

Copyright 2014, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2014, em Fortaleza/CE no mês de maio de 2014.

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

## **Estudo de corrosão por correntes alternadas (AC) em uma linha de transporte de gás**

Amauri G. Martins Jr.<sup>a</sup>, João Paulo Klausing Gervásio<sup>b</sup>, Daniel Alves Torres Filho<sup>c</sup>

### **Abstract**

Describes an alternating current corrosion study for a 41 km, 8” diameter, API 5L carbon steel gas pipeline, subject to AC induced interferences by medium and high voltage transmission lines. Steady state inductive coupling simulations between the transmission lines and the interfered pipeline are carried out on a multi-layer soil model, with further application of the predictive model described in the NACE report TG-327: “AC Corrosion State-of-the-Art: Corrosion Rate, Mechanism, and Mitigation Requirements”. Theoretical results are validated against field measurements on test stations and corrosion coupons, as well as direct inspection through excavations, with the purpose of bringing up new clarifications about the AC corrosion issue and its prediction methods on buried pipelines.

**Keywords:** AC Corrosion, Mitigation, Cathodic Protection, AC Induced Voltage

### **Resumo**

Descreve um estudo de corrosão causado por correntes alternadas em um duto de transporte de gás em aço carbono API 5L de aproximadamente 41 quilômetros de extensão, diâmetro 8” IPS, sujeito a interferências AC causadas por linhas de transmissão em alta tensão, bem como linhas de distribuição de energia elétrica em média tensão. A abordagem adotada é modelagem da estrutura do solo com estratificação em camadas, realização de simulações computacionais de acoplamento indutivo em regime permanente entre as linhas de transmissão e a tubulação interferida e aplicação do modelo preditivo descrito no relatório NACE TG-327: “AC Corrosion State-of-the-Art: Corrosion Rate, Mechanism, and Mitigation Requirements”. Os resultados teóricos são validados por meio de comparação com medições nos pontos de teste do gasoduto e cupons de corrosão, assim como escavações para inspeções diretas, com o propósito de trazer novas elucidacões acerca da problemática da corrosão AC em tubulações enterradas e mecanismos para sua predição.

**Palavras-chave:** Corrosão AC, Mitigação, Proteção Catódica, Tensão AC induzida.

### **Introdução**

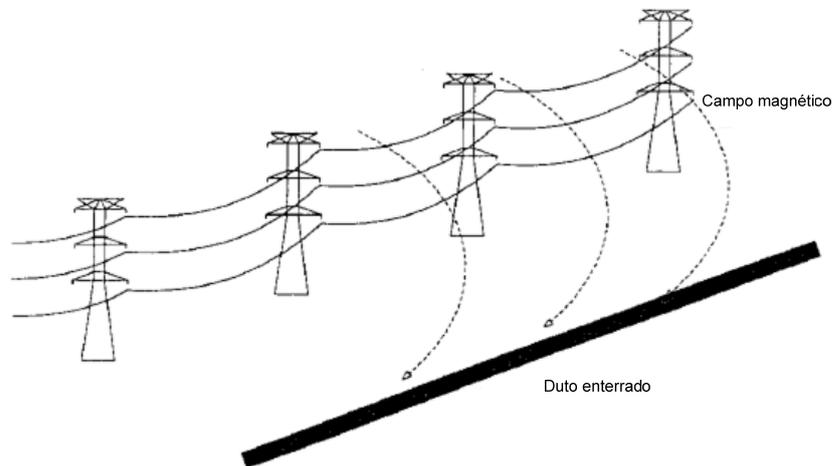
Os casos de interferências entre linhas de transmissão de energia elétrica e dutos de transporte tem se tornado progressivamente mais frequentes, em razão de restrições impostas por regulamentos ambientais e, conseqüentemente, limitações de espaço destinado às instalações. Em dutos sujeitos a influências de linhas de transmissão aéreas é verificada ocorrência de

<sup>a</sup> ENGECORR ENGENHARIA DE CORROSÃO LTDA

<sup>b</sup> PETROBRAS – PETRÓLEO BRASILEIRO S/A

<sup>c</sup> TRANSPETRO – PETROBRAS TRANSPORTE S/A

forças eletromotrizes induzidas (FEM), resultantes dos fenômenos de acoplamento indutivo, condutivo e capacitivo, em regimes transitório e permanente. Em regime permanente (condição normal de operação de uma linha de transmissão), predomina o acoplamento indutivo ou magnético, ilustrado na Figura 1, que origina tensões AC de longa duração entre a estrutura e o solo adjacente.



