Copyright 2008, ABRACO
Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2008, em Recife/PE, no mês de maio de 2008.
As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Estudo de corrosão por corrente alternada em dutos instalados em corredores com linhas de transmissão elétrica

Sérgio E. A. Filho[1], Zehbour Panossian[2], Neusvaldo L. de Almeida[3]
Mário L. Pereira Filho[4], Eduardo W. Laurino[5], João Hipólito de L. Oliver[6]
Gutemberg de S. Pimenta[7], José Álvaro de C. Albertini[8]

Abstract

Some cathodic protected pipelines installed along high voltage transmission lines have been presenting corrosion problems. The causes of this corrosion have been attributed to alternating current (AC) interferences coming from high voltage transmission lines and/or from electric supplying systems. There are several criteria adopted by literature to evaluate the probability of AC corrosion. However, these criteria are contradictory and inefficient, since failures due to AC corrosion have occurred in pipelines which presented electric and electrochemical parameters within the acceptable limits of those criteria. The present work has as an objective to suggest field measurement methodologies to evaluate the levels of AC interferences in pipelines, as well as establishing new criteria for assessment of the probability of AC corrosion occurrence in pipelines. Thus, field tests on a pipeline and on corrosion coupons using the proposed methodology were done and the obtained results are presented and discussed.

Key words: AC corrosion, AC current, cathodic protection

Resumo

Alguns dutos instalados em corredores com linhas de transmissão elétrica e submetidos à proteção catódica vêm apresentando problemas de corrosão, sendo esta corrosão atribuída à corrente AC oriunda de interferências de linhas de transmissão de alta tensão e/ou sistemas de distribuição de energia elétrica. São muitos os critérios adotados pela literatura para avaliar a probabilidade de corrosão por corrente AC e estes critérios são contraditórios e ineficientes, já que são observados casos de corrosão por corrente AC em dutos com os parâmetros elétricos e eletroquímicos dentro dos limites aceitáveis. O presente trabalho tem o objetivo de propor metodologias de medição para avaliar os níveis de tensão AC em dutos, bem como avaliar termodinamicamente a probabilidade de ocorrência de corrosão por corrente AC dos dutos. Serão mostrados resultados de medidas elétricas e eletroquímicas realizadas em campo e resultados de ensaios realizados utilizando cupons de corrosão.

[1] Químico, psquisador do Laboratório de Corrosão e Proteção do Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (e-mail: seabud@ipt.br)
[2] Doutora em Ciências, Professora convidada da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e responsável pelo Laboratório de Corrosão e Proteção do Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (e-mail: zep@ipt.br)
[3] Mestre em Engenharia, Pesquisador do Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (e-mail: neuval@ipt.br)
[4] Doutor em Engenharia, Responsável pelo Laboratório de Equipamentos Elétricos e Ópticos do Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (e-mail: mleite@ipt.br)
[5] Consultor Técnico, Petrobras Transporte/Transpetro (e-mail: laurino@petrobras.com.br)
[6] Consultor Técnico, Petrobras Transporte/Transpetro (e-mail: jolito@petrobras.com.br)
[7] Consultor Sênior, Petrobras/Cenpes (e-mail: gutembergsp@petrobras.com.br)
[8] Engenheiro de Automação, Petrobras/Transpetro (e-mail: alvaro.albertini@petrobras.com.br)

Palavras-chave: corrosão AC, corrente AC, proteção catódica**.**

1. Introdução

Devido ao aumento crescente de casos de corrosão provocados por corrente AC em dutos, muitos grupos de pesquisa estão em busca de explicações plausíveis para a corrosão por corrente AC e técnicas de medição estão sendo estudadas e desenvolvidas para detectar, quantificar e mitigar este tipo de corrosão. A partir de estudos de casos de falhas em campo e de experiências em laboratório, alguns critérios foram estabelecidos para serem usados como ferramenta para detecção e posterior mitigação da corrosão por corrente AC (1-3). Tais critérios tiveram como base medidas de densidade de corrente $\mathbf{J_{AC}}$ e/ou $\mathbf{J_{DC}}$, as quais são determinadas experimentalmente em cupons de corrosão instalados em campo, sendo o valor de $\mathbf{J_{AC}}$ também estimado com uma fórmula empírica, usando os valores de potencial eficaz AC e de resistividade do solo. Os critérios mais aceitos pelos autores e aqueles mais restritivos estão apresentados de maneira resumida na Tabela 1.

Nenhum dos critérios citados na literatura, incluindo os apresentados na Tabela 1, é considerado como sendo um critério seguro para a mitigação da corrosão por AC, uma vez são relatados, na literatura, inúmeros casos de falhas em campo em dutos cujas condições de operação satisfaziam os critérios estabelecidos (1, 4-6).

Fazendo uma análise crítica das informações encontradas na literatura consultada, verificou-se que os critérios estabelecidos têm como base parâmetros cinéticos (densidade de corrente) e não termodinâmicos, o que é uma incongruência visto que previsões de ocorrência ou não de qualquer evento devem ser feitas tendo como base a termodinâmica e não a cinética. Além disto, percebeu-se que todas as medidas realizadas referiam-se individualmente à corrente AC ($\mathbf{J_{AC}}$ ou $\mathbf{E_{AC}}$ eficaz) ou à corrente DC ($\mathbf{J_{DC}}$ ou $\mathbf{E_{DC}}$), não havendo nenhuma citação que considera o acoplamento da corrente AC com a corrente DC e a forma de onda resultante deste acoplamento, que em última análise é o responsável por qualquer processo eletroquímico que venha a ocorrer na interfase duto/solo. Havendo o acoplamento, o potencial a ser considerado é a soma do potencial AC com DC, em cada instante, e o critério para verificar se um determinado duto está ou não protegido catodicamente não pode ser feito com base no potencial tubo/solo DC, mas sim com base no potencial de pico da forma de onda do acoplamento AC + DC, o qual deve ser comparado com o potencial de equilíbrio de ferro (potencial de proteção catódica). Assim, neste estudo é proposto o seguinte critério: um duto sujeito às interferências de correntes AC estará protegido se, e somente se, o potencial de pico da forma de onda do potencial tubo/solo resultante do acoplamento AC+DC for mais negativo do que –0,85 V_{ECSC}[9].

Assim sendo, neste estudo, são propostas técnicas alternativas de medição em campo. São apresentados também os resultados de alguns ensaios em laboratório e os resultados de medições em campo e, com base nestes, apontados as melhorias que ainda devem ser introduzidas nas técnicas de medição propostas para então se aplicar de maneira segura o critério proposto para diagnosticar a corrosão por AC.

[9] As bases teóricas deste critério estão apresentadas o trabalho nº 106 deste Congresso.

2. Metodologia e resultados

2.1 Ensaios de laboratório: levantamento de curvas E_{DC} em função de J_{DC} para verificação qualitativa da influência da queda ôhmica e da imposição da corrente AC em meios de diferentes resistividades

Estes ensaios tiveram a finalidade de mostrar como varia o potencial de eletrodo $\mathbf{E_{DC}}$, medido em laboratório com um eletrodo de calomelano saturado, de cupons de corrosão imersos em meios de diferentes resistividades e submetidos a diferentes níveis de proteção catódica e interferência de corrente AC.

Os ensaios foram realizados com cupons cilíndricos de aço-carbono COPANT 1020, com cerca de 10 mm de altura e 12 mm de diâmetro, totalizando uma área de 4,8 cm^2. O cupom utilizado nos ensaios está mostrado na Figura 1a. Como contra-eletrodo utilizou-se uma barra cilíndrica de aço inoxidável ABNT 316, com cerca de 60 mm de altura e 17 mm de diâmetro, totalizando uma área de cerca de 35 cm^2, como mostrado na Figura 1b. As medidas de potencial foram realizadas com o auxílio de um eletrodo de referência de calomelano saturado (ECS).

Os ensaios foram conduzidos em uma cuba de vidro com capacidade de 2 L, provido de uma tampa, também de vidro, com aberturas para a inserção dos eletrodos (ver Figura 2). Para imposição da corrente AC, utilizou-se uma fonte de tensão alternada 3 kVA AC da Califórnia Instruments modelo 3001Xi (ver Figura 3).

A Figura 4 mostra os valores do potencial $\mathbf{E_{DC}}$ em função da densidade de corrente $\mathbf{J_{DC}}$ em soluções com resistividades iguais a 5000 Ω.cm, 10000 Ω.cm e 65000 Ω.cm. Estas curvas nada mais são do que as curvas de polarização do aço-carbono no meio considerado: o ramo anódico representa a reação de corrosão do aço-carbono e o ramo catódico representa a reação de redução do hidrogênio, visto que a reação de redução de oxigênio, nestas condições, é desprezível. A diferença entre as curvas deve-se exclusivamente à queda ôhmica, que é maior quanto maior a resistividade do meio. Observando tais curvas, verifica-se que, mesmo nas condições de laboratório, nas quais é possível a aproximação do eletrodo de referência ao cupom de corrosão, a queda ôhmica exerce uma influência significativa, especialmente em soluções que representam solos de alta resistividade.

A Figura 5 mostra as variações do potencial de eletrodo para o cupom imerso num meio de resistividade de 5000 Ω.cm em função corrente DC, sob a influência de corrente AC. As medidas de potencial foram realizadas aplicando-se densidades de corrente DC variando de -10 000 mA/m^2 a 10 000 mA/m^2, em diferentes densidades de corrente AC.

Na ausência de corrente AC, a curva preta da Figura 5 é a própria curva de polarização do aço-carbono no meio estudado (já apresentada na Figura 4). Com a aplicação da corrente AC com intensidades de 50 A/m^2, 100 A/m^2, 147 A/m^2 e 200 A/m^2, os seguintes fatos são observados:

- formato das curvas semelhante ao da curva de polarização do aço-carbono;
- despolarização no ramo catódico, sendo esta despolarização tanto maior quanto maior a densidade de corrente AC;
- despolarização no ramo anódico para as correntes com intensidades de 50 A/m^2, 100 A/m^2, 147 A/m^2, sendo que a despolarização aumenta quando a corrente AC é aumentada de 50 A/m^2 para 100 A/m^2. Já quando se aumenta a corrente AC para 147 A/m^2, a curva aproxima-se da curva de polarização do aço-carbono (a despolarização passa a ser menos acentuada). Para a corrente AC de 200 A/m^2, é verificada uma polarização do ramo anódico;

- aumento do potencial correspondente à corrente $\mathbf{J_{DC}}$ igual a zero, potencial este que na ausência de corrente AC é o potencial de corrosão do sistema.

Pelo exposto, pode-se observar que a imposição de corrente AC causa mudanças significativas nas curvas $\mathbf{E_{DC}}$ em função de $\mathbf{J_{DC}}$. Quanto à previsão termodinâmica de ocorrência ou não de corrosão, nada pode ser extraído pelo gráfico apresentado na Figura 5, visto que os valores de potencial locados no eixo das ordenadas são o potencial $\mathbf{E_{DC}}$, sendo que a previsão termodinâmica deve levar em consideração a forma de onda e verificar quando o potencial de pico da forma de onda do acoplamento dos potenciais AC+DC assume valores acima do potencial de equilíbrio do ferro.

As medidas também foram realizadas em meios com resistividade de 10000 Ω.cm e 65000 Ω.cm, como mostrado nas Figuras 6 e 7, respectivamente. Observando tais Figuras, pode-se verificar que o aumento da resistividade causa distorções mais acentuadas do que aquelas observadas na Figura 5, visto que a queda ôhmica é aumentada não só pelo aumento da resistividade como pelo aumento da corrente total circulante com a imposição da corrente AC. Isto indica que qualquer critério, que for sugerido para verificar a condição termodinâmica de ocorrência ou não da corrosão do aço pela influência de corrente AC, deverá levar em consideração a queda ôhmica.

Na prática, as medidas para compensar a queda ôhmica em sistemas que operam com corrente DC já são realizadas (potencial on/off), consistindo de instalação de cupons de corrosão com cerca de 1 cm^2 de área enterrado e conectado ao duto por meio do ponto de teste. O eletrodo de referência, instalado nas proximidades do cupom de corrosão, irá medir o potencial imediatamente após a desinterligação do cupom do duto. No entanto, este procedimento é feito quando somente há a corrente de proteção catódica e não há interferências externas de corrente DC e AC.

2.2 Ensaios de campo

Os ensaios de campo consistiram da avaliação da interferência de corrente AC em um duto da Petrobrás, OBATI em São Paulo, e instalação de cupons de corrosão em pontos selecionados do referido duto. A verificação da interferência ou não de corrente alternada foi feita usando alguns dos critérios citados na literatura, os quais foram apresentados na Tabela 1 e, também, o critério proposto neste estudo, baseado no potencial de pico da forma de onda do potencial tubo/solo resultante do acoplamento dos potenciais AC+DC. Para isto, foram realizadas as medidas tradicionais tanto nos cupons como no duto em estudo. Além destas medidas, técnicas alternativas de medição foram propostas e adotadas.

