

Copyright 2012, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2012, em Salvador/BA no mês de maio de 2012.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Aplicação experimental da técnica de mapeamento de corrente de interferência SCM - Stray Current Mapper

Marcelo Araújo¹; Neusvaldo L. Almeida²; Gutemberg de S. Pimenta³; Sérgio E. A. Filho²;
Eduardo W. Laurino⁴; Jorge Dequech⁵; Paulo M. de Souza⁶

Abstract

Interference currents flow through the soil and when they find buried metal structures are captured by these structures through which to be conducted, to the point of closing the circuit. The main sources of these currents are electrified traction systems, cathodic protection systems of other structures, machinery and welding equipment. This problem has been known for a long time and in some ways is already relatively dominated by companies with highly effective technologies and procedures for monitoring and mitigation of this phenomenon. However, where several sources of interference simultaneously coexist within the same area, in general it is very difficult to identify the origin as well as the magnitude of the effect of each source alone. Consequently, this may also hinder the actions to be taken to ensure the integrity of structures. The Laboratory of Corrosion and Protection of IPT and Petrobras are developing an exploratory study about mapping technique called Stray Current Mapper - SCM. It is based on the principle that all current is associated with a magnetic field and, therefore, knowing the magnetic field around a buried pipeline, it is possible to obtain information on the currents flowing through this pipeline as intensity and direction. This technology is relatively recent and, probably, that is why there is no enough information on its applicability. This paper will discuss results of an experimental application of this technique in a field test with controlled conditions, as well as the applications and limitations.

Keywords: interference current; cathodic protection, stray current mapper.

Resumo

Correntes de interferência circulam pelo solo e quando encontram estruturas metálicas enterradas são captadas por estas estruturas por onde passam a ser conduzidas, até o ponto de fechamento do circuito. As principais fontes dessas correntes são sistemas de tração eletrificados, sistemas de proteção catódica de outras estruturas, máquinas e equipamentos de

¹ Técnico de Inspeção de Equipamentos, Petrobras-Cenpes.

² Pesquisador do Laboratório de Corrosão e Proteção do IPT.

³ Consultor sênior, Petrobras-Cenpes.

⁴ Consultor, Petrobras-Transpetro.

⁵ Engenheiro, SONDEQ.

⁶ Técnico de Inspeção de Equipamentos, Transpetro.

soldagem. Este problema já é conhecido há muito tempo e de certa forma já está relativamente dominado pelas empresas que possuem tecnologias e procedimentos muito eficazes para o monitoramento e a mitigação desse fenômeno. No entanto, quando várias fontes de interferência coexistem simultaneamente numa mesma área, em geral torna-se muito difícil identificar a origem bem como a magnitude da interferência com que cada fonte isoladamente está contribuindo. Conseqüentemente, isto pode dificultar também as ações a serem tomadas para garantir a integridade das estruturas. O Laboratório de Corrosão e Proteção do IPT e a Petrobras estão desenvolvendo um trabalho exploratório de uma técnica de mapeamento de correntes de interferência denominada *Stray Current Mapper* – SCM. Ela baseia-se no princípio de que toda corrente está associada a um campo magnético e que, portanto, conhecendo-se o campo magnético no entorno de um duto enterrado, é possível obter informações sobre as correntes que circulam por este duto como intensidade e direção. Esta tecnologia é relativamente recente e provavelmente por isso, não existe uma quantidade representativa de citações sobre a sua aplicabilidade. Neste trabalho, serão discutidos resultados de uma aplicação experimental desta técnica em um campo de teste com condições controladas, bem como as aplicações e limitações.

Palavras-chave: corrente de interferência; proteção catódica; mapeamento de correntes de interferência.

Introdução

Correntes de interferências são correntes que circulam pelo solo e quando encontram estruturas metálicas enterradas são captadas por estas estruturas e passam a ser conduzidas por elas, até o ponto de fechamento do circuito. Estas correntes ao entrarem nas estruturas não causam qualquer dano; no entanto, quando abandonam, causam sérios danos com conseqüências imprevisíveis. Às vezes, uma simples observação do gradiente de potencial tubo-solo ao longo da faixa de dutos já fornece informações suficientes para que medidas mitigadoras sejam implementadas. No entanto, em grande parte dos casos, como quando coexistem várias estruturas enterradas e cada uma com sistemas de proteção catódica individual ou quando existe interferência dinâmica, faz-se necessário um estudo mais criterioso das fontes interferentes e da estrutura que está sob interferência. Para estes casos, a técnica SCM tem uma grande aplicação, pois permite identificar a origem destas correntes, bem como a intensidade e o sentido das mesmas.

A técnica SCM baseia-se no princípio de que toda corrente circulante no duto está associada a um campo eletromagnético. Portanto, conhecendo-se este campo no entorno de um duto enterrado, é possível obter informações sobre a intensidade e o sentido das correntes que circulam por este duto. Os seguintes equipamentos compõem esta:

- SCM SensorBar;
- SmartProbe;
- Smart Interrupter;
- SCM SensorBar controller software.

SCM Sensor Bar

O *SCM Sensor Bar* deve ser instalado na superfície do solo, acima do duto que se deseja mapear, em local onde se deseja conhecer a intensidade e o sentido da corrente circulante neste duto. Para isso, presume-se que o duto tenha sido previamente localizado. O *SCM Sensor Bar* possui quatro magnetômetros para quantificação do campo magnético gerado pela corrente circulante no duto naquele ponto escolhido. O sensor detecta o campo magnético e informa a intensidade e a direção da corrente circulante. Vale ressaltar que o *SCM Sensor Bar* é utilizado para estudar correntes de interferência estáticas. Um *Sensor Bar controller software* configura o *SCM Sensor Bar*, mediante uma interface com computador e, por ele, são visualizadas as informações fornecidas pelo *SCM Sensor Bar*. Conforme será visto adiante, o *Sensor Bar* identifica os sinais das correntes chaveadas no retificador de proteção catódica. Este chaveamento da corrente é feito utilizando o *Smart Interrupter*.

O *Sensor Bar* deve ser disposto de maneira estratégica ao longo do duto, de maneira a mapear pontos de entrada e saída de corrente neste duto. A seta vermelha indicada na parte superior do *Sensor Bar* é utilizada para indicar o sentido correto da corrente circulante no duto. Assim, caso seja visualizado no *Smart controller software* uma corrente orientada para cima, a orientação do *Sensor Bar* está de acordo com o sentido da corrente circulante no duto; caso o sentido da corrente no software esteja para baixo, a corrente circulante no duto estará circulando em sentido contrário à orientação do *Sensor Bar*. A Figura 1 mostra um registro fotográfico do *SCM Sensor Bar*.



Figura 1 – *SCM Sensor Bar*

SCM Smart Probe

O *Smart Probe* deve ser utilizado para estudar correntes de interferência dinâmicas, ou seja, àquelas provenientes de sistemas eletrificados por exemplo. Ele deve ser instalado ortogonalmente ao duto e de maneira estratégica ao longo do duto, de modo que seja possível mapear os pontos de entrada e saída de corrente. O equipamento também dispõe de magnetômetros localizados ao longo da haste, utilizados para detectar o campo magnético resultante da corrente e indicar a intensidade da corrente circulante no duto. A Figura 2 mostra a fotografia do *Smart Probe*.



Figura 2 – *Smart Probe*

Smart Interrupter

O *Smart Interrupter* deve ser conectado em série com o leito de anodos, por meio do retificador de proteção catódica. A Figura 3 mostra a fotografia do *Smart Interrupter* e a Figura 4 ilustra de que maneira o *Smart Interrupter* deve ser conectado ao sistema.