**Figura 1 - Influência por acoplamento condutivo**

O acoplamento indutivo é descrito analiticamente pelas equações de Carson *et al* [1], sendo função direta da geometria da aproximação, comprimento da zona de interferência, distância entre a estrutura interferida e os condutores energizados da LT, configuração das torres e cabeamento utilizado, presença de cabos pára-raios, resistência do revestimento do duto, resistividade elétrica do solo na camada profunda, corrente de carregamento e balanceamento de fases [2]. Tensões e correntes AC induzidas podem acarretar, além dos riscos de eletrocussão ou danos à estrutura e equipamentos, a corrosão do metal em possíveis pontos de falha no revestimento.

O tema da corrosão AC vem sendo abordado por pesquisadores de todo o mundo desde o início do século XIX e, no entanto, permanece controverso e a compreensão de seus mecanismos, incompleta [3]. Estudos foram realizados por especialistas na Europa, América do Norte [4] e, também, no Brasil [5], sendo consenso que: o risco de corrosão por correntes alternadas é função das características do eletrólito (resistividade, pH, temperatura) e dos níveis de tensão induzidos (que resultam em uma densidade de corrente AC circulante), ocorre mesmo em dutos catodicamente protegidos [6], e é agravado com a adoção de revestimentos de alta resistividade e eficiência [7], tais como os baseados em polietileno extrudado.

No ano de 2007, a NACE publicou o relatório técnico TG-327, intitulado “*AC Corrosion State-of-the-Art: Corrosion Rate, Mechanism, and Mitigation Requirements*”, consolidando o que ainda é considerado como o conjunto mais moderno de conhecimentos e práticas atualmente disponível para análise, predição e neutralização da corrosão AC em dutos metálicos.

De acordo com o referido estudo, os riscos de corrosão AC são avaliados em termos de probabilidades de ocorrência, expressas em função da densidade de corrente J, fluindo por um

defeito de revestimento circular com superfície igual a 1,0 cm<sup>2</sup>, segundo critério descrito na Tabela 1.

**Tabela 1 - Probabilidades de ocorrência de corrosão AC, segundo o TG-327**

Probabilidade de corrosão AC	Densidade de Corrente
Probabilidade baixa	$J < 20 \text{ mA / m}^2$
Probabilidade moderada	$20 < J < 100 \text{ mA / m}^2$
Probabilidade muito alta	$J > 100 \text{ mA / m}^2$

A densidade de corrente  $J$  é estimada por meio da seguinte expressão:

$$J = \frac{8V}{\rho\pi d} \quad (1)$$

Em que:

$J$  = densidade de corrente AC que flui pelo defeito, em A/m<sup>2</sup>;

$V$  = tensão AC induzida entre o duto e o solo, em V;

$\rho$  = resistividade elétrica do solo, em  $\Omega \cdot \text{m}$ ;

$d$  = diâmetro do defeito no revestimento da tubulação, em m.

Abordagens ainda mais recentes [8] utilizam técnicas de modelagem numérica e simulação computacional dos parâmetros de linha de transmissão e indução eletromagnética em dutos na presença de defeitos no revestimento, considerados como volumes finitos de resistividade elétrica  $\rho$ , para obtenção do perfil de densidades de corrente resultante. Nestas condições, para uma falha de revestimento em formato cilíndrico, como ilustrado na Figura 2, demonstra-se que a densidade de corrente  $J$  é dada por:

$$J = \frac{V}{\rho(0,3927c + t)} \quad (2)$$

Em que:

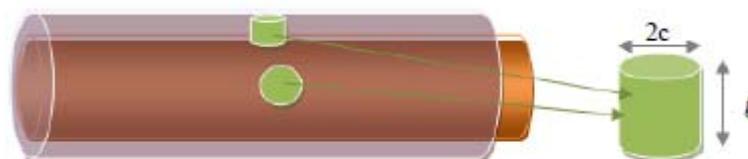
$J$  = densidade de corrente AC que flui pelo defeito, em A/m<sup>2</sup>;

$V$  = tensão AC induzida entre o duto e o solo, em V;

$\rho$  = resistividade elétrica do solo, em  $\Omega \cdot \text{m}$ ;

$r$  = raio do defeito no revestimento da tubulação, em m;

$t$  = espessura do revestimento da tubulação, em m.