A seguir, primeiramente é apresentada a proposição das técnicas alternativas, a metodologia adotada para a realização das medidas, breve descrição do duto em estudo, os critérios adotados para a escolha dos locais de instalação dos cupons de corrosão, a metodologia referente ao preparo e instalação dos cupons e os resultados obtidos.

2.2.1 Proposição de medidas alternativas para serem realizadas em campo

Em um circuito de corrente AC, o potencial elétrico $\mathbf{E_{AC}(t)}$ e a sua resposta elétrica $\mathbf{I_{AC}(t)}$ variam com o tempo segundo a eq.(1) e a eq.(2):

$$E_{AC}(t) = E_o.\cos(2.\pi.f.t) \quad \textbf{(1)}$$

$$I_{AC}(t) = I_o.\mathrm{sen}(2.\pi.f.t + \phi_o) \quad \textbf{(2)}$$

onde:

E_o e I_o = amplitude do potencial elétrico AC e da corrente elétrica AC

f = freqüência do potencial elétrico AC

t = tempo

ϕ_o = defasagem da corrente em relação ao potencial elétrico

O potencial elétrico medido, geralmente com um multímetro, é o potencial eficaz ou potencial médio quadrático RMS. Para ondas puramente senoidais, o potencial eficaz segue uma relação com a amplitude do potencial elétrico de acordo com a eq.(3):

$$E_{AC} = \frac{E_o}{\sqrt{2}} \quad \textbf{(3)}$$

A corrente AC medida, geralmente com um multímetro, é a corrente eficaz (**I_{AC}**). Esta corrente também segue uma relação com a amplitude da corrente AC (**I_o**) conforme indicado na eq.(4).

$$I_{AC} = \frac{I_o}{\sqrt{2}} \quad \textbf{(4)}$$

Alguns dos parâmetros elétricos bastante utilizados em resultados práticos de laboratório e de campo são os potenciais medidos corriqueiramente com um multímetro: potencial e corrente DC (**E_{DC}** e **I_{DC}**), potencial e corrente eficaz AC (**E_{AC}** e **I_{AC}**) e potencial eficaz AC+DC (**E_{AC+DC}**). O **E_{DC}** é um valor médio obtido devido à componente DC e calculado segundo a eq.(5); o **E_{AC}** é o potencial eficaz, sendo obtido considerando apenas a componente AC e, para ondas puramente senoidais, pode ser calculado segundo a eq.(6); o **E_{AC+DC}**, também eficaz, é obtido considerando o acoplamento das componentes AC e DC e calculado segundo a eq.(7).

$$E_{DC} = \frac{1}{T}\int_0^T E(t)dt \quad \textbf{(5)}$$

$$E_{AC} = \frac{1}{T}\sqrt{\int_0^T (E(t) - E_{DC})^2 dt} \quad \textbf{(6)}$$

$$E_{AC+DC} = \frac{1}{T}\sqrt{\int_0^T (E(t))^2 dt} \quad \textbf{(7)}$$

onde:

E(t) = potencial elétrico em função do tempo

T = período

Outro conceito bastante importante é o de resistência elétrica. O valor da resistência elétrica de um defeito de revestimento depende da forma deste defeito e do meio onde a corrente se dispersa.

Para um duto metálico sem revestimento de comprimento L, de diâmetro externo D, enterrado a uma profundidade P e num solo de resistividade ρ, o valor da resistência elétrica (**R**) da região onde a corrente se dispersa é dado pela eq.(8):

$$R = \frac{\rho}{\pi.L}\left(\ln\left(\frac{2.L}{\sqrt{2.D.P}}\right) - 1\right) \quad \textbf{(8)}$$

onde:

R = resistência de dispersão de um duto não-revestido

Já para um duto enterrado revestido, com diâmetro do duto muito maior que o diâmetro do defeito, em solo de resistividade ρ, a resistência elétrica deste defeito pode ser ilustrada na Figura 8 e calculada segundo a eq.(9). Está é a chamada $\mathbf{R_S}$, ou resistência de dispersão (*spread resistance*):

$$R_S = \frac{\rho}{2.d} \quad \textbf{(9)}$$

onde:

R_S = resistência de dispersão de um defeito num duto revestido

d = diâmetro do defeito

No caso de um defeito de diâmetro **d**, pode-se calcular a densidade de corrente eficaz AC ($\mathbf{J_{AC}}$) que passará por este defeito aplicando-se a 1ª Lei de Ohm, de acordo com a eq.(10) e eq.(11):

$$I_{AC} = \frac{E_{AC}}{R_S} = \frac{E_{AC}}{\frac{\rho}{2.d}} = \frac{2.d.E_{AC}}{\rho} \quad \textbf{(10)}$$

$$J_{AC} = \frac{I_{AC}}{A_{defeito}} = \frac{\frac{2.d.E_{AC}}{\rho}}{\frac{\pi.d^2}{4}} = \frac{2.d.E_{AC}}{\rho}.\frac{4}{\pi.d^2} \quad \textbf{(11)}$$

$$J_{AC} = \frac{8.E_{AC}}{\rho.\pi.d} \quad \textbf{(12)}$$

onde:

$A_{defeito}$ = área do defeito

Assim, pode-se calcular a densidade de corrente eficaz AC ($\mathbf{J_{AC}}$) que passará por um defeito de diâmetro **d** aplicando-se a eq.(12). Esta equação é amplamente utilizada pelos profissionais que estudam corrosão por corrente AC (1,6,8). Além desta metodologia, na prática, o $\mathbf{J_{AC}}$ pode ser medido em cupons de corrosão com cerca de 1 cm^2 de área e

conectado ao duto por meio do ponto de teste, com o uso de alicate amperímetro. Finalmente, a corrente $\mathbf{J_{AC}}$ nos dutos pode-se ser medido usando uma pinça de corrente flexível.

Além das grandezas elétricas mencionadas, uma das medidas de grande importância para avaliar os níveis de interferência AC nos dutos é a medida da forma de onda do potencial tubo/solo, ou potencial instantâneo, e a outra é a medida de corrente AC que atravessa a interfase tubo/solo, ou corrente instantânea, as quais podem ser obtidas com auxílio de um osciloscópio. Estas medidas fornecem informações da variação do potencial ou da corrente em um período da ordem de milisegundos (ms). No caso de um retificador de proteção catódica, o potencial é medido nos retificadores e obtém-se a forma de onda do potencial na saída do retificador no domínio do tempo, como mostrado na Figura 9.

Na medida da forma de onda do potencial tubo/solo, além das informações tradicionais como $\mathbf{E_{DC}}$, $\mathbf{E_{AC}}$ eficaz e $\mathbf{E_{AC+DC}}$ eficaz, é possível obter a informação do potencial de pico $\mathbf{E_{pico}}$, mostrado na Figura 10.

Obtida a forma de onda do potencial com o osciloscópio, é possível analisar o conteúdo harmônico desta forma de onda. O conteúdo harmônico mostra-se uma ferramenta eficaz para mapear as possíveis fontes de interferência em uma faixa de dutos, seja de uma linha de transmissão de alta tensão, seja de um sistema de distribuição de energia elétrica, ou do próprio sistema de proteção catódica. Quando a forma de onda do potencial é vista no domínio da freqüência nota-se a assinatura típica de cada circuito.

A forma de onda do potencial característica de saída do retificador de proteção catódica é uma onda pulsada de freqüência 120 Hz, na qual o período de cada ciclo é igual aproximadamente 8 ms. Nos retificadores, há uma componente DC correspondente a 100% e harmônicas pares (120 Hz, 240 Hz, 360 Hz) com amplitude caindo rapidamente, conforme mostrado na Figura 11.

As linhas de transmissão de alta tensão, como geralmente operam em sistema trifásico, apresentam os primários dos transformadores rebaixadores com ligação delta. Neste caso, a somatória das correntes é nula e não pode haver circulação de corrente de seqüência zero, ou seja, aquelas múltiplas de três. Portanto, não é esperado componente 180 Hz (terceira harmônica) na forma de onda de potencial tubo/solo induzida por um sistema de transmissão de alta tensão. A Figura 12 mostra a forma de onda das correntes trifásicas de uma linha de transmissão de alta tensão.

Pela análise das correntes trifásicas circulantes em uma linha de transmissão de alta tensão, mostradas na Figura 12, verifica-se que a somatória das correntes é igual a zero. Por exemplo, a somatória das correntes neste sistema trifásico para o tempo igual a 0,01 s é dada por:

$$I_{TOTAL}\ (A) = 1{,}4 + (-\ 0{,}7) + (-\ 0{,}7)$$

$$I_{TOTAL}\ (A) = 0$$

O fato da somatória das correntes trifásicas ser igual a zero explica não haver circulação de corrente de seqüência zero, ou seja, harmônicas múltiplas de três.

Face ao exposto, neste estudo, além das medidas tradicionais realizadas em campo, foram introduzidas novas medidas, a saber:

- medidas de potencial tubo/solo E_{DC} *on* em relação ao eletrodo de $Cu/CuSO_4$ (medida normalmente realizada pelos profissionais dedicados à proteção catódica);
- medidas de potencial AC eficaz E_{AC} (medida amplamente utilizada quando há suspeita de corrosão por AC);

- medida de potencial AC + DC, da forma de onda DC + AC, potencial de pico da forma de onda DC + AC (E_{pico}) e a análise espectral de harmônicos (medidas não consideradas na literatura);
- medida de corrente AC nos cupons de corrosão (medidas já recomendadas na literatura);
- medida de corrente AC em dutos (medida não considerada na literatura).

Cabe mencionar que não foi desenvolvido nenhum equipamento novo, apenas foram introduzidas técnicas de medição já conhecidas, porém, não usadas pelos profissionais da área de proteção catódica.

2.2.2 Metodologia para realização das medidas em campo

Para a obtenção da forma de onda do potencial duto/solo e cupom/solo, foi utilizado um osciloscópio digital ScopeMeter da Fluke mod. 123 (ver Figura 13). Para tal, um dos terminais do osciloscópio foi conectado ao duto ou ao cupom, por meio do ponto de teste (ver Figura 14) e o outro terminal ao eletrodo de referência de cobre/sulfato de cobre, o qual era enterrado dentro do tubo de PVC instalado sobre os dutos e sobre os cupons de corrosão.

Além da forma de onda do potencial, com osciloscópio digital é possível obter o conjunto de medidas $\mathbf{E_{DC}}$, $\mathbf{E_{AC}}$, $\mathbf{E_{AC+DC}}$ e $\mathbf{E_{pico}}$. Utilizando-se um *software* do próprio equipamento, ainda, é possível analisar o conteúdo harmônico da forma de onda do potencial e mapear as possíveis fontes de interferências de corrente AC nos dutos.

Para avaliar a probabilidade de corrosão por corrente AC de um duto, muitas vezes, opta-se pela instalação de cupons de corrosão e nestes são feitas, entre outras, medidas de potencial tubo/solo DC, AC e AC+DC e corrente elétrica.

Para a realização da medida de corrente AC nos cupons de corrosão foi utilizado um alicate amperímetro da LEM mod. LK 60, mostrado na Figura 15. O alicate amperímetro é utilizado para medir correntes AC da ordem de miliamperes e/ou Amperes.

As medidas de corrente AC circulantes nos dutos foram realizadas utilizando um pinça de corrente flexível de 508 mm de diâmetro (20”) e transdutor de sinal (5 mV/A) da Globalmag mod. TCFlex-500/50 (ver Figura 16). Estas medidas foram auxiliadas pelo osciloscópio digital mostrado na Figura 13.

A Figura 17 mostra a medida de corrente AC nos dutos utilizando-se a pinça de corrente flexível, transdutor de sinal e osciloscópio de mão.

Neste trabalho, optou-se por instalar cupons de corrosão em alguns trechos do OBATI, em São Paulo, na qual os dutos estavam sujeitos a fortes interferências tanto de linhas de transmissão de alta tensão quanto de distribuição de energia elétrica dos grandes centros urbanos.

Nestes locais, os cupons foram instalados e nestes foram realizadas uma série de medidas elétricas e eletroquímicas, além da análise visual com registros fotográficos e determinação das taxas de corrosão.

Será apresentada toda a metodologia empregada para a seleção dos locais de instalação dos cupons de corrosão, a concepção e a instalação destes cupons e a metodologia empregada nas medições.