Figura 3 – *Smart Interrupter*

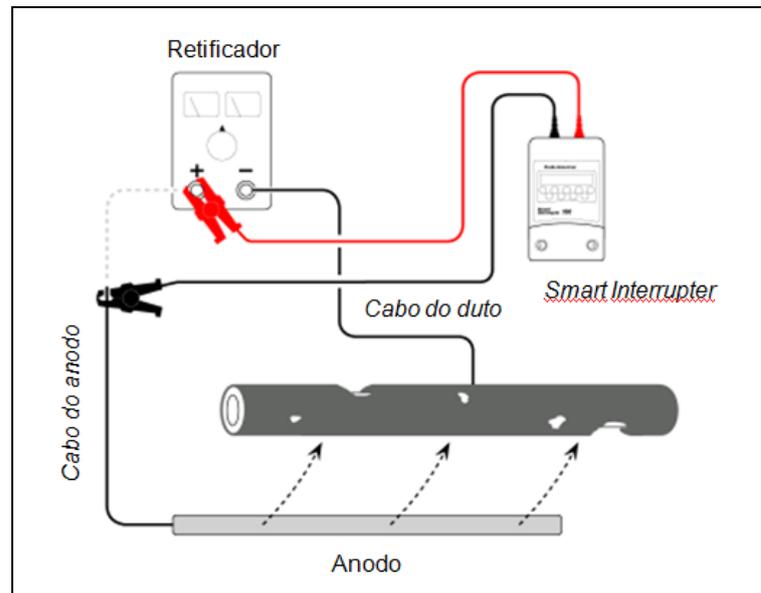


Figura 4 – Desenho esquemático da conexão do *Smart Interrupter* em série com o leito de anodos, via retificador de proteção catódica.

Conectando-se o *Smart Interrupter* conforme ilustrado na Figura 4 garante-se o chaveamento da corrente na saída do retificador de proteção catódica com padrão conhecido. Estes padrões de chaveamento são reconhecidos pelo *Sensor Bar*. Podem ser seleccionados quatro modos de chaveamento no *Smart Interrupter*, a saber:

- caso seja necessário fazer um estudo de correntes de interferência estática utilizando-se o *SCM Sensor Bar*, deve-se seleccionar o modo de chaveamento padrão <0>, padrão <1>, padrão <2> ou padrão <3>;
- caso seja necessário fazer um estudo de correntes de interferência dinâmica utilizando-se o *SCM Smart Probe*, deve-se seleccionar o modo de chaveamento <PPL> ou sem padrão definido (neste caso deve-se escolher o tempo de chaveamento *on/off*).

Computador e SCM SensorBar controller software

A técnica SCM necessita de um computador e do software para configuração tanto do *Sensor Bar* quanto do *Smart Probe*. Vale ressaltar que o computador é necessário apenas para configuração do *Sensor Bar* ou *Smart Probe*, já que cada um dos equipamentos dispõe de um cartão de memória de capacidade igual a 32 MB para registro dos dados.

Metodologia

O trabalho foi desenvolvido por meio de simulações de circuitos elétricos incluindo sistemas de proteção catódica por corrente impressa, sistemas interferentes e drenagem de corrente. A parte experimental foi desenvolvida em um Centro de Treinamento e Pesquisas em Proteção Catódica em um duto enterrado com 51,2 mm de diâmetro (2 polegadas), cerca de setenta metros de extensão e profundidade aproximada 70 cm. Ao longo dos 70 m, o duto estava enterrado em solos com diferentes características. O local onde foi desenvolvido o estudo experimental possui ainda leito de anodos, retificadores de proteção catódica, pontos de

medição (PTE), tubos camisa, *scraper* e um sistema para simulação de correntes de interferência dinâmicas. A Figura 5 mostra de forma esquemática a disposição de cada um dos componentes descritos e a Figura 6 mostra algumas imagens do Centro de treinamento. Os seguintes testes foram desenvolvidos:

- Teste 1** - estudo da corrente ID1 ao longo do site padrão utilizando o “sensor bar”;
- Teste 2** - offset do “sensor bar” – ½ barra, 1 barra e barra contrária;
- Teste 3** - variação da corrente do retificador utilizando o “sensor bar” (correntes – 2,6 A; 0,6 A; 0,125 A e < 0,125 A);
- Teste 4** - estudo da corrente ID1 ao longo do site padrão utilizando a “Smart Probe” (Leitura de corrente, offset e erro de profundidade). Leitura do duto paralelo;
- Teste 5** - estudo da interferência de correntes ID1 e ID2 em diferentes situações;
- Teste 6** - estudo da variação da corrente DC;
- Teste 7** - estudo da injeção da corrente DC em diferentes pontos;
- Teste 8** - simulações de correntes dinâmicas;
- Teste 9** - simulações de interferência de corrente AC.

Parte experimental

Variação da corrente de proteção catódica ao longo do site padrão

Os estudos da variação da corrente de proteção catódica foram conduzidos conforme mostrado na Figura 5. Para isso, o *Smart Interrupter* foi conectado ao retificador de proteção catódica (vide Figura 4) e este foi configurado para chavear no padrão zero (padrão <0>). A corrente lida no retificador foi de 4,6 A e foi escolhido o ponto situado no km (0 + 040) para realizar as medições. A profundidade real do duto neste ponto era de 0,76 m. O *Sensor Bar* foi colocado sobre a superfície do solo e foram realizadas medidas com o *Sensor Bar* localizado em diferentes posições, a saber:

- centro do *Sensor Bar* localizado sobre a geratriz superior do duto (duto previamente localizado);
- centro do *Sensor Bar* localizado a aproximadamente 50 cm e 100 cm a esquerda da geratriz superior do duto;
- centro do *Sensor Bar* localizado a aproximadamente 50 cm e 100 cm a direita da geratriz superior do duto.

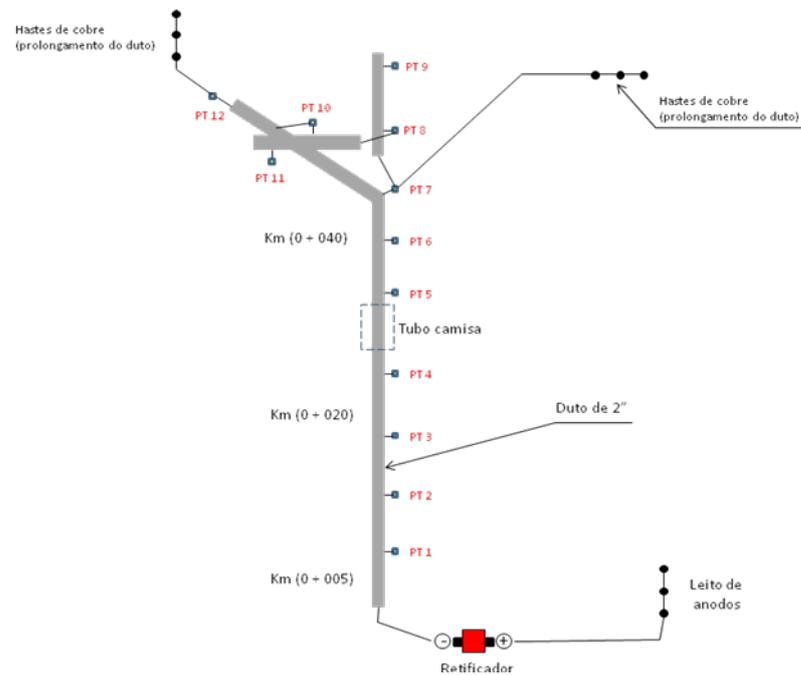


Figura 5 – Site padrão do Centro de treinamento

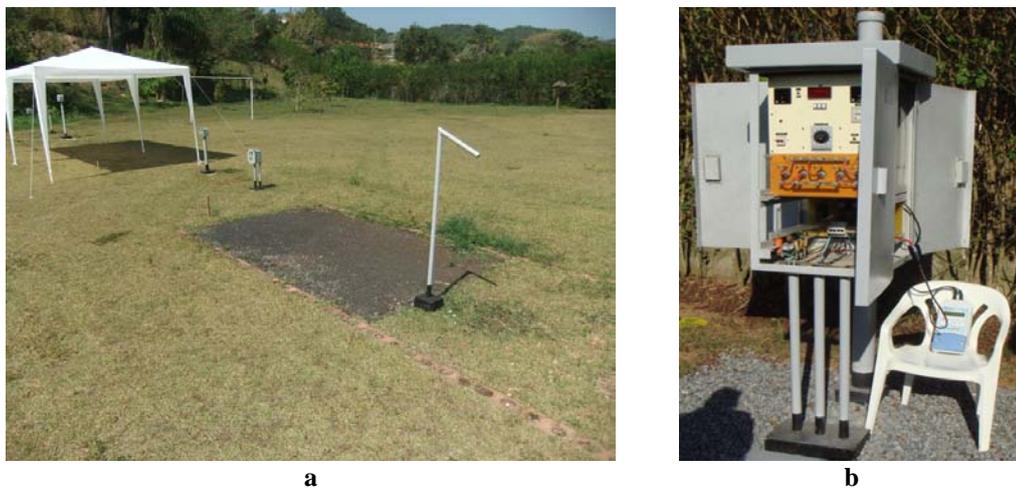


Figura 6 – Registros fotográficos do site de treinamento: a) faixa do duto enterrado e b) retificador de proteção catódica.

