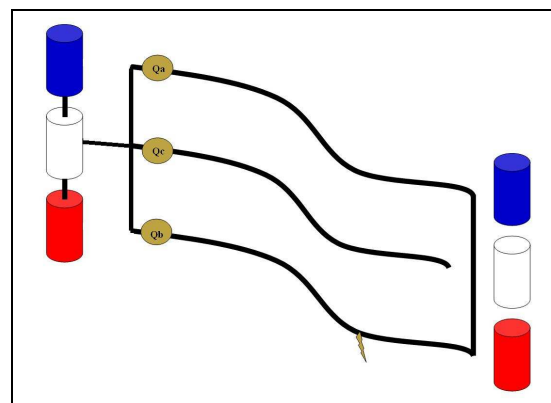


Figura 7: Configuração hidráulica para aplicação do algoritmo de detecção de vazamento no campo - Algoritmo (III).

#### D. Acidente - Vazamento de Óleo na Fase Vermelha no Campo

Em novembro de 2008 um vazamento de ordem de 7 l/h foi detectado na fase vermelha da linha Xavantes-Bandeirantes 2. A aplicação do algoritmo (III) de detecção do ponto de vazamento produziu os seguintes resultados.

#### Cálculo da distância partindo da SE-BAN 345 até a Caixa de Emendas n° 8:

Distância total considerada: 4240 m  
Data de aquisição: 11/11/2008  
Horário: 18h04min as 21h04min  
Valor mediano calculado: 2983 m  
Desvio Padrão: 130 m  
Faixa mais provável de distâncias: 3077 a 3097 m

#### Cálculo da distância partindo da Caixa de Emendas n° 8 até a SE-BAN 345:

Distância total considerada: 4240 m  
Data de aquisição: 14/11/2008  
Horário: 20h00min às 21h30min  
Valor mediano calculado: 1337 m  
Desvio Padrão: 23 m  
Faixa mais provável de distâncias: 1324 a 1330 m.

Conforme mostra a Figura 8, o algoritmo (III) detectou vazamento próximo à Caixa 06, sendo que na realidade o vazamento se dava na Caixa 07, a 567 m de distância. Portanto o erro de localização foi de 6.7 %, erro esse que está dentro da incerteza média do método hidráulico. Foram necessários três congelamentos para a localização do vazamento, os quais foram realizados num período de 48 horas. Após a detecção do ponto de vazamento, transcorreram aproximadamente mais 48 horas para realização do conserto da emenda na Caixa 07. A causa do vazamento foi solda trincada na junta de emenda do cabo

Informações fornecidas, pela equipe da *Pirelli* que realizou os congelamentos e o conserto da linha, revelaram que nas emendas do cabo há perda de carga singular expressiva devido ao estrangulamento tanto da seção de escoamento entre o diâmetro externo da camada de papel isolante e a capa externa, como da seção de escoamento interna ao conduto de cobre. Entretanto, após alguns testes de bancada, verificou-se que essas perdas são desprezíveis em relação ao comprimento da linha no campo.

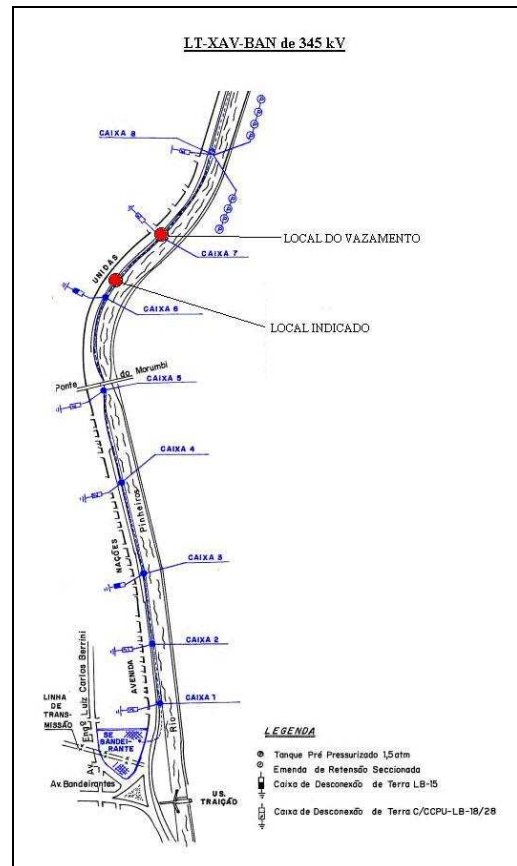


Figura 8: Local do vazamento indicado pelo algoritmo (III) X localização real do vazamento.

#### IV. UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DE CONGELAMENTO PARA LOCALIZAÇÃO DE VAZAMENTOS DE ÓLEO ISOLANTE EM CABOS ELÉTRICOS SUBTERRÂNEOS

Outro método elaborado para a localização de vazamentos foi o congelamento. Ele consiste em aplicarmos Nitrogênio líquido na superfície do cabo e observarmos o comportamento da vazão do óleo.

Este método nos indica, com bastante precisão e velocidade, para qual direção devemos seguir para localizar o vazamento.