2.2.3 Descrição do duto inspecionado e critérios para seleção do local de inspeção do duto e instalação dos cupons de corrosão

O OBATI, duto inspecionado da Petrobras, possui cerca de 50 km de extensão, inicia-se em Barueri e prolonga-se até São Caetano do Sul. É constituído de dois dutos, nomeados de

Claros com diâmetro de 355,6 mm (14”) e Escuros com diâmetro de 355,6 mm (14”), revestidos com Coal-tar e espuma de poliuretana respectivamente e é provido de dez retificadores, duas drenagens elétricas e dez caixas de válvulas. Em maior parte da sua trajetória, os dutos encontram-se paralelos ao sistema de transmissão de alta tensão de 235 kV e, em algumas localidades, situam-se nas proximidades de subestação de energia elétrica (Subestação Xavantes) e apresentam forte interferência urbana de sistemas de distribuição de energia elétrica de 13,8 kV. A região de instalação destes dutos apresenta solos de baixa resistividade.

Os seguintes critérios foram utilizados para a seleção dos locais de inspeção e instalação dos cupons:

- proximidade dos grandes centros urbanos;
- proximidade de subestação de energia elétrica (subestação Xavantes);
- paralelismo com a linha de transmissão de alta tensão;
- perfil do registro de potencial DC tubo/solo ($\mathbf{E_{DC}}$) em função do tempo.

Dentre os parâmetros citados, aquele de maior relevância foi o registro de potencial tubo-solo ($\mathbf{E_{DC}}$) em função do tempo. Isto porque, tais variações apresentam uma correlação com as interferências de corrente nos dutos: pontos de mínimo indicam saída de corrente do duto e pontos de máximo indicam entrada de corrente neste duto. Disto decorre que:

- se a diferença entre os potenciais $\mathbf{E_{DC}}$ máximos e mínimos for grande, então os níveis de interferência de correntes nos dutos são elevados;
- se a diferença entre os potenciais $\mathbf{E_{DC}}$ máximos e mínimos for pequena, então os dutos estão com baixos níveis de interferência de correntes.

As Figuras 18, 19 e 20 mostram os registros de potencial tubo/solo DC ($\mathbf{E_{DC}}$) realizados em algumas regiões do OBATI e a Tabela 2 mostra os valores de potencial tubo/solo $\mathbf{E_{DC}}$ máximos, médios e mínimos verificados nos registros de potencial mostrados nas referidas figuras bem como as diferenças entre os potenciais máximos e mínimos para cada um dos registros.

Pelos resultados mostrados na Tabela 2, pode-se verificar regiões (destacadas em vermelho) em que os dutos do OBATI apresentam altos níveis de interferência de corrente e regiões que apresentam baixos níveis de interferência de corrente. Alguns dos locais com maiores níveis de interferência foram selecionados para a inspeção do duto e para instalação de cupons de corrosão.

Assim, como as caixas de válvula V 05-03, V 05-04 e V 05-05 apresentaram maiores níveis de interferência, somente estas caixas de válvula foram selecionadas para instalação dos cupons de corrosão.

Os cupons instalados em campo foram desenvolvidos tendo como base o padrão do dispositivo de corrosão da NACE, o qual está mostrado na Figura 21. Conforme verificado nesta Figura, o dispositivo de corrosão padrão NACE é composto por dois cupons encamisados por um tubo de PVC. Os cupons foram instalados próximos ao duto e interligados a ele por meio do ponto de teste. O tubo de PVC foi preenchido com solo do próprio local e o potencial tubo/solo foi medido com auxílio de dois eletrodos de referência: o permanente e o portátil, ambos de $Cu/CuSO_4$. O eletrodo de referência permanente foi instalado bem próximo ao cupom para minimizar o efeito da queda ôhmica nas medidas de potencial e permanecem instalados no local por um longo tempo; o eletrodo de referência portátil foi utilizado nas medições periódicas e foi retirado após cada uma das medidas. Assim, pôde-se estabelecer um critério comparativo entre as medidas de potencial tubo/solo realizadas com o eletrodo de referência portátil e as medidas realizadas como eletrodo de referência permanente.

Os cupons utilizados no presente estudo foram confeccionados em aço-carbono COPANT 1020, com geometria cilíndrica com cerca de 12 mm de diâmetro, 1 mm de altura, o que corresponde a uma área aproximada de 1,5 cm^2. Estes cupons eram fixados em um dispositivo de polipropileno, sendo o contato elétrico feito por meio de fio elétrico, conforme mostrado na Figura 22.

Para a instalação dos dispositivos de polipropileno já com os cupons em campo foram abertas valas com cerca 1,5 m de profundidade e 20 cm de diâmetro. A Figura 23 mostra a vala aberta, bem como o dispositivo alocado dentro desta vala. Cabe esclarecer, que a profundidade de 1,5 m foi adotada devido ao fato dos dutos estarem enterrados a esta profundidade.

Sobre os cupons de corrosão foram colocados tubos de PVC de 10 cm de diâmetro (4”) e o fio elétrico que fazia contato com o cupom foi posicionado de modo a passar pelo interior deste tubo. Em seguida o tubo foi preenchido com o solo do local e finalmente foi colocada uma tampa. O objetivo da colocação do tubo de PVC era melhorar a reprodutibilidade das medidas de potencial tubo/solo ao longo do tempo. A Figura 24 mostra o aspecto de um tubo já tampado. Cada um dos cupons foi interligado aos dutos por meio dos pontos de teste, utilizando fio elétrico, conforme mostrado na Figura 25. Este tipo de montagem foi realizado para demarcar o local exato de instalação dos cupons e para padronizar as medidas em campo. Assim, as medidas de campo poderiam ser realizadas sempre no mesmo local permitindo a comparação entre medidas realizadas em períodos diferentes. Para garantir ainda mais a reprodutibilidade, antes das medidas, a tampa do tubo de PVC era retirado e o solo presente no interior do tubo era umedecido até a saturação com água destilada. Em seguida o eletrodo de referência era inserido no solo saturado e as medidas necessárias eram então realizadas. Esta montagem facilitava a retirada dos cupons, quando necessário, uma vez que esta operação era realizada de maneira a retirar todo o conjunto: tubo de PVC e dispositivo de polipropileno. A Figura 26 mostra o aspecto de um conjunto recém-retitado.

No OBATI, a instalação dos cupons de corrosão foi realizada da seguinte maneira (ver Figura 27):

- foram instalados cinco cupons em cada uma das caixas de válvula selecionadas;
- dos cinco cupons, três foram interligados ao ponto de teste e dois foram apenas enterrados e mantidos sem interligação aos dutos. Os cupons sem interligação tinham a função de avaliar o grau de corrosividade do solo e foram chamados de brancos;
- os cupons foram instalados eqüidistantes dos dutos Claros e Escuros a uma distância de 1 m de cada um dos dutos, já que a distância entre dutos era de 2 metros.

Para a realização das medidas nos dutos, o mesmo arranjo experimental foi feito nos trechos dos dutos situados nas vizinhanças do local de instalação dos cupons, a saber:

- abertura de valas na parte superior dos dutos;
- instalação de tubos de PVC com 10 cm de diâmetro;
- preenchimento do interior do duto com o solo do local;
- colocação de uma tampa.

O período de permanência dos cupons instalados em campo foi de três meses e, dentro deste intervalo de tempo, foram realizadas medidas periódicas para acompanhar os níveis de interferência AC nos cupons e nos dutos.

3. Resultados

As medidas de potencial tuto/solo tiveram a finalidade de avaliar os níveis de proteção catódica e os níveis de interferência AC tanto nos dutos como nos cupons interligados aos dutos. Conforme mencionado, foram selecionados três caixas de válvulas do OBATI para a

condução do estudo. Antes de apresentar os resultados obtidos em campo, será apresentado um exemplo de medidas obtidas em campo, os quais serão discutidos. Acredita-se que isto facilitará a compreensão e a discussão das medidas de campo.

A Figura 28 mostra um exemplo típico de medida de forma de onda de potencial duto/solo realizada em campo. Para facilitar a análise, foi traçada uma linha horizontal indicando o potencial de equilíbrio do ferro (-0,85 V_{ECSC}). Potencias abaixo deste valor indicam que o duto ou o cupom estará no domínio da imunidade, portanto catodicamente protegidos. Para potenciais acima deste valor, o duto ou o cupom estariam termodinamicamente favoráveis à corrosão por corrente AC. Para facilitar a visualização, o domínio da corrosão foi destacado em azul. Convém salientar, que os valores de potencial medidos em campo representam o potencial da interfase duto/solo e cupom/solo acrescido do valor da queda ôhmica, não-compensada. Para uma análise mais real, as medidas deveriam ser corrigidas. Estudos estão sendo conduzidos em laboratório para o desenvolvimento de técnicas de medição com compensação da queda ôhmica em sistemas sujeitos à corrente AC. De qualquer maneira, as medidas apresentadas e discutidas neste trabalho serão utilizadas para uma avaliação qualitativa da existência ou não de interferência de corrente AC no duto estudado. A previsão termodinâmica para ver se os níveis de interferência causarão ou não corrosão deverá ser realizada comparando o potencial da interfase duto/solo sem a contribuição da queda ôhmica com o potencial de equilíbrio do ferro.

As Figuras 29, 30 e 31 mostram as formas de onda do potencial tubo/solo de medidas realizadas nas caixas de válvula V 05-03, V 05-04 e V 05-05, respectivamente. Paralelamente são mostrados os conteúdos harmônicos de cada uma das formas de onda. Para facilitar a discussão é apresentada a Tabela 3, que mostra a relação entre o conteúdo harmônico e a fonte de interferência AC, e a Tabela 4 que mostra todos os parâmetros elétricos envolvidos nas medidas de potencial duto/solo e cupom/solo.

A análise espectral da medida da forma de onda do potencial tubo/solo realizada na caixa de válvula V 05-03, mostrada ns Figura 29, indica claramente a ocorrência de interferência dos sistema de distribuição de energia elétrica devido a elevada componente 180 Hz; já na caixa de válvula V 05-04 (Figura 30) verifica-se uma forte influência de linhas de transmissão de alta tensão pela elevada componente 60 Hz e baixa componente 180 Hz; na caixa de válvula V 05-05 (Figura 31) são verificadas interferências tanto de linhas de transmissão de alta tensão como de sistemas de distribuição de energia elétrica.

Quanto aos valores de potenciais tubo/solo do acoplamento AC+DC verifica-se nas Figuras 29, 30 e 31 que os perfis das formas de onda em cada uma das caixas de válvula foram bastante distintos.

Parte da forma de onda do potencial encontra-se acima do potencial de equilíbrio do ferro (-0,85 V_{ECSC}) o que indica que os dutos estariam termodinamicamente sujeitos a corrosão AC. Vale ressaltar que não houve correção da queda ôhmica nas medidas de potencial tubo/solo.

Analisando os resultados mostrados na Tabela 4 pode-se verificar que tanto os dutos quanto os cupons encontravam-se protegidos catodicamente, visto que os valores de $\mathbf{E_{DC}}$ são mais negativos do que –0,85 V_{ECSC}. No entanto, os valores de $\mathbf{E_{pico}}$ encontram-se acima do potencial de equilíbrio do ferro e, desta forma, tanto os dutos quanto os cupons estavam termodinamicamente favoráveis à corrosão AC, em maior ou menor grau, salvo a questão da queda ôhmica, fato já observado nas Figuras 29, 30 e 31. Como os valores dos potenciais de pico ($\mathbf{E_{pico}}$) das medidas realizadas na caixa de válvula V 05-04 foram os maiores encontrados, eles foram destacados em vermelho. Os valores de potencial de pico das medidas realizadas na caixa de válvula V 05-03 foram destacados em verde devido aos baixos valores encontrados e, para a caixa de válvula V 05-05, os valores foram destacados em amarelo

devido aos valores intermediários entre as caixas de válvula V 05-03 e V 05-04. Estes resultados apontam altos níveis de interferência AC para os cupons e dutos da caixa de válvula V 05-04; médios níveis de interferência AC para os da caixa de válvula V 05-05 e baixos níveis de interferência AC para os da caixa de válvula V 05-03.

As Tabelas 5, 6 e 7 mostram os aspectos dos corpos-de-prova bem como as taxas de corrosão obtidas após três meses de exposição às interferências de corrente AC. Em cada Tabela são mostrados também os resultados obtidos com os corpos-de-prova brancos, os quais ficaram enterrados pelo mesmo período dos demais, não interligados aos dutos, portanto sem a interferência de correntes AC e sem proteção catódica.

Observando as referidas tabelas, verifica-se que todos os cupons apresentaram corrosão em maior ou menor grau, a despeito de estarem catodicamente protegidos, visto que estavam com um potencial E_{DC} mais negativos do que –0,85 V_{ECSC}. Além disto, verificou-se uma certa correlação da taxa de corrosão e os níveis de interferências AC: maiores taxas de corrosão foram observadas para valores de E_{pico} mais elevados (CP 01, CP 02 e CP 03 instalados na caixa de válvula V 05-04). Cabe ressaltar que o CP 13 instalados na caixa de válvula V 05-03 representa exceção a esta tendência, visto que apresentou uma taxa de corrosão comparável às taxas de corrosão dos cupons instalados na caixa de válvula V 05-05, mesmo sujeita à menor interferência de corrente AC.