As medidas foram realizadas com a seta do *Sensor Bar* no sentido do retificador de proteção catódica. As Figuras 7 a 9 mostram como se comportam os vetores de localização do duto enterrado quando se desloca o centro do *Sensor Bar* para a esquerda e para a direita, bem como os resultados de corrente chaveada. A Tabela 1 mostra os resultados obtidos.



Figura 7 – Vetores de localização do duto e sinal da corrente chaveada padrão <0> no retificador de proteção catódica. Centro do Sensor Bar localizado sobre a granziz superior do duto.



Figura 8 – Vetores de localização do duto e sinal da corrente chaveada padrão <0> no retificador de proteção catódica. Centro do Sensor Bar localizado a 50 cm a esquerda da granziz superior do duto.

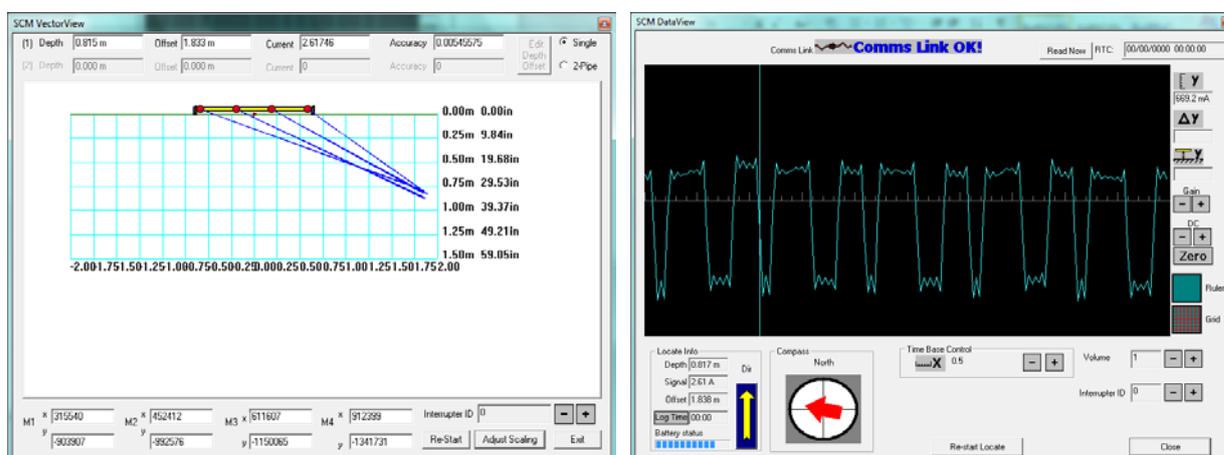


Figura 9 – Vetores de localização do duto e sinal da corrente chaveada padrão <0> no retificador de proteção catódica. Centro do Sensor Bar localizado a 100 cm a esquerda da geratriz superior do duto.

Tabela 1 – Valores de corrente circulante e profundidade do duto. Medidas realizadas nas seguintes condições: ponto de medição km (0+040), corrente na saída do retificador: 4,6 A, padrão de chaveamento <0> e profundidade real da tubulação 0,76 m.

Posição do centro do Sensor Bar	Corrente (A)	Profundidade (m)	Offset (m)
Geratriz superior do duto	2,73	0,82	0,074
50 cm à esquerda	2,71	0,77	0,59
100 cm à esquerda	2,62	0,81	1,84
50 cm à direita	2,77	0,80	- 0,59
100 cm à direita	2,83	0,81	- 1,80

Os resultados mostrados nas Figuras 7 a 9 indicam a conversão dos vetores campo magnético em direção à posição de enterramento do duto. Tal fato fica claramente evidenciado quando se desloca a posição central do *Sensor Bar* para a esquerda e para a direita em relação à geratriz superior do duto. Verificou-se também que este deslocamento não impactou nas medidas de corrente circulante e profundidade de enterramento, como mostrado na Tabela 1.

Estudo da variação da corrente de proteção catódica ao longo do site padrão, variando-se a corrente injetada no retificador de proteção catódica.

Este teste foi realizado de modo similar ao teste anterior, porém buscava-se verificar que resposta era obtida com a diminuição da corrente injetada no retificador de proteção catódica. Todas as condições e configurações descritas no item anterior foram mantidas. Foram realizadas medidas somente com o *Sensor Bar* localizado sobre a geratriz superior do duto, sem *offset*. Em relação ao teste anterior, as mudanças ocorreram somente na intensidade da corrente injetada no retificador de proteção catódica. Foram impostas as seguintes correntes: 4,6 A; 2,5 A; 1,2 A; 0,6 A (mínimo regulável no retificador). As Figuras 10 a 13 mostram os

vetores campo magnético para localização do duto, bem como o sinal da corrente chaveada. A Tabela 2 mostra os resultados das medidas realizadas neste teste.



Figura 10 – Vetores de localização do duto e sinal da corrente chaveada padrão <0> no retificador de proteção catódica. Centro do *Sensor Bar* localizado sobre a geratriz superior do duto no km (0 + 040) e corrente injetada no retificador de proteção catódica igual a 4,6 A chaveada no padrão <0>



Figura 11 – Vetores de localização do duto e sinal da corrente chaveada padrão <0> no retificador de proteção catódica. Centro do *Sensor Bar* localizado sobre a geratriz superior do duto no km (0 + 040) e corrente injetada no retificador de proteção catódica igual a 2,5 A chaveada no padrão <0>.



Figura 12 – Vetores de localização do duto e sinal da corrente chaveada padrão <0> no retificador de proteção catódica. Centro do *Sensor Bar* localizado sobre a geratriz superior do duto no km (0 + 040) e corrente injetada no retificador de proteção catódica igual a 1,2 A chaveada no padrão <0>.

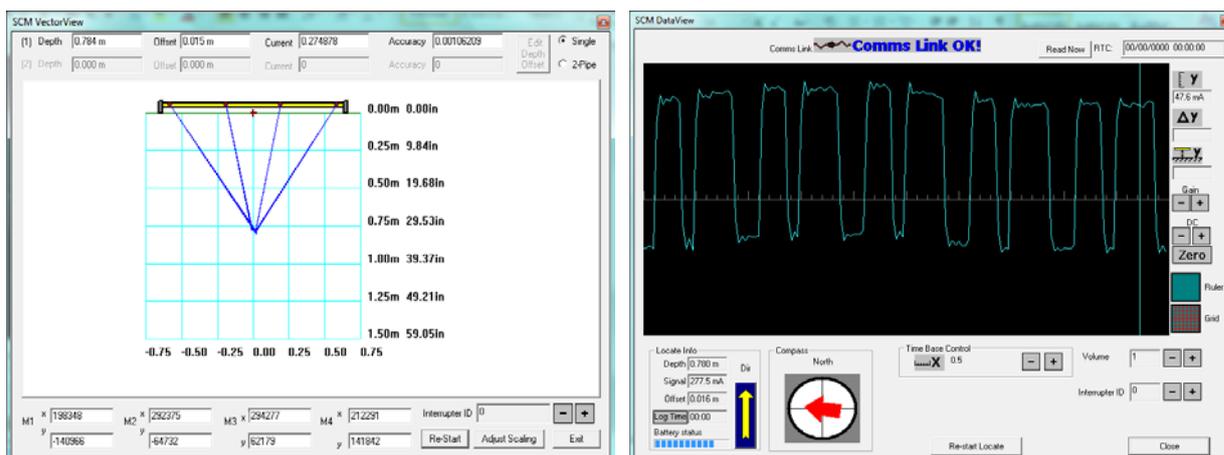


Figura 13 – Vetores de localização do duto e sinal da corrente chaveada padrão <0> no retificador de proteção catódica. Centro do *Sensor Bar* localizado sobre a geratriz superior do duto no km (0 + 040) e corrente injetada no retificador de proteção catódica igual a 0,6 A chaveada no padrão <0>.