As simulações foram realizadas na bancada de testes da CTEEP e foi utilizada a seguinte configuração hidráulica:

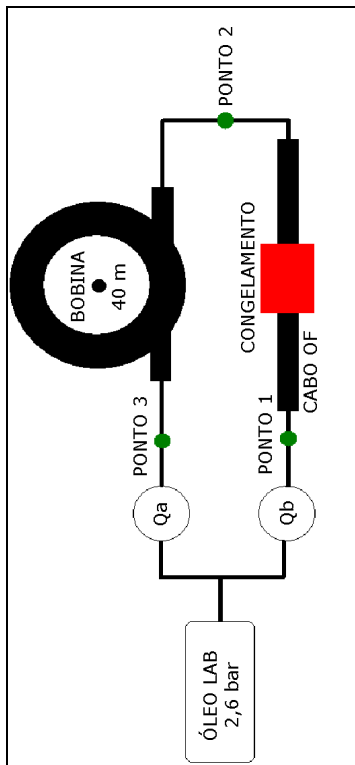


Figura 9: Configuração Hidráulica para método de congelamento.

Foram simulados vazamentos nos três pontos indicados na figura 9 e estes foram os resultados:

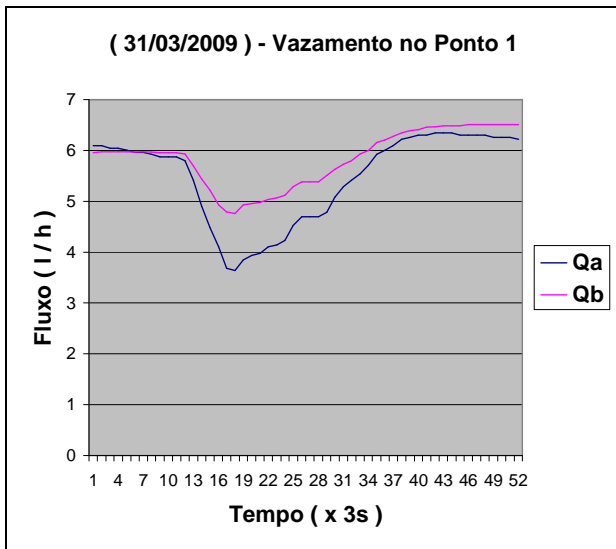


Figura 10: Gráfico de Simulação de Vazamento no ponto 1.

Note que a vazão Qa diminuiu mais do que Qb, o que indica vazamento mais próximo a Qb.

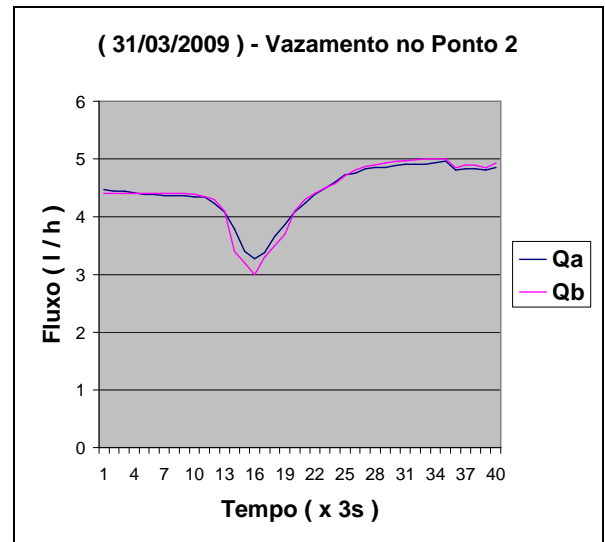


Figura 11: Gráfico de simulação de vazamento no ponto 2.

Note que a vazão Qb diminuiu mais do que Qa, o que indica vazamento mais próximo a Qa.

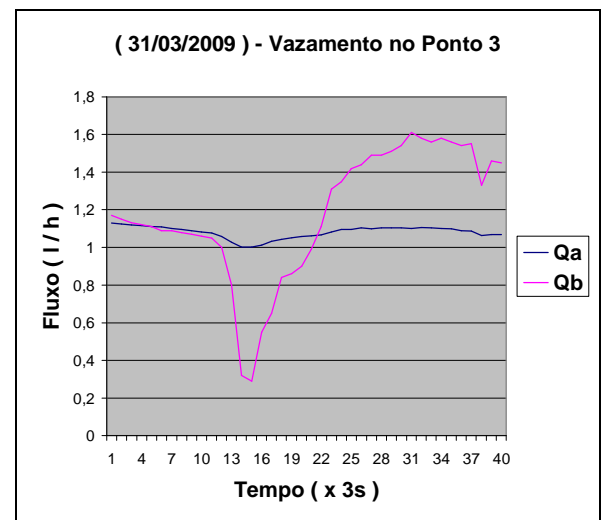


Figura 12: Gráfico de simulação de vazamento no ponto 3.

Note que a vazão Qb diminuiu por um instante muito mais do que Qa, o que indica vazamento mais próximo a Qa.