A Tabela 8 relaciona todos os resultados das medidas elétricas realizadas nos cupons e as taxas de corrosão dos mesmos. As taxas de corrosão obtidas nos cupons podem ser relacionados com os seguintes parâmetros elétricos: potencial de pico da forma de onda do potencial tubo/solo ($\mathbf{E_{pico}}$), densidade de corrente AC ($\mathbf{J_{AC}}$) e razão densidade de corrente AC e DC ($\mathbf{J_{AC}/J_{DC}}$). A medida do $\mathbf{E_{pico}}$ foi introduzida pela equipe técnica do presente estudo[10] e, o seu critério é que a estrutura metálica enterrada está imune à corrosão AC se, e somente se, o $\mathbf{E_{pico}}$ estiver mais negativo do que –0,85 V_{ECSC}. Os critérios para densidades de corrente ($\mathbf{J_{AC}}$ **e** $\mathbf{J_{AC}/J_{DC}}$) em relação à probabilidade de ocorrência de corrosão AC foram apresentados na Tabela 1.

Pelo critério do $\mathbf{E_{pico}}$**,** todos os cupons estavam termodinamicamente favoráveis à corrosão AC, salvo a questão da queda ôhmica. Por esta razão, todos os valores de $\mathbf{E_{pico}}$ foram destacados em vermelho indicando a probabilidade de ocorrência da corrosão AC. Pelo fato dos cupons CP 01, CP 02 e CP 03 apresentarem maiores valores de $\mathbf{E_{pico}}$ em relação aos demais, seria razoável esperar que as taxas de corrosão destes cupons fossem maiores, fato este que foi comprovado na prática.

Para $\mathbf{J_{AC}}$ e $\mathbf{J_{AC}/J_{DC}}$, alguns resultados foram destacados em verde e outros em amarelo. Os resultados destacados em verde indicam baixa probabilidade de ocorrência de corrosão AC e os resultados destacados em amarelo indicam média probabilidade de corrosão AC, critérios estes propostos pela literatura (Tabela 1). Assim, nenhum dos cupons estava com elevada probabilidade de corrosão AC, o que não explica os resultados das taxas de corrosão dos cupons.

4. Discussão

A revisão bibliográfica realizada mostrou que, a partir da década de oitenta do século passado, a corrosão por corrente AC em dutos enterrados passou a ser muito estudada devido a inúmeros casos de falhas observados em campo decorrentes da interferência de correntes AC. Estes estudos permitiram verificar que dutos com valores de potencial DC duto/solo

[10] As bases teóricas deste critério estão apresentadas o trabalho nº 106 deste Congresso.

dentro dos limites de proteção catódica podem sofrer corrosão por AC, sendo esta corrosão mais provável quanto maior a intensidade da corrente AC e menor a freqüência da corrente AC.

A partir de estudos de casos de falhas em campo e de experiências em laboratório, alguns critérios foram estabelecidos para serem usados como ferramenta para detecção e posterior mitigação da corrosão por corrente AC. Tais critérios tiveram como base as medidas de densidade de corrente J_{AC} e/ou J_{DC}, as quais são determinadas experimentalmente em cupons de corrosão instalados em campo, sendo o valor de J_{AC} também estimado com uma fórmula empírica, usando os valores de potencial eficaz AC e de resistividade do solo. Os critérios mais aceitos pelos autores e aqueles mais restritivos estão apresentados de maneira resumida na Tabela 1.

Nenhum dos critérios citados na literatura, incluindo os apresentados na Tabela 1, é considerado como sendo um critério seguro para a mitigação da corrosão por AC, uma vez são relatados, na literatura, inúmeros casos de falhas em campo em dutos cujas condições de operação satisfaziam os critérios estabelecidos.

Fazendo uma análise crítica de todas as informações apresentadas na literatura consultada, verificou-se que os critérios estabelecidos têm como base parâmetros cinéticos (densidade de corrente) e não termodinâmicos, o que é uma incongruência visto que previsões de ocorrência ou não de qualquer evento devem ser feitas tendo como base a termodinâmica e não a cinética. Além disto, percebeu-se que todas as medidas realizadas referiam-se individualmente à corrente AC (J_{AC} ou E_{AC} eficaz) ou à corrente DC (J_{DC} ou E_{DC}), não havendo nenhuma citação que considera o acoplamento da corrente AC com a corrente DC e a forma de onda resultante deste acoplamento, que em última análise é a responsável por qualquer processo eletroquímico que venha a ocorrer na interfase duto/solo. Havendo o acoplamento, o potencial a ser considerado é a soma do potencial AC com DC, em cada instante, e o critério para verificar se um determinado duto está ou não protegido catodicamente não pode ser feito com base no potencial duto/solo DC, mas sim com base no potencial duto/solo acoplado, qual seja, E_{AC+DC}, devendo-se afirmar que um duto está catodicamente protegido ao longo do tempo, se e somente se, em cada instante o potencial E_{AC+DC} assumir valores que posicionam o duto no domínio da imunidade no diagrama de Pourbaix, domínio este cujos limites dependem do valor do pH duto/solo. Como o maior valor do potencial E_{AC+DC} é justamente o potencial de pico da forma de onda, pode-se simplificar o critério afirmando que um duto está catodicamente protegido ao longo do tempo, se e somente se, o potencial de pico da forma de onda do acoplamento do potencial AC e DC assumir valores que posicionam o duto no domínio da imunidade no diagrama de Pourbaix.

Assim sendo, é proposta, neste estudo, a obtenção da forma de onda do acoplamento AC e DC e a comparação do potencial de pico desta forma de onda com o potencial estabelecido como limite aceitável de proteção catódica, que tradicionalmente é -0,85 V_{ECSC}. Esta proposição é feita com base na termodinâmica, o que garante que a previsão seja usada com segurança.

Para poder aplicar na prática o critério proposto, foram adquiridos equipamentos e desenvolvida uma metodologia que permite a realização das seguintes medidas em campo: potencial AC eficaz, potencial DC, potencial do acoplamento das correntes AC e DC, forma de onda do acoplamento AC e DC, potencial de pico AC e DC (obtido a partir da forma de onda), corrente AC e corrente DC.

Apesar da adequação do critério proposto, na prática, esbarra-se com o seguinte problema: ensaios realizados em laboratório e em campo mostraram claramente que os valores de potencial duto/solo medidos em campo sofrem forte influência da queda ôhmica. No caso de dutos não sujeitos à interferência da corrente AC, a queda ôhmica é corrigida fazendo-se a

leitura com o sistema de proteção catódica desligado (potencial *off*). No entanto, na presença de correntes de interferência AC, esta prática não é adequada, pois, o potencial *off* lido engloba a queda ôhmica da corrente AC que circula no sistema, mesmo com o sistema de proteção catódica desligado. Sendo assim, deve-se desenvolver uma metodologia em campo que permita a leitura do potencial duto/solo sem a influência da queda ôhmica decorrente da circulação das correntes AC e DC. Este será um dos objetivos de trabalhos a serem desenvolvidos.

Finalmente, foi verificado que nenhum dos trabalhos consultados faz referência à origem das fontes de corrente alternada, sendo citado, na literatura, apenas a ocorrência de interferências das linhas de transmissão de alta tensão, dos sistemas de distribuição de energia elétrica ou do próprio sistema de proteção catódica. Não há citações claras abordando a questão se a influência da corrente alternada é devida às correntes alternadas de indução ou às correntes alternadas dispersas no solo. Neste projeto, foi feita uma investigação para identificação da origem das prováveis fontes de interferência. Para tal, foi lançada mão da análise do conteúdo harmônico das formas de onda obtidas em campo, uma vez que este parâmetro é uma ferramenta eficaz para tentar mapear as possíveis fontes de interferência em uma faixa de dutos.

A análise do conteúdo harmônico das formas de onda obtidas, durante os ensaios com cupons de corrosão instalados no OBATI, mostrou que a corrente alternada pode ter diferentes origens em trechos diferentes do duto. No geral, foram observadas no OBATI: elevada componente 60 Hz provavelmente oriunda de interferências de linhas de transmissão de alta tensão, baixa amplitude da componente 120 Hz e, em alguns trechos, alta componente 180 Hz provavelmente oriunda do sistema de distribuição de energia elétrica dos grandes centros urbanos.

5. Conclusão

Com base na literatura, constatou-se que os critérios adotados para verificar possíveis interferências de corrente AC ainda não são totalmente confiáveis. Além disto, foi verificado que as medidas realizadas em campo levam em consideração apenas os valores individuais de corrente AC ou DC, não se considerando os valores decorrentes do acoplamento das correntes AC mais DC. A obtenção da forma de onda do acoplamento dos potenciais AC e DC, com correção da queda ôhmica, e a comparação do potencial de pico desta forma de onda com o potencial estabelecido como limite aceitável de proteção catódica, que tradicionalmente é -0,85 V_{ESCS} é fundamental para avaliação da probabilidade de ocorrência de corrosão AC. A corrosão por corrente AC ocorrerá se o potencial de pico da forma de onda de potencial tubo/solo resultante do acoplamento AC+DC for menor menos negativo do que -0,85 V_{ECSC}.

5. Referências bibliográficas

1. GOIDANICH, S.; LAZZARI, L.; ORMELLESE, M; PEDEFERRI, M.P., *Influence of AC on carbon steel corrosion in simulated soil solutions*, 16th ICC, paper n. 04-03, Beijing, China, 2005

2. FUNK; PRINZ, SCHONEICH, *Investigation of Corrosion of Cathodically Protected Steel Subjected to Alternating Currents*, 3R International, 32, 1992

3. NACE INTERNATIONAL 2007, *AC Corrosion State-of-the-Art: Corrosion Rate, Mechanism, and Mitigation Requirements*, NACE TG 327, 2007

4. WAKELIN, R., R. GUMMOW, S. SEGALL, *AC Corrosion – Case Histories, Test Procedures and Mitigation*, Corrosion/98, paper n. 98565, Houston, 1998

5. COLLET, E; DELORES, B.; GABILLARD, M.; RAGAULT, I., *Corrosion due to AC influence of very high voltage power lines on polyethylene-coated steel pipelines: evaluation of risks – prevestive measures*, 4, p. 221-226, 2001

6. D. FUNK, H.G. SCHOENEICH, *Problems with Coupons when Assessing the AC-Corrosion Risk of Pipelines*, 3R International, Special steel Pipelines 41, 10-11, p. 54, 2002

(a) (b)

Figura 1 – Cupom cilíndrico de aço-carbono COPANT 1020 de 4,8 cm^2 de área (a) e contra-eletrodo de aço inoxidável ABNT 316 utilizados no levantamento de curvas de E_{DC} em função de J_{DC} com imposição de diferentes valores de J_{AC} (b).

(a) (b)

Figura 2 – Cuba de vidro utilizada no levantamento de curvas E_{DC} em função de J_{DC} com imposição de diferentes valores de J_{AC} (a) e detalhe do eletrodo de trabalho, do contra-eletrodo e eletrodo de referência (b).

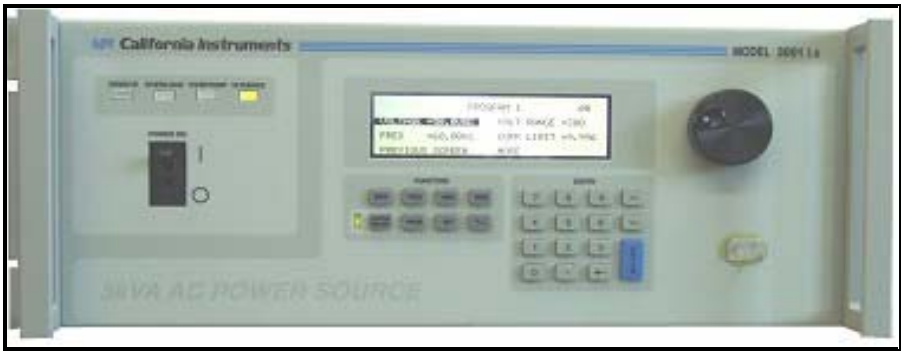


Figura 3 – Fonte de tensão alternada utilizada no levantamento de curvas E_{DC} em função de J_{DC} com imposição de diferentes valores de J_{AC}

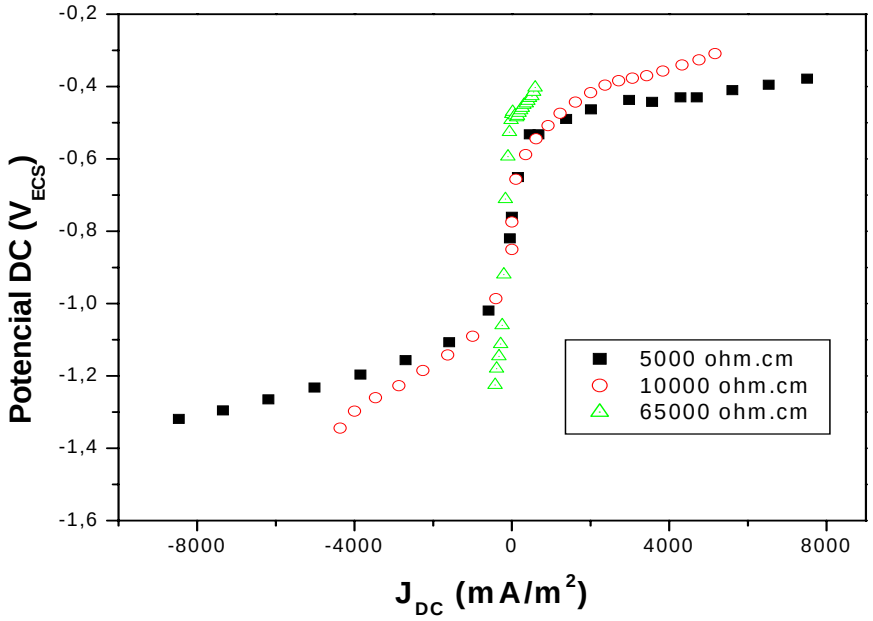


Figura 4 – Curvas de potencial versus densidade de corrente de proteção catódica para um sistema na ausência de corrente AC.