Tabela 2 – Resultados obtidos de corrente circulante no duto e profundidade de enterramento. Medidas realizadas nas seguintes condições: ponto de medição km (0+040), padrão de chaveamento <0> e profundidade real da tubulação igual a 0,76 m, variando-se a corrente do retificador de proteção catódica.

Corrente injetada no retificador (A)	Corrente (A) medida no km (0+040)	Profundidade (m)	Offset (m)
4,6	2,73	0,82	0,074
2,5	1,42	0,78	0,015
1,2	0,61	0,78	0,016
0,6	0,27	0,79	0,016

Os resultados mostrados nas Figuras 10 a 13 mostram convergência dos vetores campo magnético em direção à posição de enterramento do duto, mesmo com a diminuição da corrente injetada no retificador de proteção catódica. Observou-se um decréscimo linear da corrente lida no km (0 + 040) quando comparada ao decréscimo da corrente injetada no retificador de proteção catódica (vide Tabela 2). Os valores de profundidade de enterramento medidos apresentaram coerência em relação ao valor de profundidade real.

Estudo da variação da corrente de proteção catódica ao longo do duto utilizando um retificador de proteção catódica e um retificador interferente.

Neste experimento, o objetivo foi simular um sistema de interferência estática. Para isso, foi adicionado ao circuito padrão, um retificador interferente, conforme mostrado na Figura 5. O objetivo era verificar o comportamento do *SCM Sensor Bar* quando injetadas correntes individuais e simultâneas pelos retificadores de proteção catódica e interferente. Para isto, foram instalados dois *Smart Interrupter*, um no retificador de proteção catódica chaveando no padrão <0> e outro no retificador interferente chaveando no padrão <2>. O *Sensor Bar* deveria distinguir os sinais chaveados nos dois *Smart Interrupter*, medir a profundidade de enterramento do duto, quantificar e fornecer o sentido da corrente circulante no duto naquele determinado local de medição.

Foram escolhidos dois locais para realizar as medidas: o primeiro ponto foi o km (0 + 020), profundidade real igual a 0,78 m, e o segundo local foi o km (0 + 040), profundidade real igual a 0,76 m. A Tabela 3 mostra os testes realizados bem como os resultados obtidos e a Figura 14 mostra a resposta da corrente chaveando-se o retificador de proteção catódica no padrão <0> e o retificador interferente no padrão <2>. Observa-se que o perfil da corrente chaveada encontrada nesta situação é diferente do perfil da corrente chaveada nos testes realizados sem o retificador interferente.

A partir do sinal da corrente chaveada é possível quantificar o sinal da corrente emitido tanto pelo retificador de proteção catódica quanto pelo retificador interferente. Para isto, é necessário selecionar no *software* qual é o sinal chaveado que se deseja medir: padrão <0> ou padrão <2>. Desta mesma maneira consegue-se medir a profundidade de enterramento do duto e saber qual é o sentido da corrente emitida pelos retificadores de proteção catódica e interferente. Conforme mostrado na Tabela 3, seta para cima ↑ indica sentido da corrente voltada para o retificador de proteção catódica e seta para baixo ↓ indica sentido da corrente voltada para o retificador interferente.

Tabela 3 – Resultados dos testes realizados, variando-se a corrente de proteção catódica, utilizando um retificador de proteção catódica e um retificador interferente.

Localização (km)	Retificador de proteção catódica		Retificador interferente		Profund. (m)	Corrente (A)	Offset (m)	Sentido da corrente
	Intens. corrente	Padrão chaveamento	Intens. corrente	Padrão chaveamento				
0 + 020	0,6	<0>	off	---	0,79	0,49	-0,008	↑
	off	---	0,6	<2>	1,00	0,070	0,102	↓
	off	---	1,2	<2>	1,02	0,135	0,101	↓
	0,6	<0>	1,2	<2>	0,79 <0> 1,00 <2>	0,45 <0> 0,14 <2>	0,009 <0> 0,09 <2>	↑<0> ↓<2>
0 + 040	0,6	<0>	off	---	0,79	0,24	-0,001	↑
	off	---	1,2	<2>	0,75	0,70	0,027	↓
	0,6	<0>	1,2	<2>	0,74 <0> 0,79 <2>	0,24 <0> 0,67 <2>	0,027 <0> 0,034 <2>	↑<0> ↓<2>



Figura 14 – Sinal da corrente chaveada obtida em um dos testes realizados. Resposta obtida com *Smart Interrupter* instalado no retificador de proteção catódica chaveando no padrão <0> e *Smart Interrupter* instalado no retificador interferente chaveando no padrão <2>.

Foi possível distinguir os sinais das correntes do sistema de proteção catódica e do sistema interferente. A técnica mostrou-se satisfatória quanto à quantificação das correntes circulantes no sistema.

Estudo da corrente circulante no sistema utilizando o *SCM Smart Probe*

O *Smart Probe* mostra-se uma técnica versátil para estudos de correntes de interferência de natureza dinâmica (PARKER; WALTON, 2007). A diferença do *Smart Probe* para o *Sensor Bar* é que com o *Smart Probe* parte-se do pressuposto de que se conhece a profundidade real de enterramento do duto, já que este é um dado muito importante para se obter uma resposta confiável. O equipamento não fornece como resposta o valor da profundidade do duto. Este fato ocorre em razão do equipamento não necessitar de um chaveamento com padrão definido como o padrão <0> ou padrão <2>. Normalmente utiliza-se um sinal chaveado sem padrão, ou <PPL> ou escolhe-se um intervalo de tempo *on/off*.

Para se realizar a medida deve-se inserir, no *software*, o valor da profundidade de enterramento do duto e este valor deve ser igual à altura relativa entre a ponta da *Smart Probe* e o centro do duto (Figura 19). Por exemplo, se a ponta da *Smart Probe* estiver encostada no duto, a profundidade inserida no software deverá ser igual à distância radial do duto. Deve-se também inserir o valor do *offset* que é igual à distância entre a *Smart Probe* e o duto (Figura 15).

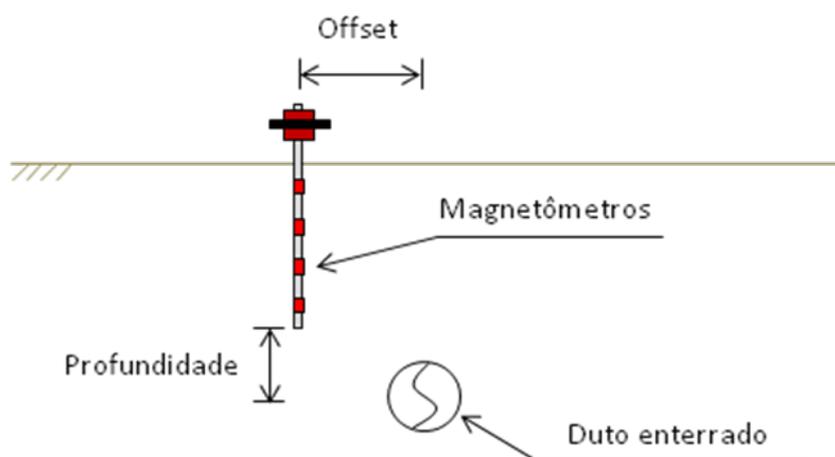


Figura 15 – Desenho esquemático para ilustrar a distância entre a ponta do *Smart Probe* e o duto e o *offset*.