## V. CONCLUSÕES

### A. Método GPR

Os resultados obtidos no Sítio Controlado de Geofísica Rasa do IAG/USP mostraram que o método GPR pode ser utilizado para mapear e caracterizar cabos elétricos de média e baixa tensão diretamente enterrados, os quais simulam redes de interferências em subsuperfície, e tem aplicações diretas em estudos geotécnicos e de planejamento urbano em grandes centros.

Na área da Usina Elevatória da Traição, os resultados

GPR permitiram mapear várias galerias de canalização de águas pluviais e as tampas de concreto armado com ferro, localizadas sobre os cabos elétricos de alta tensão. Não foi possível detectar os cabos elétricos sob as tampas de concreto, devido às tampas servirem como uma superfície refletora para as ondas eletromagnéticas, impedindo a sua penetração a maiores profundidades. Estes resultados estão de acordo com os estudos de modelagem numérica.

Os resultados GPR são indicados para o mapeamento de interferências no subsolo, e auxiliam os trabalhos de manutenção preventiva dos cabos elétricos de alta tensão. Neste sentido, seria recomendado (para um teste inicial) a substituição das tampas de concreto armado com ferro por tampas de material plástico ou PVC (para um pequeno trecho de cabos), pois a onda eletromagnética usada no método GPR consegue penetrar esses materiais, o que permitiria uma maior profundidade de penetração, e uma análise mais conclusiva a respeito do método GPR.

#### B. MÉTODO HIDRÁULICO PARA LOCALIZAR VAZAMENTOS DE ÓLEO ISOLANTE EM CABOS ELÉTRICOS SUBTERRÂNEOS

O método hidráulico de localização de vazamentos mostrou uma precisão de cerca de 6% no caso avaliado de localização de vazamento em conjunto com o método de congelamento. A incorporação de análises de casos permitirá visualizar com melhor clareza, avaliar e refinar o algoritmo de localização hidráulico. Correções e ajustes do algoritmo poderão ser incorporados com estes estudos de casos de localização real que sejam feitos.

A utilização de um kit móvel de instrumentação para a pré-localização dos vazamentos permitiria maior mobilidade da técnica de localização através do método hidráulico. O método hidráulico de localização oferece duas alternativas, a primeira alternativa conta com dois kits móveis na procura do vazamento, cada kit está composto por três fluxímetros, um painel e uma remota, que deve ser instalado no extremo dos circuitos hidráulicos de cada linha de transmissão. A segunda alternativa é composta de kits fixos nos extremos de cada um destes circuitos hidráulicos, que operariam de forma permanente. Estes equipamentos estariam conectados em rede com o sistema que permitiria a captura de dados. Já que o método novo dispõe de dois kits com instrumentação moderna para a localização dos vazamentos, e é possível realizar a instalação dos equipamentos com a linha energizada, não há multa por indisponibilidade

A instrumentação poderá ser instalada com a linha energizada, desde que tomados os devidos cuidados, permitindo assim a aquisição de dados e as simulações de localização.

#### C. MÉTODO DE CONGELAMENTO PARA LOCALIZAÇÃO DE VAZAMENTOS DE ÓLEO ISOLANTE EM CABOS ELÉTRICOS SUBTERRÂNEOS

O método se mostrou eficiente não apresentando nenhuma falha na bancada de testes, porém o mesmo deve ser realizado na linha de transmissão subterrânea para confirmar seu perfeito funcionamento na mesma.

Com este desenvolvimento diminuímos o tempo do congelamento que durava cerca de cinco horas para algo em torno de cinco minutos.

E por fim, podemos concluir que o melhor meio para localizarmos vazamentos é associarmos o método hidráulico ao método de congelamento, sendo que o método hidráulico pré-localiza o vazamento e o congelamento indica a direção onde está o vazamento.

## VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Baldan, J.C., 2007. Projeto Subterrâneo. Revista Potência, ano 3, no. 21, 30p. Publicação restrita.
- [2] Daniels, D.J., 1996. Surface Penetrating Radar. The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom, 300p.
- [3] Grimoni, J.A.B., Silva, H.A.P., Garcia, D.A.A., Duarte, A., 2004. Underground Cable Monitoring System Using Mobile Telephone Communication Systems In: IEEE/PES T&D 2004 Latin America, 2004, São Paulo. Anais do IEEE/PES T&D 2004 Latin America. Cdrom.
- [4] Porsani, J.L., 1999. Ground Penetrating Radar (GPR): Proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado – SP. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro - SP, 145p.
- [5] Porsani, J.L., Borges, W.R., Rodrigues, S.I. & Hiedo, F.Y., 2006. O Sítio Controlado de Geofísica Rasa do IAG/USP: Instalação e Resultados GPR 2D-3D. Revista Brasileira de Geofísica 24(1), p.49-61.
- [6] Yee, K.S., 1966. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. IEEE Transactions on antennas and propagation AP, v.14, n.3, p.302-307.
- [7] V. Burgess, "Leak Location on Fluid Filled Cables," EA Technology, Capenhurst Technology Park, Capenhurst, Chester, CH1 6ES, UK.
- [8] Manual Pirelli, "Maintenance of Oil Pressure Systems."