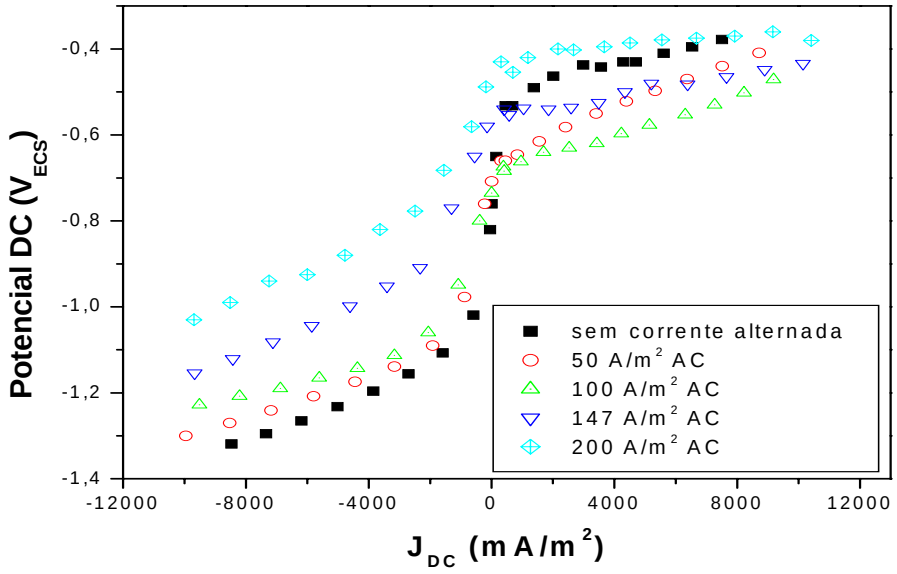


Figura 5 – Curvas de potencial E_{DC} em função da densidade de corrente DC, em meio de resistividade 5000 Ω.cm, para diferentes densidades de corrente AC.

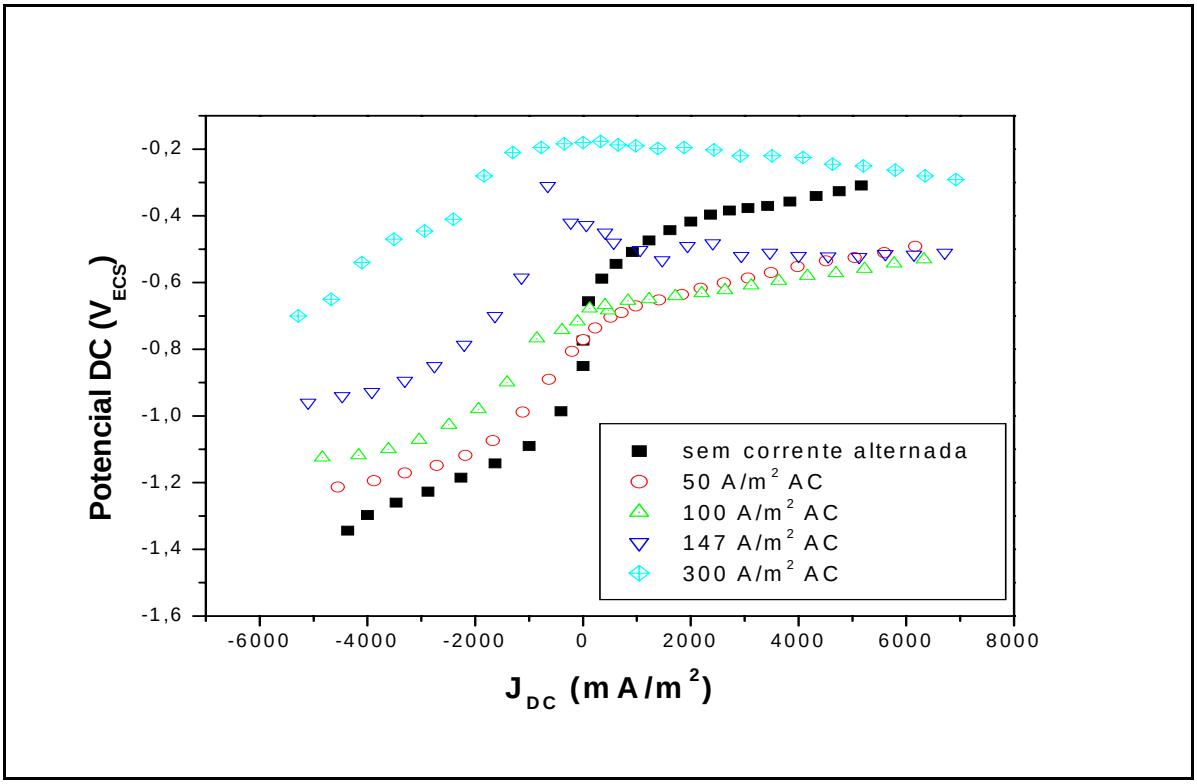


Figura 6 – Curvas de potencial E_{DC} em função da densidade de corrente DC, em meio de resistividade 10000 Ω.cm, para diferentes densidades de corrente AC.

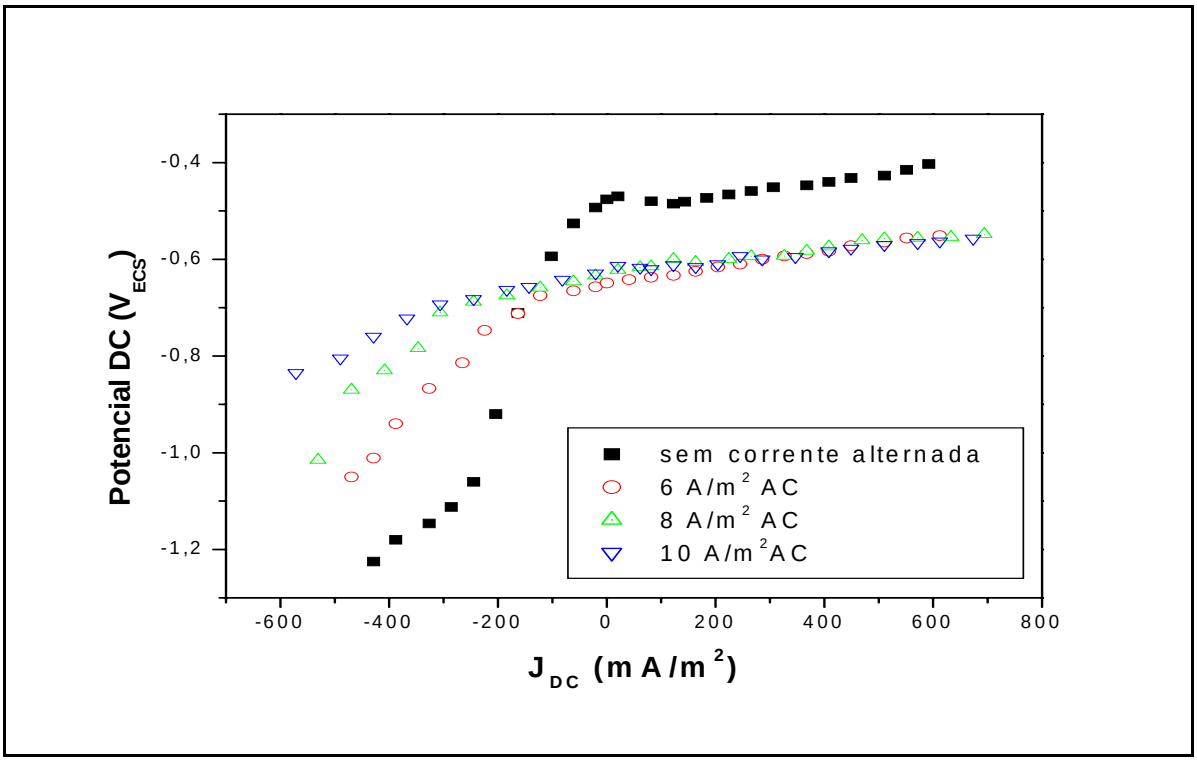


Figura 7 – Curvas de potencial E_{DC} em função da densidade de corrente DC, em meio de resistividade 65000 Ω.cm, para diferentes densidades de corrente AC.

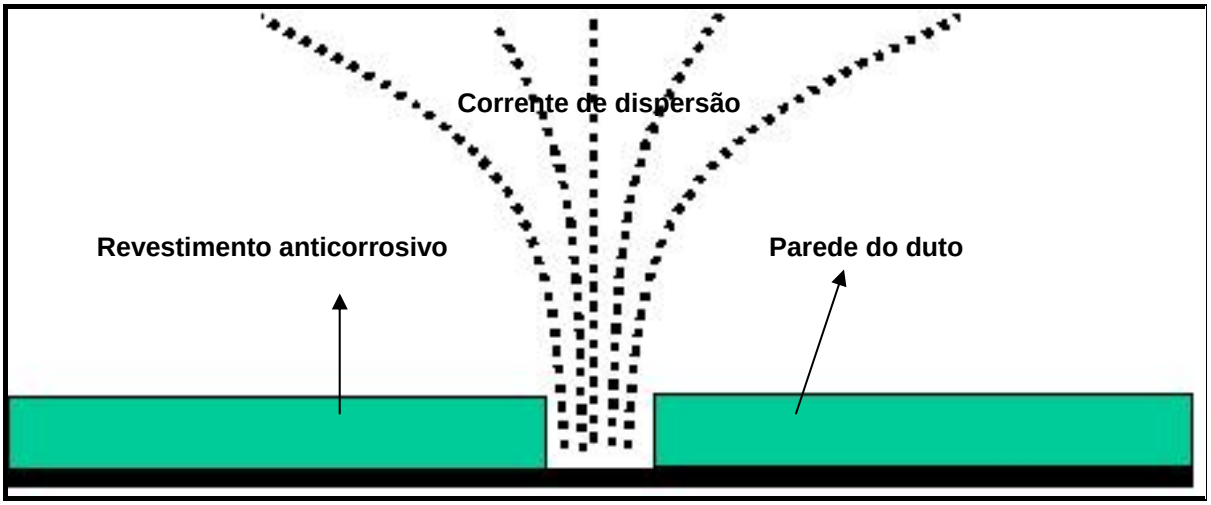


Figura 8 – Desenho esquemático do defeito do revestimento anticorrosivo e dispersão da corrente na falha do revestimento.