Neste primeiro teste com a *Smart Probe* foi instalada uma chave interruptora *Smart Interrupter* no retificador de proteção catódica sem chaveamento com padrão definido. Neste caso selecionou-se chaveamento <PPL> ou intervalo de chaveamento 3 s *on* e 1 s *off*. Utilizou-se o site padrão como circuito elétrico e selecionou-se o km (0 + 040) para realizar as medidas. A corrente injetada no retificador de proteção catódica foi de 1 A. A Figura 16 mostra o sinal da corrente no chaveamento no modo <PPL> e a Figura 17 mostra o sinal da corrente no chaveamento 3 s *on* e 1 s *off*.

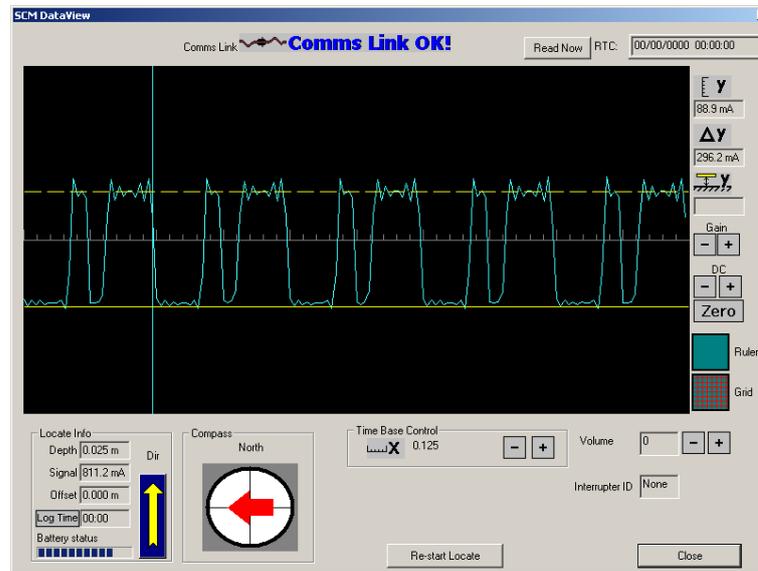


Figura 16 – Sinal da corrente no modo <PPL>

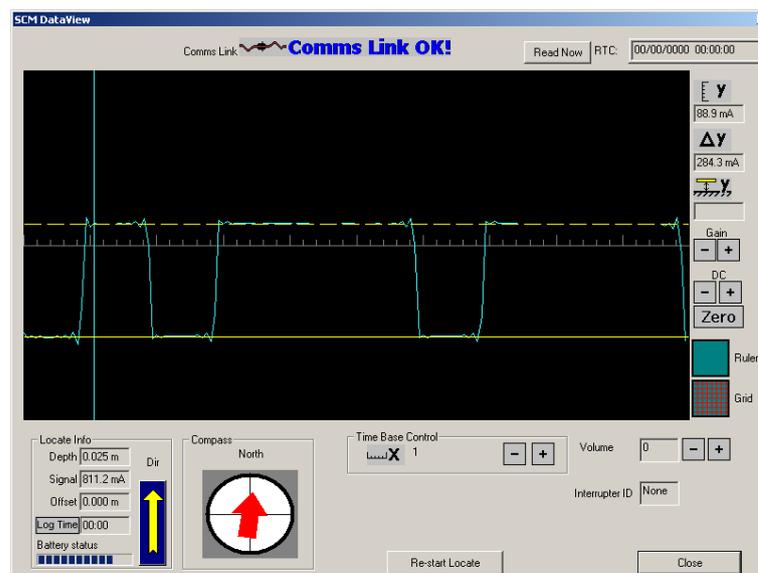


Figura 17 – Sinal da corrente chaveando-se 3 s on e 1 s off.

A Tabela 4 mostra resultados de algumas medidas realizadas com a *Smart Probe*, com e sem a inserção de erros de profundidade do duto e de *offset*, injetando-se uma corrente de proteção catódica igual a 1,0 A e medindo-se a corrente no km (0+040). Nesta Tabela, é feita uma comparação com a medida realizada com o *Sensor Bar*.

Pelos resultados mostrados na Tabela 4, verificam-se algumas discrepâncias dos resultados obtidos com o uso dos equipamentos *SCM Sensor Bar* e *SCM Smart Probe*. Os testes iniciais realizados com o *Sensor Bar* mostraram-se satisfatórios do ponto de vista do monitoramento das correntes de interferência estáticas e não se verificou extrema necessidade em mapear e

localizar a tubulação enterrada, uma vez que a técnica localiza e indica o posicionamento do duto. Já a utilização do equipamento *SCM Smart Probe* mostrou maior complexidade, uma vez que a determinação exata do posicionamento do duto é uma condição imprescindível para se obter resultados confiáveis. A inserção de erros de profundidade e erros de *offset* pode ocasionar interpretações errôneas dos níveis de interferência do duto enterrado.

Tabela 4 - Resultados de algumas medidas realizadas com a *Smart Probe*, com e sem a inserção de erros de profundidade do duto e de *offset*, injetando-se uma corrente de proteção catódica igual a 1,0 A e medindo-se a corrente no km (0+040). Nesta Tabela, é apresentada uma comparação com a medida realizada com o *Sensor Bar*.

<i>Set up</i>	Equipamento	Profundidade do duto medida (m)	Profundidade do duto inserida (m)	Modo de chaveamento	Offset (m)	Corrente medida no km (0+040) (A)
	Sensor Bar	0,78	--	Padrão <0>	0,027	0,47
Sem inserir erro de profundidade e de offset	Smart Probe	--	0,025*	<PPL>	0,0	0,29
		--	0,025*	3,0 s on 1,0 s off	0,0	0,28
		--	0,025*	3,0 s on 1,0 s off	0,6	0,27
Inserindo erro de profundidade	Smart Probe	--	1,025*	3,0 s on 1,0 s off	0,0	23,0
		--	0,525*	3,0 s on 1,0 s off	0,0	7,49
		--	0,255*	3,0 s on 1,0 s off	0,0	2,72
		--	0,1225*	3,0 s on 1,0 s off	0,0	1,23
Inserindo erro de offset	Smart Probe	--	0,025*	3,0 s on 1,0 s off	0,38	- 4,10
		--	0,025*	3,0 s on 1,0 s off	0,19	- 3,31

*Medidas realizadas com a ponta da *Smart Probe* em contato com o duto.

Estudo de correntes de interferências estáticas entre dois dutos paralelos

Os estudos de correntes de interferência estáticas entre dois dutos paralelos foram conduzidos no circuito esquematizado na Figura 18.