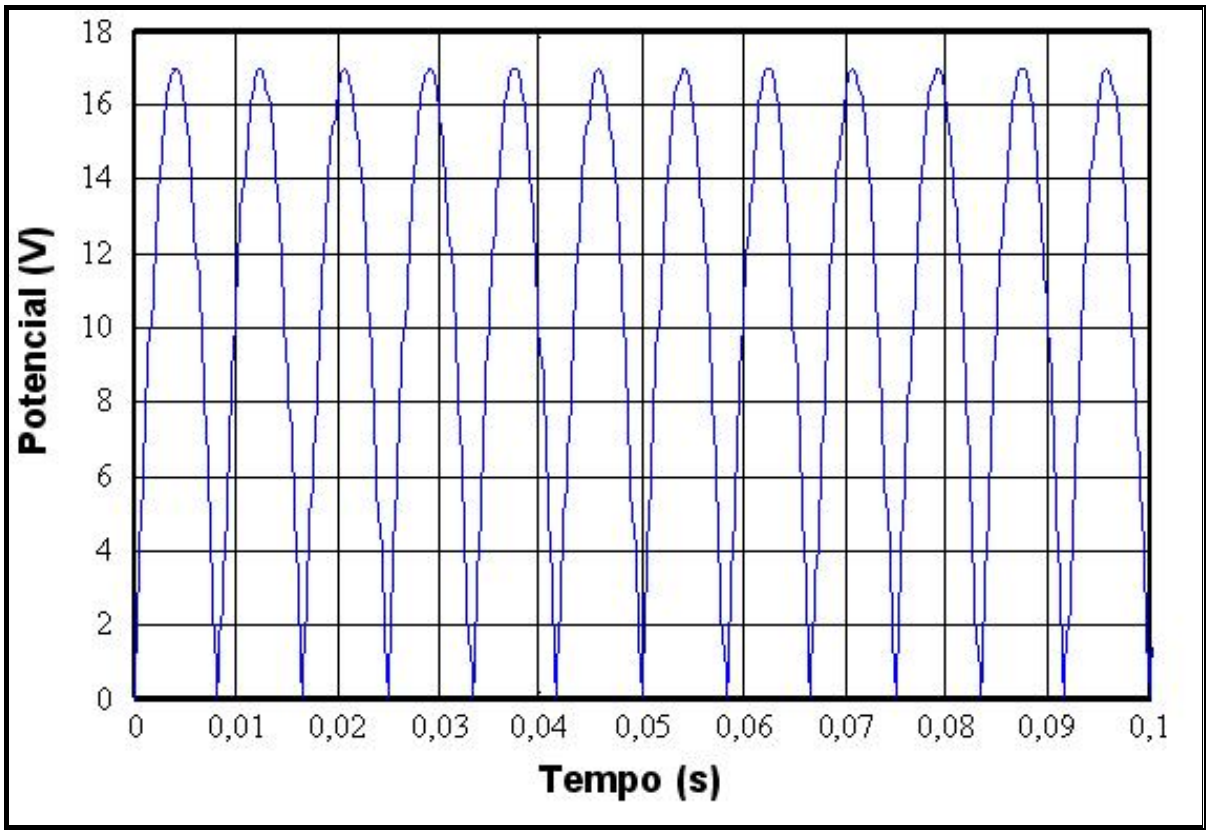


Figura 9 – Forma de onda do potencial da saída do retificador no domínio do tempo.

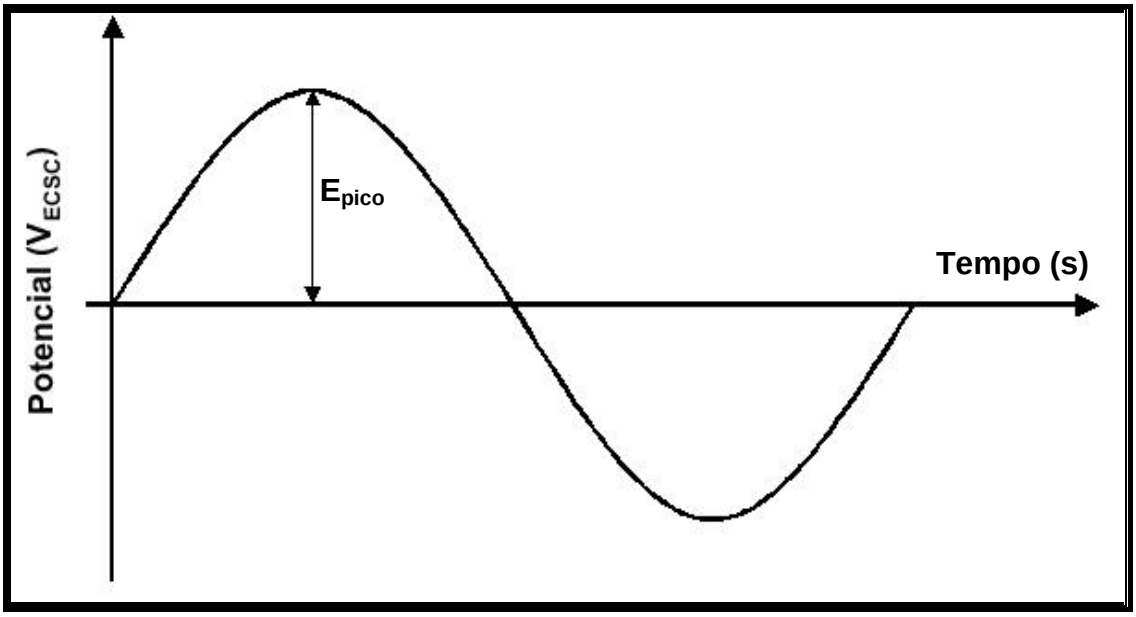


Figura 10 – Desenho esquemático da forma de onda do potencial tubo/solo (potencial instantâneo).

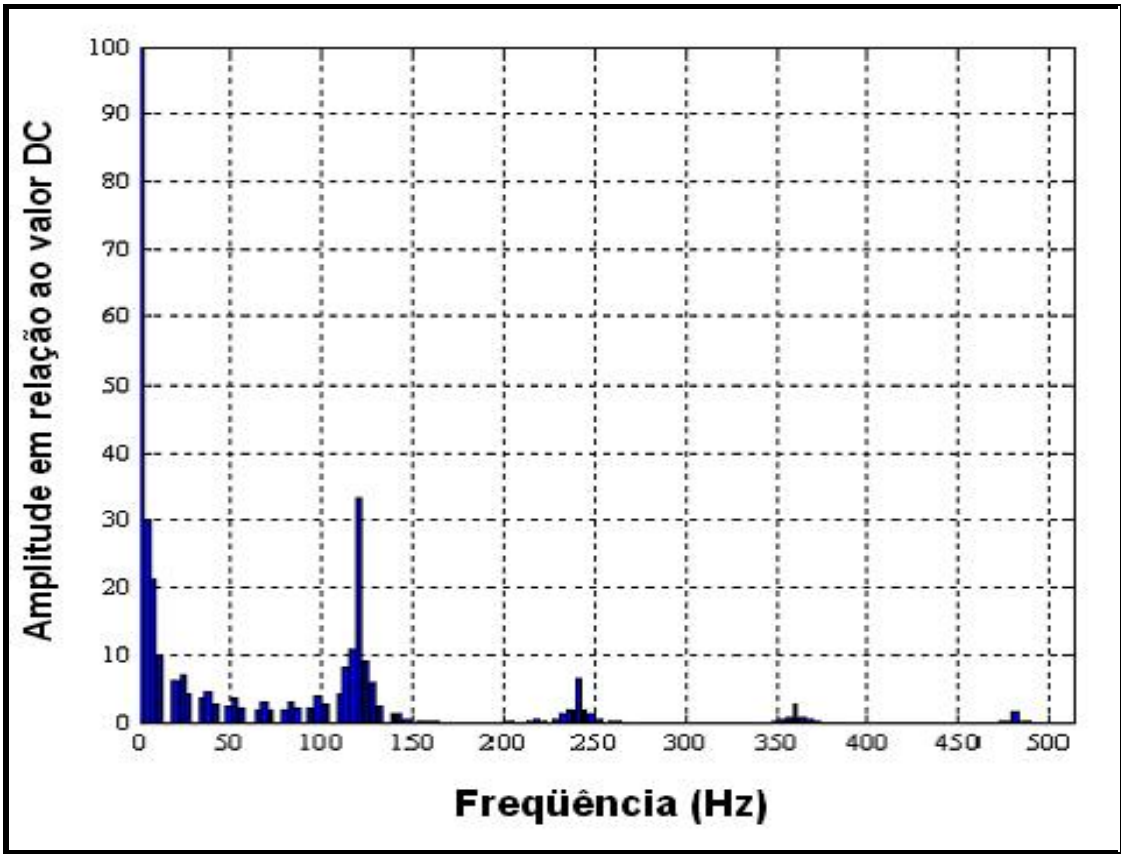


Figura 11 – Conteúdo harmônico da forma de onda do potencial de um retificador de proteção catódica.

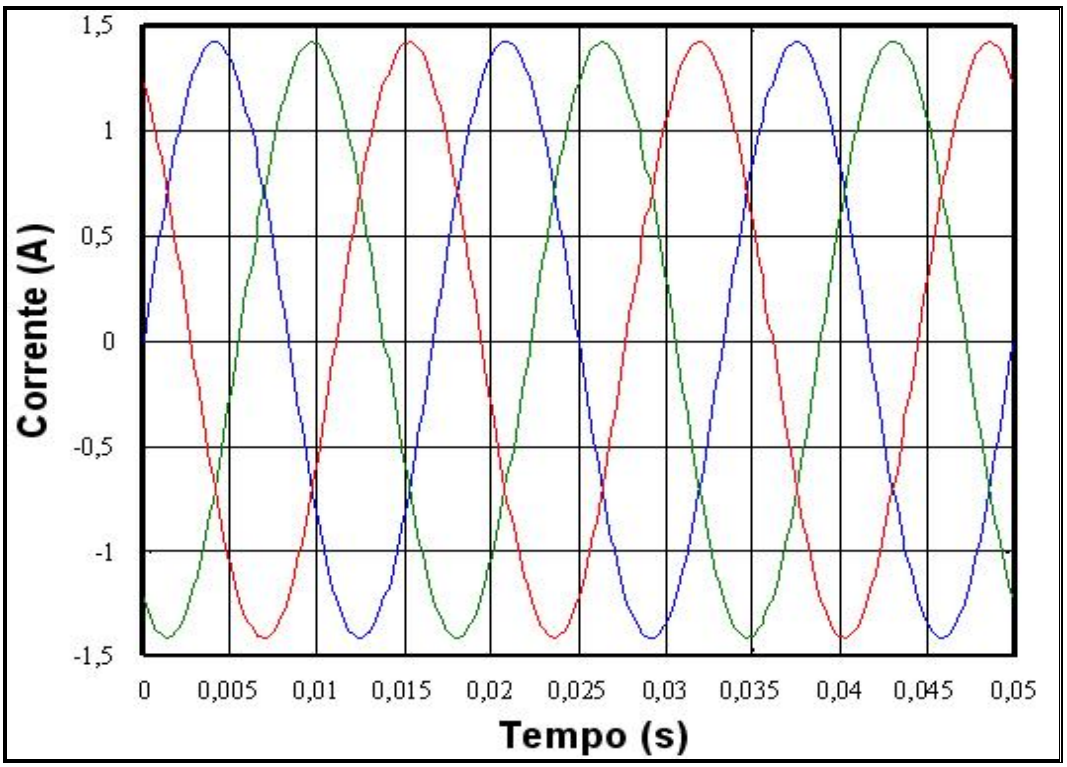


Figura 12 – Forma de onda das correntes trifásicas numa linha de transmissão de alta tensão.

Figura 13 – Osciloscópio digital da Fluke mod. 123 utilizado nas medidas de potencial.

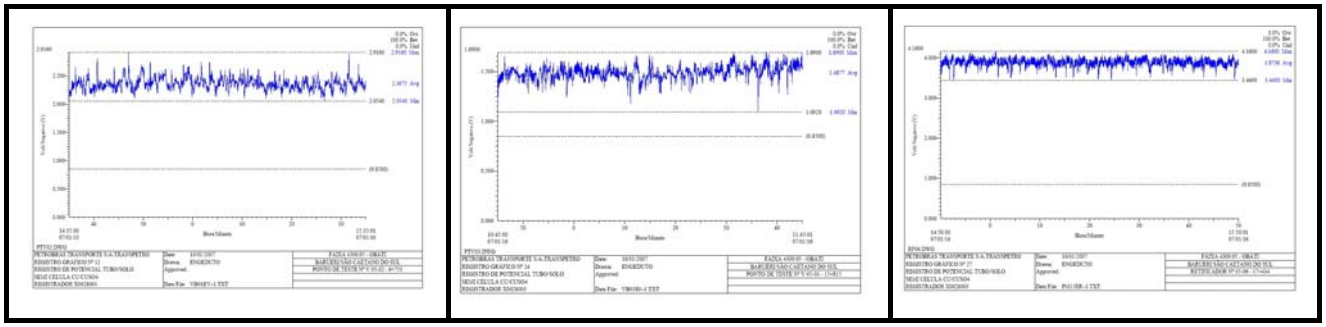
(a) (b)

Figura 14 – Metodologia adotada para a obtenção da forma de onda usando um osciloscópio. Um dos terminais do osciloscópio foi conectado ao eletrodo de referência de $Cu/CuSO_4$ enterrado dentro do tubo de PVC alocado sobre os dutos e cupons (a) sendo o outro terminal conectado ao ponto de teste que estava interligado ao duto ou ao cupom (b).

Figura 15 – Alicate amperímetro utilizado para medida de corrente AC nos cupons.

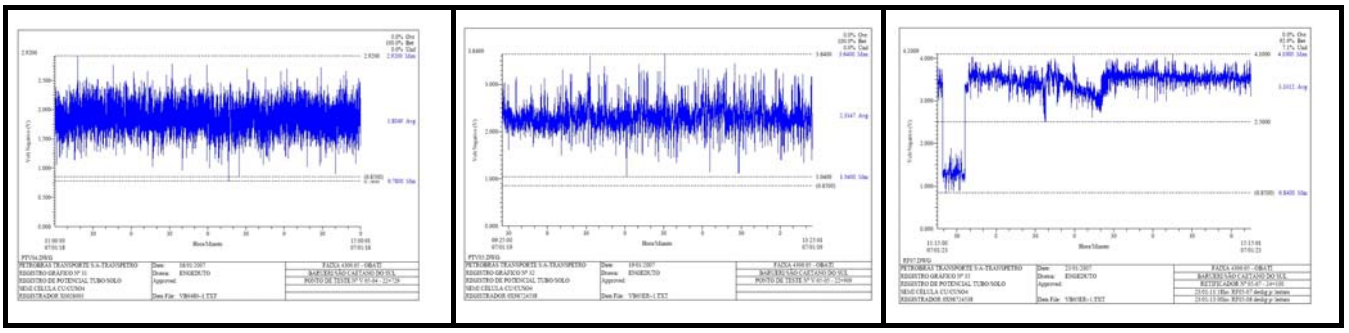
Figura 16 – Pinça de corrente de 508 mm de diâmetro (20”) utilizada nas medidas de corrente AC nos dutos. Ao centro, transdutor de sinal com fator de transdução de 5 mV/A.

Figura 17 – Medida de corrente AC nos dutos utilizando pinça de corrente flexível.



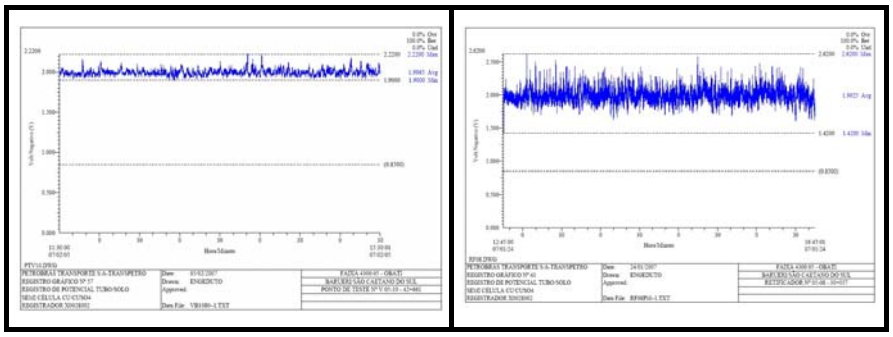
V 05-02 **V 05-03** **RF 05-06**

Figura 18 – Registro de potencial tubo solo (**E_{DC}**) das caixas de válvula V 05-02 e V 05-03 e do retificador RF 05-06 do OBATI.



V 05-04 **V 05-05** **RF 05-07**

Figura 19 – Registro de potencial tubo solo (E_{DC}) das caixas de válvula V 05-04 e V 05-05 e do retificador RF 05-07 do OBATI.



V 05-10 RF 05-08

Figura 20 – Registro de potencial tubo solo (E_{DC}) das caixas de válvula V 05-10 e do retificador RF 05-08 do OBATI.

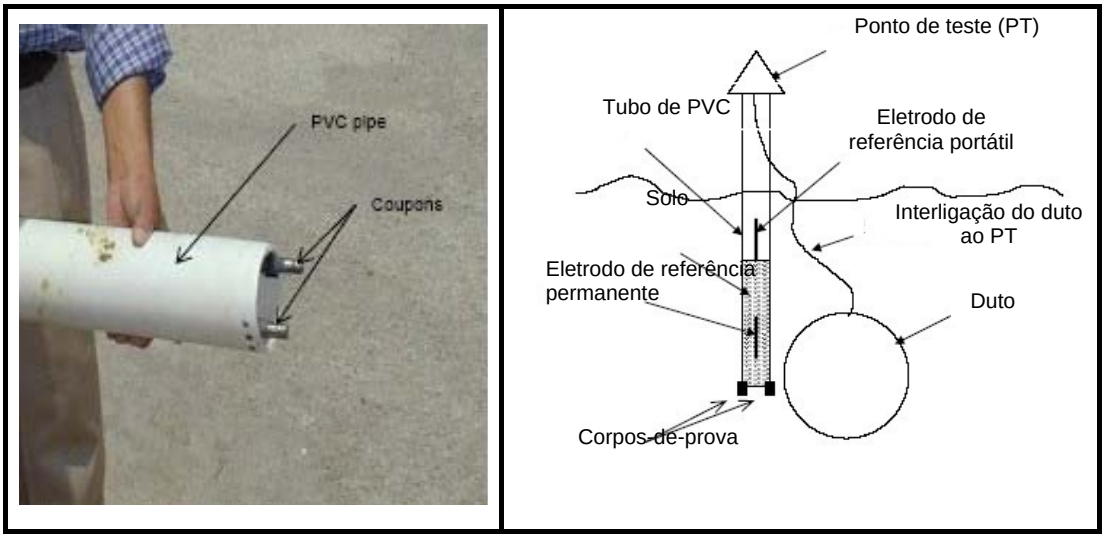


Figura 21 – Dispositivo de corrosão para ensaios em campo padrão NACE

Figura 22 – Cupons em processo de instalação em campo

Figura 23 – Abertura da vala de 1,5 m de profundidade para instalação dos cupons de corrosão.

Figura 24 – Aspecto da parte superior do tubo de PVC de 10 cm de diâmetro colocado na parte superior do dispositivo de polipropileno com a tampa já colocada

Figura 25 – Ponto de teste onde foi feito o contato elétrico do cupom de teste (fio verde).

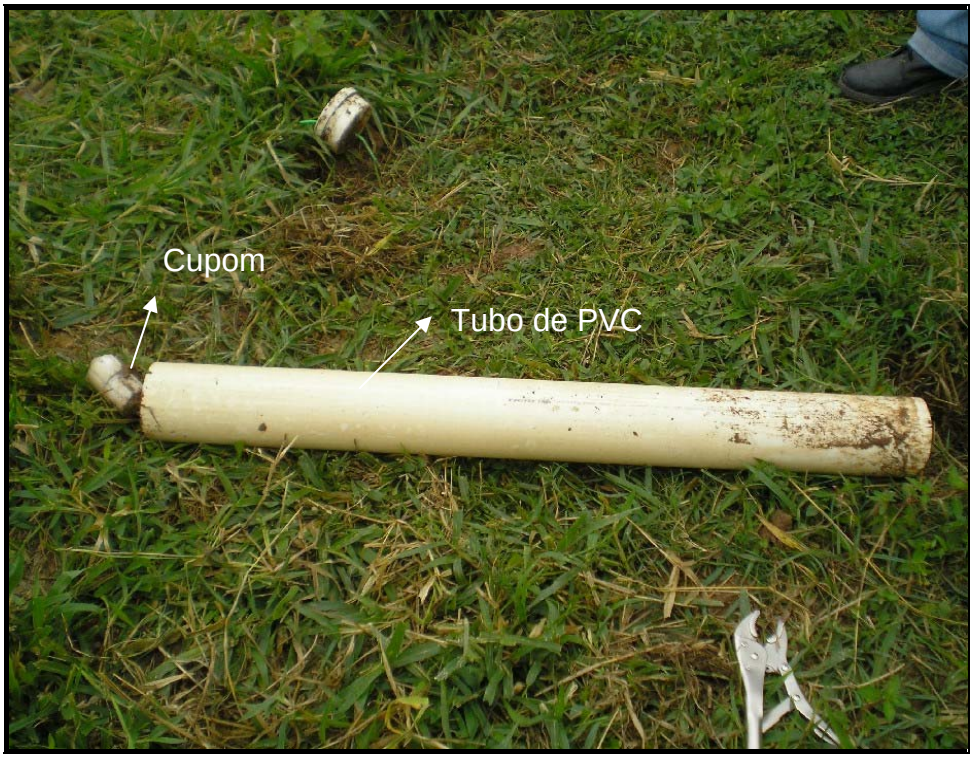


Figura 26 – Cupom e tubo de PVC recém-retirado

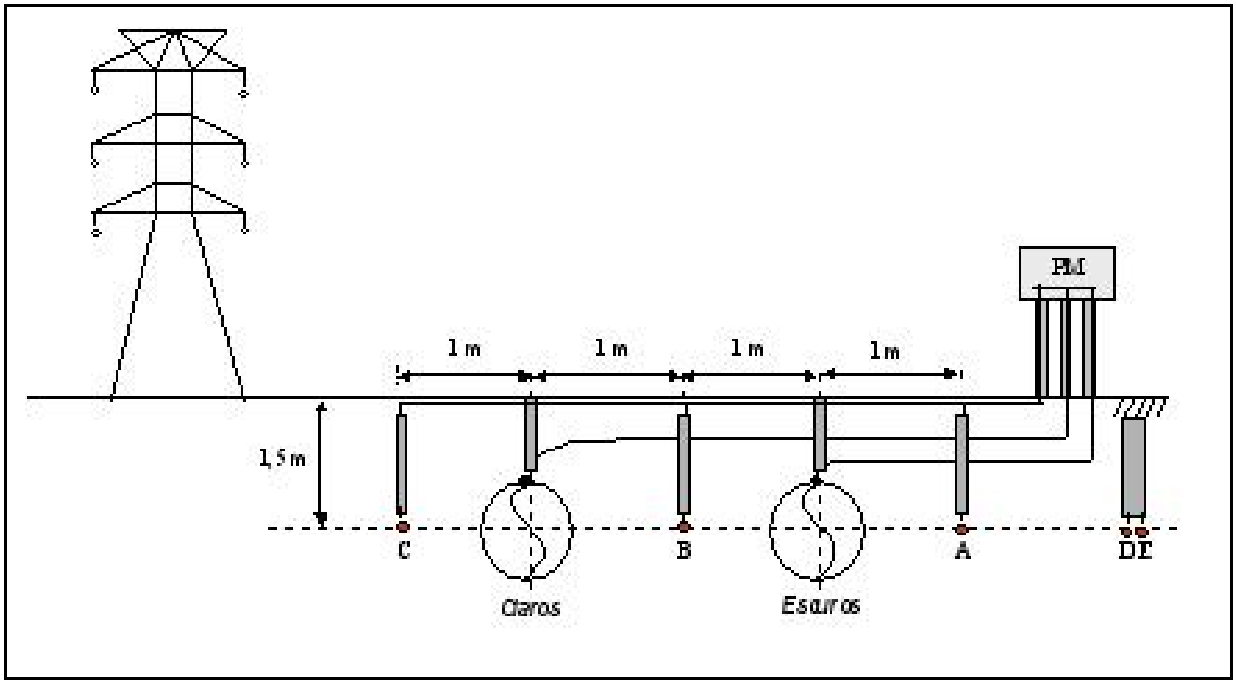


Figura 27 – Esquema de instalação dos cupons no OBATI.