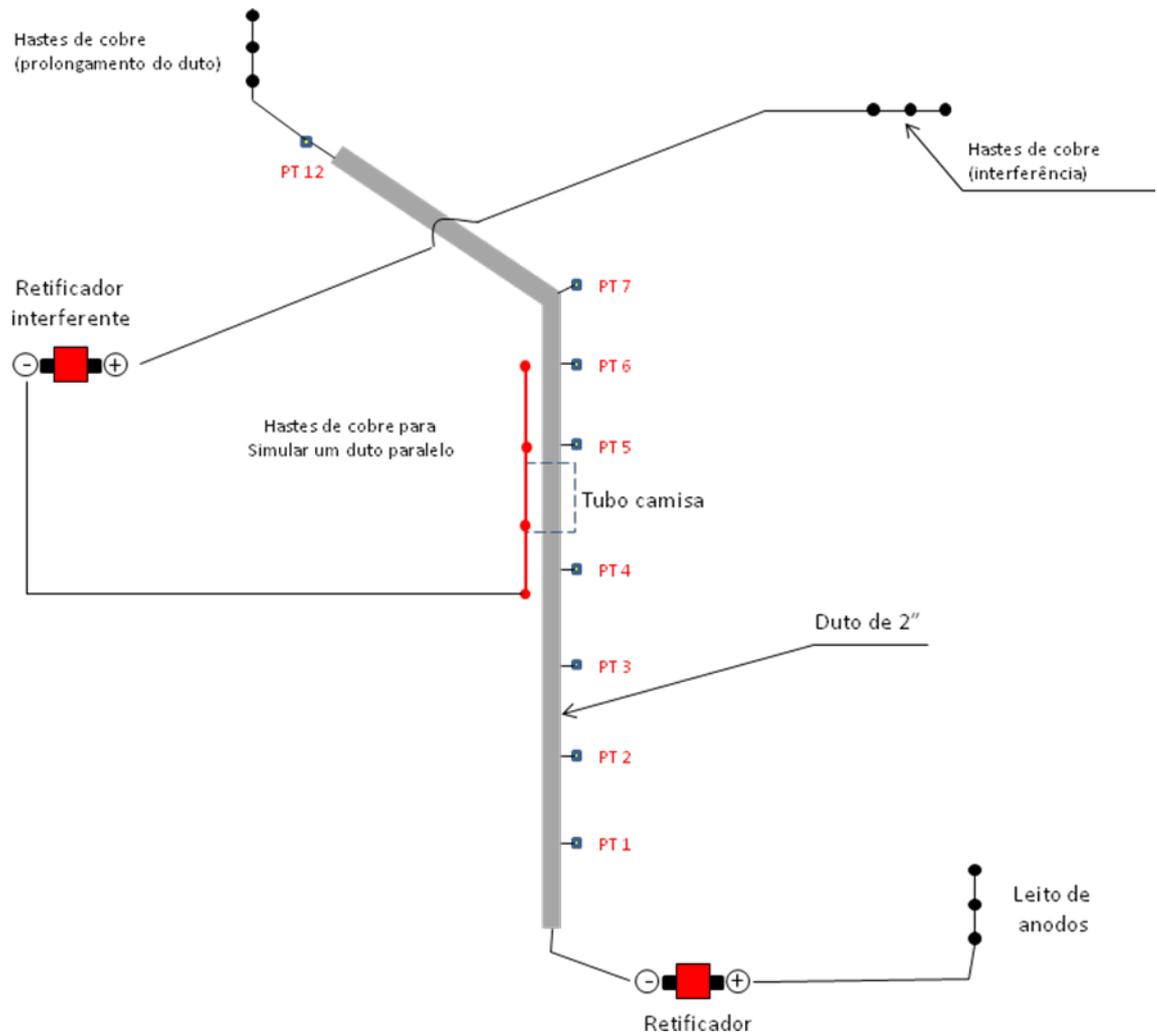


Figura 18 – Desenho esquemático do circuito elétrico utilizado nos estudos de correntes de interferência estáticas entre dois dutos paralelos.

Tabela 5 – Resultados dos estudos de interferência estática entre dois dutos paralelos. Corrente elétrica injetada no RT 1 igual a 1,0 A, chaveando no padrão <0>, e corrente elétrica injetada no RT 2 igual a 1,0 A, chaveando no padrão <2>.

Condição	km	Padrão de chaveamento do retificador		Profundidade real do duto (m)	Profundidade medida (m)		Corrente medida (A)		Sentido da corrente elétrica		Offset (m)	
		RT 1	RT 2		RT 1	RT 2	RT 1	RT 2	RT 1	RT 2	RT 1	RT 2
Sem interferência do retificador interferente	0 + 010	<0>	---	0,71	0,749	---	1,145	---	↑	---	0,091	---
	0 + 015	<0>	---	0,79	0,841	---	1,151	---	↑	---	0,030	---
	0 + 020	<0>	---	0,78	0,843	---	1,139	---	↑	---	-0,014	---
	0 + 025	<0>	---	0,88	0,819	---	1,136	---	↑	---	0,046	---
	0 + 030	<0>	---	0,79	0,841	---	1,125	---	↑	---	-0,001	---
	0 + 035	<0>	---	0,82	0,846	---	1,110	---	↑	---	-0,065	---
	0 + 040	<0>	---	0,76	0,780	---	1,094	---	↑	---	-0,012	---
	0 + 048	<0>	---	0,71	0,735	---	0,845	---	↑	---	0,021	---
Com interferência do retificador interferente	0 + 010	<0>	<2>	0,71	0,756	0,379	1,130	0,001	↑	↑	0,027	0,265
	0 + 015	<0>	<2>	0,79	0,852	1,144	1,160	0,007	↑	↑	0,043	0,329
	0 + 020	<0>	<2>	0,78	0,812	1,474	1,037	0,675	↑	↓	0,034	0,406
	0 + 025	<0>	<2>	0,88	0,767	1,799	0,987	0,279	↑	↓	0,047	0,198
	0 + 030	<0>	<2>	0,79	0,410	-0,50	0,51	0,573	↑	↓	0,227	1,104
	0 + 035	<0>	<2>	0,82	0,754	-2,60	0,966	0,273	↑	↓	0,137	6,15
	0 + 040	<0>	<2>	0,76	0,73	-1,86	0,96	0,306	↑	↓	0,063	7,25
	0 + 048	<0>	<2>	0,71	0,82	-0,09	0,953	0,331	↑	↓	0,219	1,606

RT 1 – retificador de proteção catódica
RT 2 – retificador interferente

↑ corrente elétrica no sentido do retificador de proteção catódica
↓ corrente elétrica no sentido contrário ao do retificador de proteção catódica

Analisando-se os resultados mostrados na Tabela 5, verifica-se que o *SCM Sensor Bar* respondeu de maneira satisfatória nos testes realizados sem a interferência do segundo retificador (interferente) tanto do ponto de vista da profundidade de enterramento do duto quanto da intensidade e sentido da corrente elétrica circulante no duto. Com a imposição da interferência do segundo retificador, foram observados erros de leitura de profundidade do duto tanto na escolha da leitura do padrão chaveado <0> quanto do padrão <2>. No entanto, foi possível quantificar as correntes provindas do retificador de proteção catódica e interferente, bem como identificar o ponto de entrada da corrente pela análise do sentido da corrente circulante.

Estudo de correntes de interferências dinâmicas

O estudo envolvendo correntes de interferências dinâmicas foi o que apresentou maior complexidade. Tal complexidade se deu em função da dificuldade em simular, por exemplo, a interferência de corrente no duto enterrado provinda da passagem de um trem ou de algum outro sistema dinâmico. Para tal estudo foi elaborado o circuito elétrico mostrado na Figura 19. O RT 1 foi utilizado como retificador interferente e o RT 2 como retificador de proteção catódica.

Com o objetivo de simular correntes de interferência dinâmica no sistema, componentes como hastes de cobre, cupons de corrosão e anodos de magnésio foram instalados ao longo do site

(nos pontos de teste) para servirem como zonas de captação e descarga de corrente. Alguns componentes eram interligados e desinterligados ao sistema de maneira aleatória, sem padrão definido. Os componentes instalados nos pontos de teste são mostrados na Tabela 6.

Com a finalidade de mapear regiões do duto com entrada e saída de corrente, quatro *SCM Sensor Bar* foram instalados de maneira estratégica ao longo do site. A Figura 20 mostra a disposição dos *SCM Sensor Bar* ao longo do site. Em cada um destes *SCM Sensor Bar* foram feitos registros de corrente circulante por 4 h. A finalidade destes registros era mapear quaisquer variações de corrente que se tinha com a introdução ou retirada de um ou mais componentes instalados no sistema.

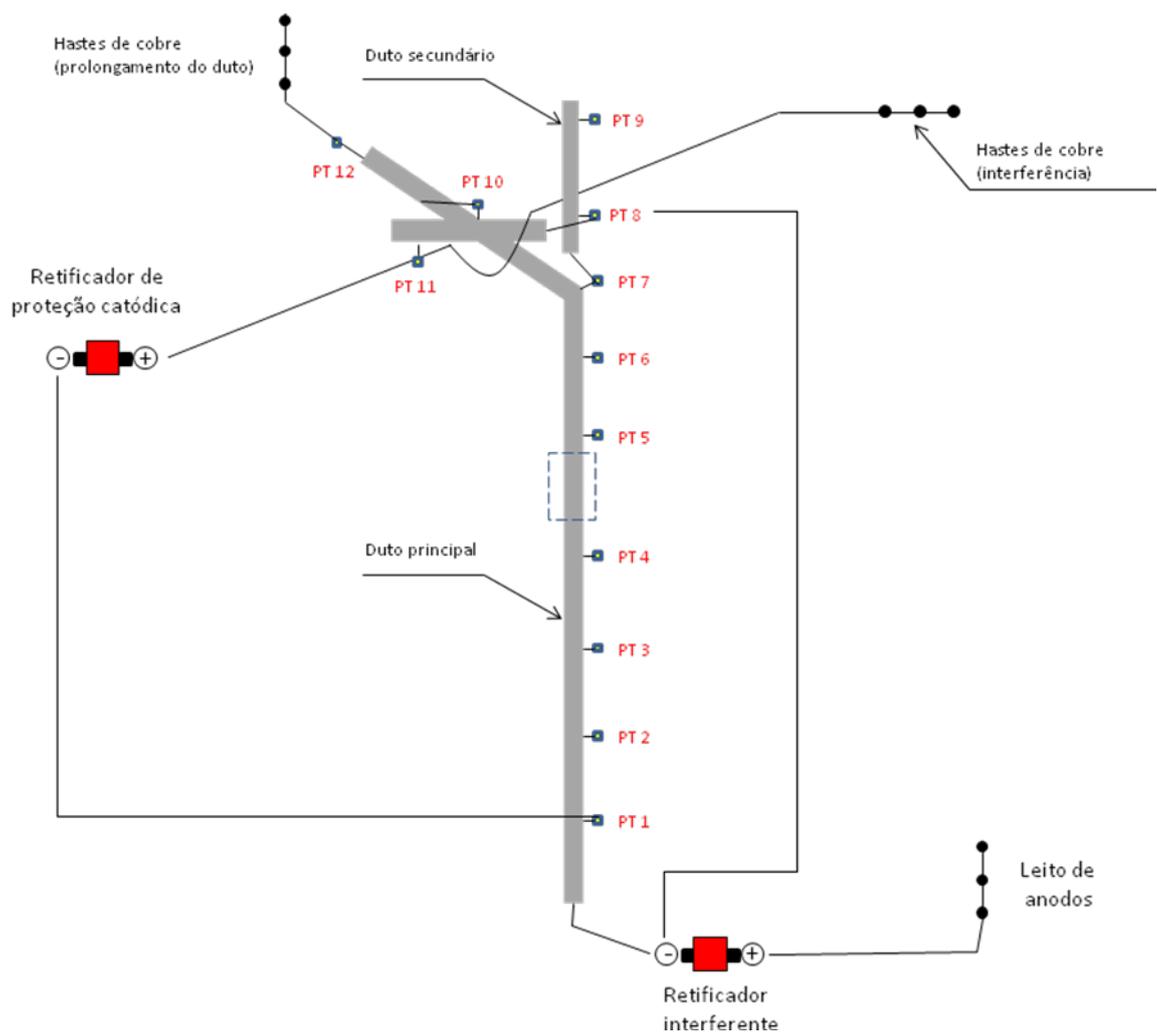


Figura 19 – Desenho esquemático do circuito elétrico utilizado nos estudos de correntes de interferência dinâmicas.

Tabela 6 – Componentes instalados no site a fim de simular interferências dinâmicas

Local de instalação	Componente
PT 1	Haste de cobre
PT 2	Cupom de corrosão
PT 3	Anodo de magnésio
PT 7 (entre duto principal e secundário)	Resistência elétrica/Hastes de cobre

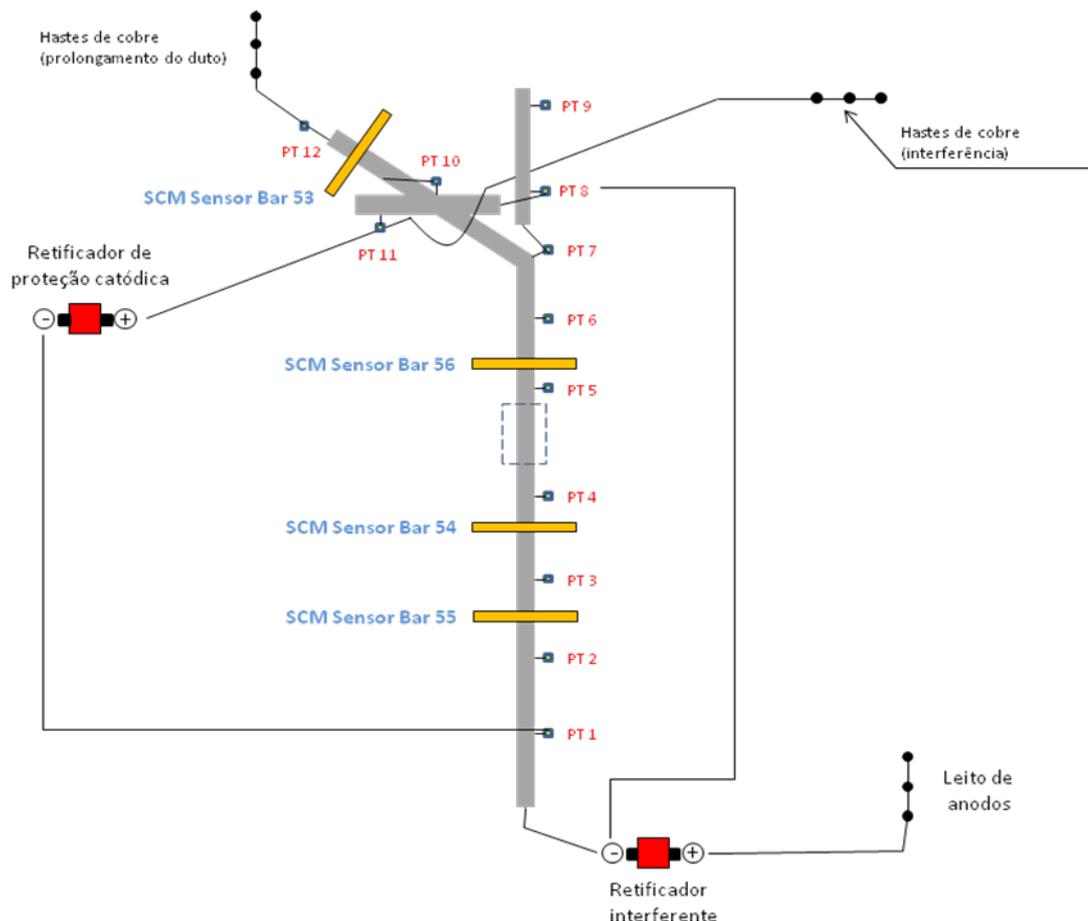


Figura 20 – Desenho esquemático da disposição dos quatro *SCM Sensor Bar* ao longo do site para os estudos de correntes de interferência dinâmicas.

A Tabela 7 mostra a sequência de eventos realizados como, por exemplo: introdução e retirada dos componentes instalados nos pontos de teste; injeção e chaveamentos das correntes dos retificadores de proteção catódica e interferente. Estes dados foram extremamente importantes para o completo entendimento dos fenômenos que estão ocorrendo no duto. As Figuras 21 e 22 mostram registros de corrente de alguns eventos realizados

utilizando os equipamentos *SCM Sensor Bar*, posicionados conforme desenho esquemático mostrado na Figura 20.

Tabela 7 – Sequência de eventos realizados como: introdução e retirada dos componentes instalados nos pontos de teste; injeção e chaveamentos das correntes dos retificadores de proteção catódica e interferente.