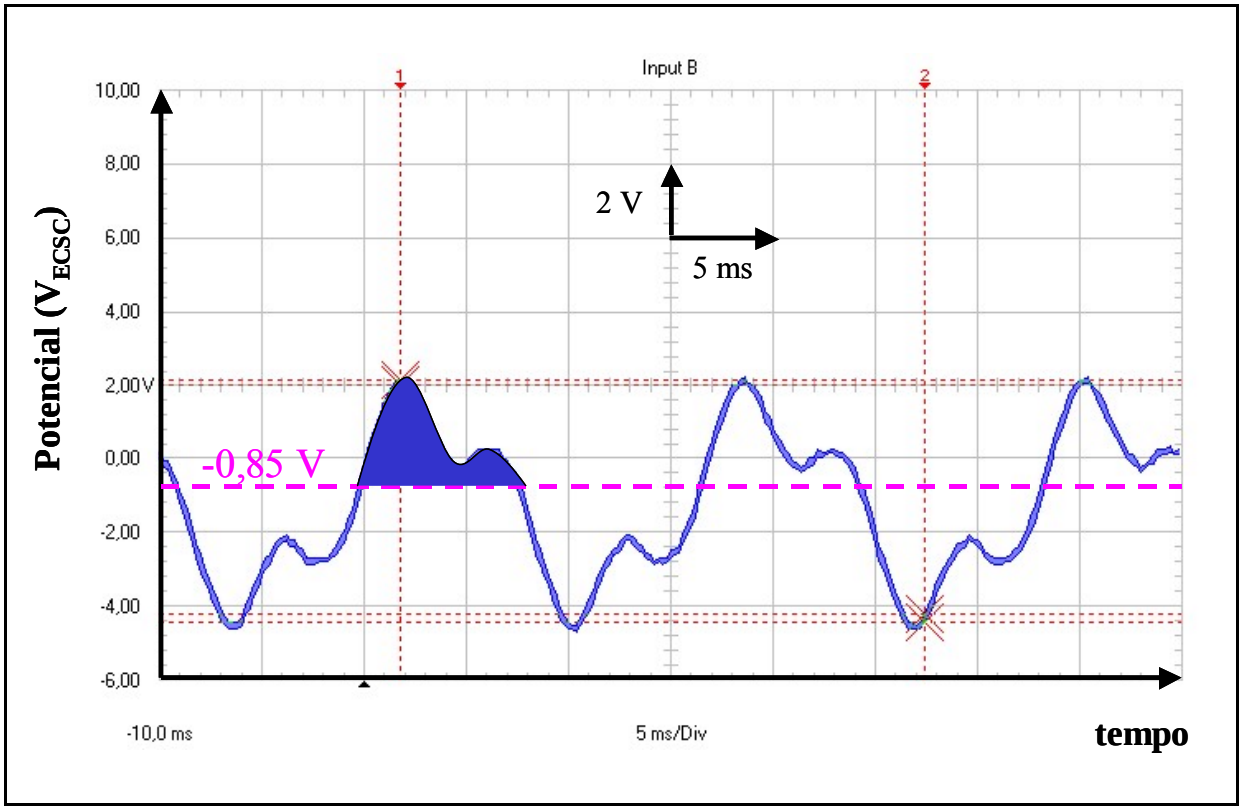


Figura 28 – Forma de onda típica do potencial tubo/solo

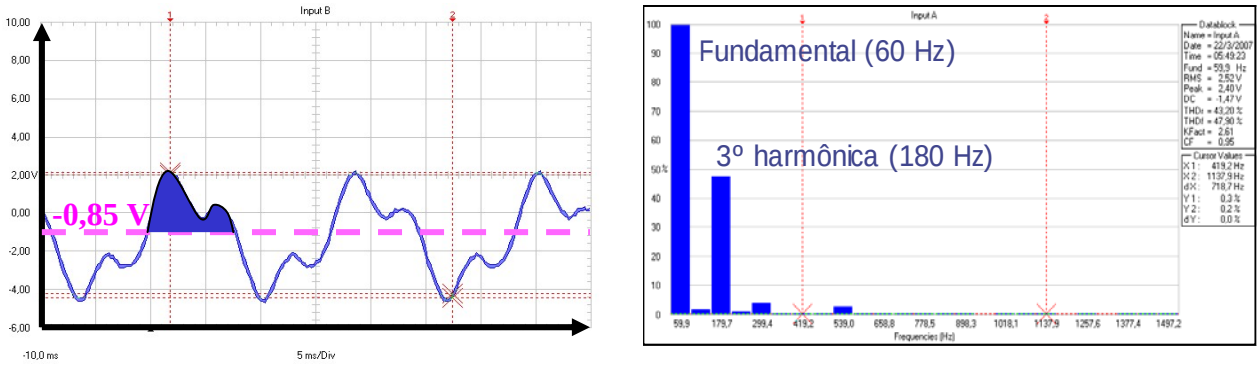


Figura 29 – Perfil da forma de onda do potencial tubo/solo das medidas realizadas nos dutos na caixa de válvula V 05-03.

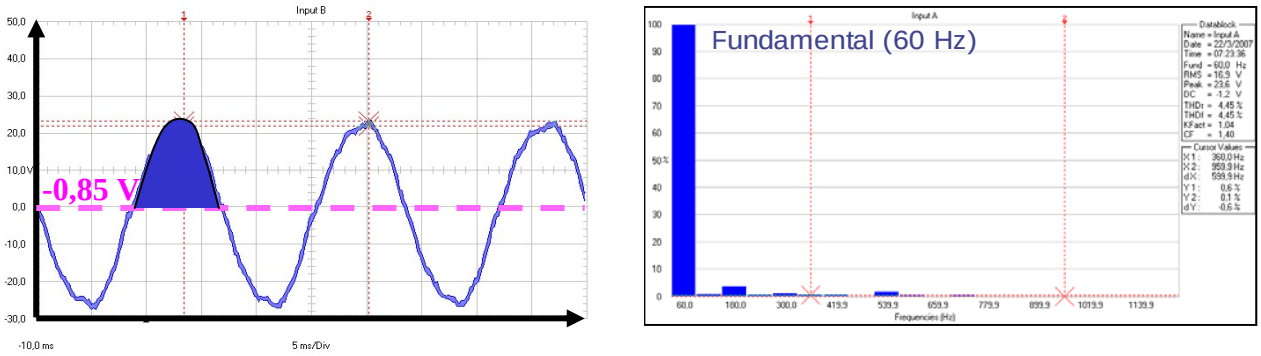


Figura 30 – Perfil da forma de onda do potencial tubo/solo das medidas realizadas nos dutos na caixa de válvula V 05-04.

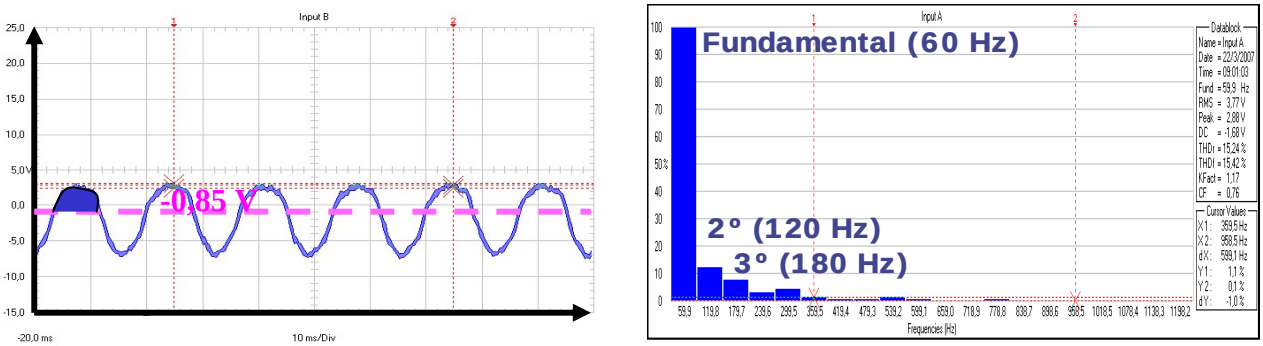


Figura 31 – Perfil da forma de onda do potencial tubo/solo das medidas realizadas nos dutos na caixa de válvula V 05-05.

Tabela 1 – Critérios de previsão de ocorrência de corrosão por AC mais aceitos e restritivos (1-3)

Parâmetro	Critério	
J_{AC}	$J_{AC} < 20$ A/m^2	Corrosão por AC não ocorre
	20 A/m^2 < J_{AC} < 100 A/m^2	A corrosão por AC não pode ser prevista
	$J_{AC} > 100$ A/m^2	A corrosão por AC ocorre
J_{AC}/J_{DC}	$J_{AC}/J_{DC} < 2$	Baixa probabilidade de corrosão por AC
	$2 < J_{AC}/J_{DC} < 10$	Existe probabilidade de corrosão por AC, devendo ser investigada
	$J_{AC}/J_{DC} > 10$	Alta probabilidade de corrosão por AC

Nota: os valores de J_{AC} e J_{DC} são obtidos em campo por meio de cupons de corrosão interligados aos dutos. O valor de J_{AC} pode ser estimado usando a fórmula empírica:

$$J_{AC} = \frac{8.E_{AC}}{\rho.\pi.d}$$

Tabela 2 – Valores máximos, médios e mínimos obtidos dos registros de potencial tubo/solo E_{DC}

Local da medida	Potencial tubo-solo E_{DC} (V_{ECSC})			$E_{DC\ máximo} - E_{DC\ mínimo}$ (V)
	$E_{DC\ máximo}$	$E_{DC\ médio}$	$E_{DC\ mínimo}$	
V 05-02	-2,0	-2,4	-2,9	0,9
V 05-03	-1,0	-1,5	-1,7	1,7
RF 05-06	-3,4	-3,9	-4,2	0,8
V 05-04	-0,8	-1,8	-2,9	2,1
V 05-05	-1,0	-2,3	-3,6	2,6
RF 05-07	-2,5	-3,3	-4,1	1,6
V 05-10	-1,9	-2,0	-2,2	0,3
RF 05-08	-1,4	-2,0	-2,6	1,2

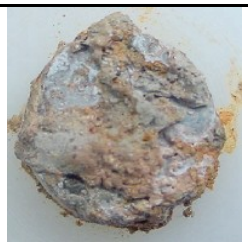
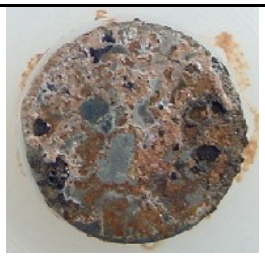
Tabela 3 – Análise do conteúdo harmônico da forma de onda do potencial tubo/solo.

Conteúdo harmônico	Principal fonte de interferência
Elevada componente 60 Hz e baixa componente 180 Hz	Linhas de transmissão de alta tensão
Baixa componente 60 Hz e elevada componente 180 Hz	Sistemas de distribuição de energia elétrica
Componente 120 Hz	Sistema de proteção catódica

Tabela 4 – Parâmetros elétricos envolvidos nas medidas de potencial tubo/solo e cupom/solo

Local de medida		E_{DC} (V_{ECSC})	E_{AC} (V_{ECSC})	E_{AC+DC} (V_{ECSC})	E_{pico} (V_{ECSC})
V 05-03	CP 13	-1,3	1,9	2,3	2,1
	Claros	-1,5	2,1	2,5	2,2
	CP 12	-1,4	2,0	2,4	1,5
	Escuros	-1,6	2,0	2,6	1,8
	CP 11	-1,6	0,8	0,8	1,4
V 05-04	CP 03	-1,4	15,1	15,1	20,0
	Claros	-1,4	17,4	17,4	22,8
	CP 02	-1,3	16,9	16,9	22,8
	Escuros	-1,5	17,3	17,3	22,8
	CP 01	-1,4	16,8	16,9	22,0
V 05-05	CP 06	-1,6	3,4	3,8	2,4
	Claros	-1,8	4,2	4,5	3,2
	CP 07	-1,6	3,3	3,7	2,2
	Escuros	-1,6	4,0	4,3	3,0
	CP 08	-1,6	3,5	3,8	2,8

Tabela 5 - Taxas de corrosão dos cupons instalados na caixa de válvula V 05-03 do OBATI.

Local de instalação	Cupom	Dispositivo	Cupom após retirada do local	Cupom após limpeza	Taxa de corrosão (μm/a)
V 05-03	CP 11				0,689
	CP 12				0,736
	CP 13				23,2
	CP 14*				42,2
	CP 15*				40,1

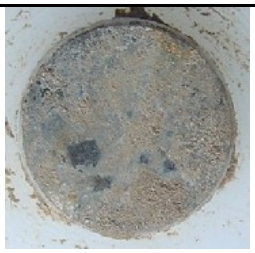
*cupons de corrosão "brancos", não interligados aos dutos e, portanto, sem proteção catódica e sem interferência de corrente AC.

Tabela 6 - Taxas de corrosão dos cupons instalados na caixa de válvula V 05-04 do OBATI

Local de instalação	Cupom	Dispositivo	Cupom após retirada do local	Cupom após limpeza	Taxa de corrosão (μm/a)
V 05-04	CP 01				55,8
	CP 02				21,9
	CP 03				45,1
	CP 04*				73,4
	CP 05*				89,7

*cupons de corrosão "brancos", não interligados aos dutos e, portanto, sem proteção catódica e sem interferência de corrente AC.

Tabela 7 - Taxas de corrosão dos cupons instalados na caixa de válvula V 05-05 do OBATI.

Local de instalação	Cupom	Dispositivo	Cupom após retirada do local	Cupom após limpeza	Taxa de corrosão (μm/a)
V 05-05	CP 06				2,76
	CP 07				0,642
	CP 08				0,731
	CP 09*				93,3
	CP 10*				58,8

*cupons de corrosão "brancos", não interligados aos dutos e, portanto, sem proteção catódica e sem interferência de corrente AC.

Tabela 8 – Resultados das medidas realizadas nos cupons de corrosão e taxas de corrosão.

Cupom	E_{pico} (V_{ECSC})	J_{AC} (A/m^2)	J_{AC}/J_{DC}	E_{DC} (V_{ECSC})	TC (µm/a)
CP 01	22,0	12,3	7,9	-1,4	55,8
CP 02	22,8	6,3	5,7	-1,3	21,9
CP 03	20,0	54,5	8,7	-1,4	45,1
CP 06	2,4	6,2	1,8	-1,6	2,76
CP 07	2,2	6,9	1,6	-1,6	0,642
CP 08	2,8	4,9	1,5	-1,6	0,731
CP 11	1,36	14,5	3,4	-1,6	0,689
CP 12	2,52	7,0	2,3	-1,4	0,736
CP 13	2,08	3,6	0,9	-1,3	23,2