Evento	Evento realizado
1	Início dos testes
2	Ligou retificador de proteção catódica (0,6 A / 34 V)
3	Ligou o retificador interferente (3,1 A / 48 V)
4	Desligou retificador interferente e início do chaveamento deste retificador (dois ciclos <i>on</i> de 10 s e 1 ciclo <i>on</i> de 20 s)
5	Término do chaveamento do retificador interferente
6	Ligou o retificador interferente
7	Retirada da resistência elétrica de PT 7 e colocação de duas hastes de cobre
8	Desligou retificador interferente
9	Início do chaveamento deste retificador (dois ciclos <i>on</i> de 10 s e 1 ciclo <i>on</i> de 20 s) – 2,2 A / 48 V
10	Ligou retificador interferente
11	Desligou haste de cobre de PT 1
12	Desligou cupom de corrosão de PT 2
13	Desligou anodo de magnésio de PT 3
14	Desligou retificador interferente
15	Início do chaveamento do retificador interferente (dois ciclos <i>on</i> de 10 s e 1 ciclo <i>on</i> de 20 s) – 2,2 A / 48 V
16	Retificador interferente ligado. Substituiu as hastes de cobre por resistência em PT 7.
17	Desligou retificador interferente
18	Início do chaveamento do retificador interferente (dois ciclos <i>on</i> de 10 s e 1 ciclo <i>on</i> de 20 s) – 2,8 A / 47 V
19	Ligou retificador interferente
20	Desligamento do retificador interferente e o retificador de proteção catódica

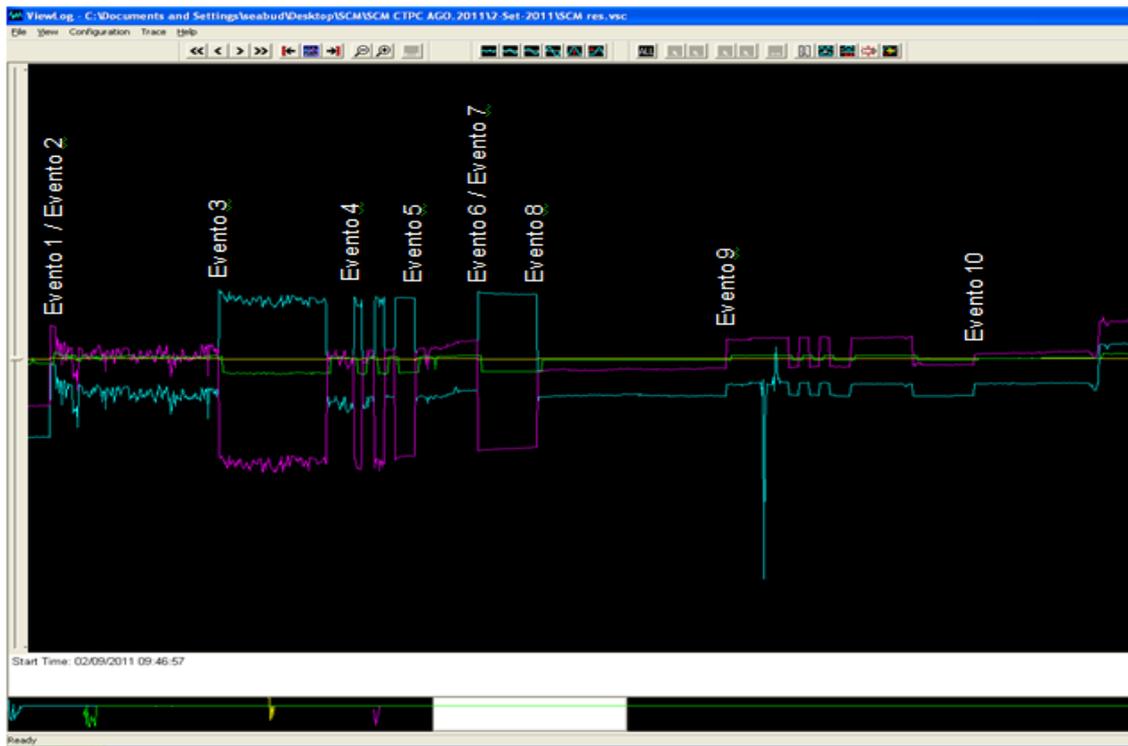


Figura 21 – Registros de corrente.

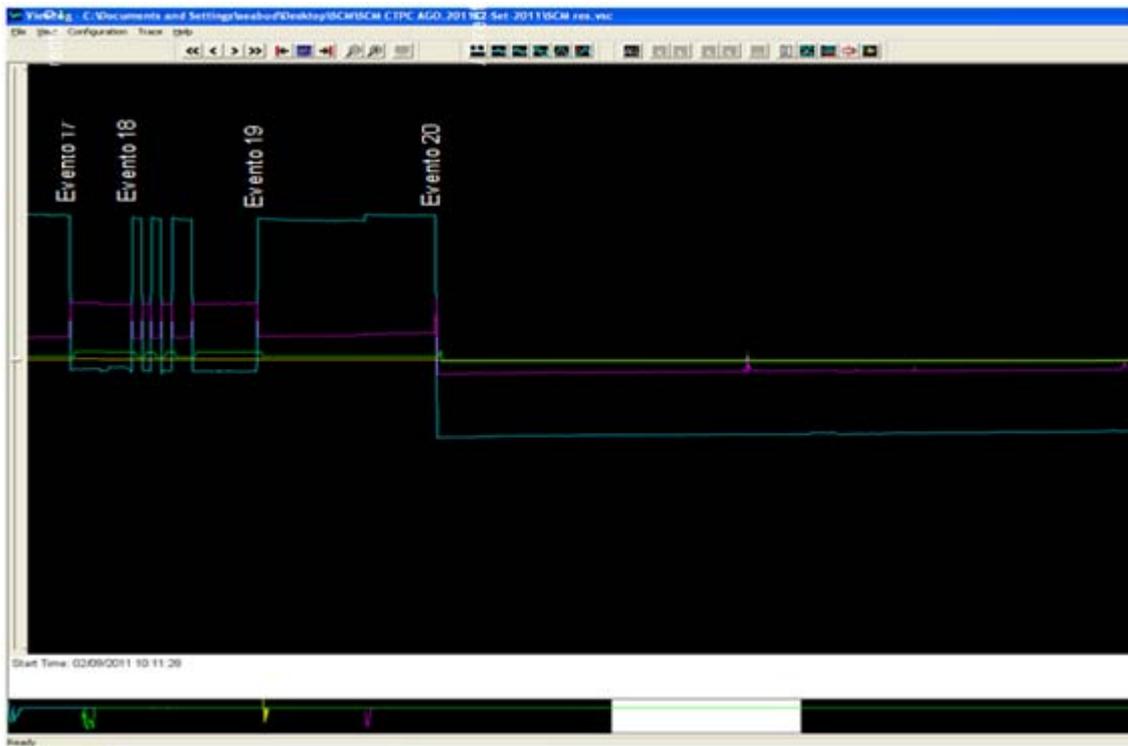


Figura 22 – Registros de corrente.

Conclusão

Os trabalhos desenvolvidos experimentalmente mostraram que a técnica *Stray Current Mapper* – SCM é capaz de identificar e quantificar as correntes de interferência e pode ser útil especialmente nos estudos com múltiplas interferências. Uma importante aplicação desta técnica parece ser a identificação de como cada fonte interfere isoladamente quando existem mais de uma fonte interferente atuando em uma estrutura, além de poder ser aplicada para avaliar a efetividade de sistemas de proteção catódica.

A técnica permite, com boa precisão, indicar as coordenadas xyz do duto, mesmo com baixo valor de corrente injetada pelo retificador. Deve-se ressaltar, porém que não foi avaliada qual é a profundidade máxima do duto que a técnica permite identificar com precisão. Observou-se também que, se as medidas forem realizadas com o sensor deslocado da posição real do duto, não há influência no valor de corrente medido.

Em casos de interferências de outras estruturas, é possível quantificar as correntes injetadas pelo retificador de proteção catódica e pelo sistema interferente, bem como identificar o sentido de cada uma delas, além do ponto de entrada da corrente. Neste caso, porém, poderá haver erro na indicação da profundidade do duto.

Diferentemente das técnicas convencionais, para identificar se uma estrutura está sob interferência, a SCM permite adicionalmente saber se a corrente injetada para proteger uma determinada estrutura está sendo dividida com outras estruturas mesmo que a estrutura de interesse esteja protegida.

Os resultados mostraram uma diferença importante entre o *Sensor Bar* e o *Smart Probe*. O *Sensor Bar* localiza e indica o posicionamento do duto, enquanto que, no caso do *Smart Probe*, a determinação exata do posicionamento do duto é uma condição imprescindível para se obter resultados confiáveis. Isto foi demonstrado pela inserção proposital de erros de profundidade e erros de *offset*.

Finalmente, não foi possível avaliar a eficácia desta técnica para identificar os efeitos de correntes alternadas.

Referências Bibliográficas

1. PARKER, G. W., WALTON, J. Non-contact stray current measurements in a multi-line, multi-crossing pipeline corridor. Nace Corrosion Conference 2007. Nashville, Tennessee, 2007.