**Figura 2 - Ilustração de uma falha em formato cilíndrico**

Este trabalho descreve um estudo de caso de um gasoduto sujeito a interferências de linhas de transmissão de energia elétrica em alta tensão e histórico de corrosão por corrente alternada, com foco na influência eletromagnética sobre a estrutura interferida, ou seja: a causa, e na resposta do modelo probabilístico proposto pelo TG-327, utilizando o equacionamento exposto. São apresentados resultados de simulações de indução eletromagnética em regime permanente, com perfis de tensão e densidade de corrente, e comparações com dados de medições em pontos de teste e cupons de corrosão, bem como resultados de escavações.

Considerando que boa parte da literatura técnica disponível aborda a questão do ponto de vista da corrosão eletroquímica, um dos objetivos deste texto é evidenciar a correlação entre corrosão AC e interferência eletromagnética. Pretende-se, ainda, demonstrar a viabilidade da adoção de técnicas de simulação computacional como ferramenta auxiliar na previsão de ocorrências de corrosão AC e identificar parâmetros de referência, contribuindo, assim, com métodos suplementares para abordagem do problema, determinação de regiões mais susceptíveis e validação de sistemas de mitigação.

## **Metodologia**

---

A metodologia adotada é a compilação de dados disponíveis sobre um caso real de interferência e simulação computacional do problema, empregando o software comercial CDEGS, desenvolvido pela companhia SES – *Safe Engineering Services Ltd.* e reconhecido como validado experimentalmente [9][10].

O algoritmo de simulação numérica adotado é baseado em três etapas de cálculo principais:

1. Cálculo dos parâmetros de linha: os parâmetros de linha de transmissão são calculados com base na aproximação por um plano complexo de retorno para representação de solos de resistividade não-nula, proposta por Deri *et al* [12] e aprimorado posteriormente por outros pesquisadores. É levada em consideração a resistividade elétrica média do solo.
2. Cálculo das correntes de neutro: utilizando teoria de circuitos, são computadas as correntes de retorno nos condutores neutro ou pára-raios, em regimes permanente e transitório, a partir do que são calculadas as forças eletromotrizes induzidas (FEM).
3. Análise da linha exposta: a estrutura interferida, ou circuito vítima, é subdividida em segmentos (vãos ou seções). A força eletromotriz total calculada na etapa anterior, o potencial no espaço (por acoplamento capacitivo com a linha exposta) e a elevação de potencial no solo causada pelas correntes nas torres são determinadas em cada segmento. Grandezas elétricas em cada segmento, tais como elevação de potencial do solo, correntes longitudinais e correntes de fuga são determinadas por um modelo de circuito  $\pi$  recursivo, considerando as impedâncias em série e as admitâncias *shunt* de todos os segmentos.

Foram construídos diversos modelos de simulação, um para cada linha de transmissão que atua sobre a estrutura estudada. Uma vez que a linha exposta é considerada como um circuito elétrico linear, o princípio da superposição é aplicável, sendo os perfis resultantes correspondentes ao somatório das contribuições individuais de cada linha de transmissão.

As características geométricas do gasoduto e das linhas de transmissão interferentes foram obtidas dos Projetos Executivos e “*As-Built*”. Os parâmetros elétricos foram fornecidos pelas respectivas concessionárias envolvidas.

As medições de resistividade elétrica do solo são provenientes da etapa de projeto do duto e foram realizadas pelo método dos quatro pinos (Wenner) em conformidade com o disposto na norma ABNT NBR-7117 [11], em intervalos regulares, com eletrodos espaçados de: 1,5 m; 3,0 m; 4,5 m e 6,0 m.

Os valores de potencial eletroquímico tubo-solo AC foram determinados em campo pelas equipes de inspeções periódicas, sendo as medições realizadas em relação ao eletrodo de Cobre / Sulfato de Cobre ( $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ ), posicionado sobre a geratriz do duto.

Os parâmetros relevantes para construção dos modelos de simulação são condensados no tópico seguinte.

### Descrição geral do caso e premissas de cálculo

O gasoduto objeto de estudo é em aço carbono API 5L, possui aproximadamente 41 km de extensão e diâmetro 8", conforme descrito na Tabela 2. O traçado do duto é ilustrado na Figura 3, se aproximando de uma subestação de distribuição em 138 kV e linhas de transmissão de energia elétrica em 138 kV e 345 kV, em diversos casos de cruzamentos e/ou paralelismos. O comprimento de paralelismo mais significativo é com a LT de 345 kV, representada em destaque na figura.

Tabela 2 - Características do gasoduto

Resistividade do aço	Permeabilidade magnética do aço	Resistividade do revestimento	Espessura do revestimento	Profundidade geratriz
$1,72 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$	$3,77 \times 10^{-4} \text{ H/m}$	$10^8 \Omega \cdot \text{m}$	3,0 mm	1,2 ~ 1,5 m

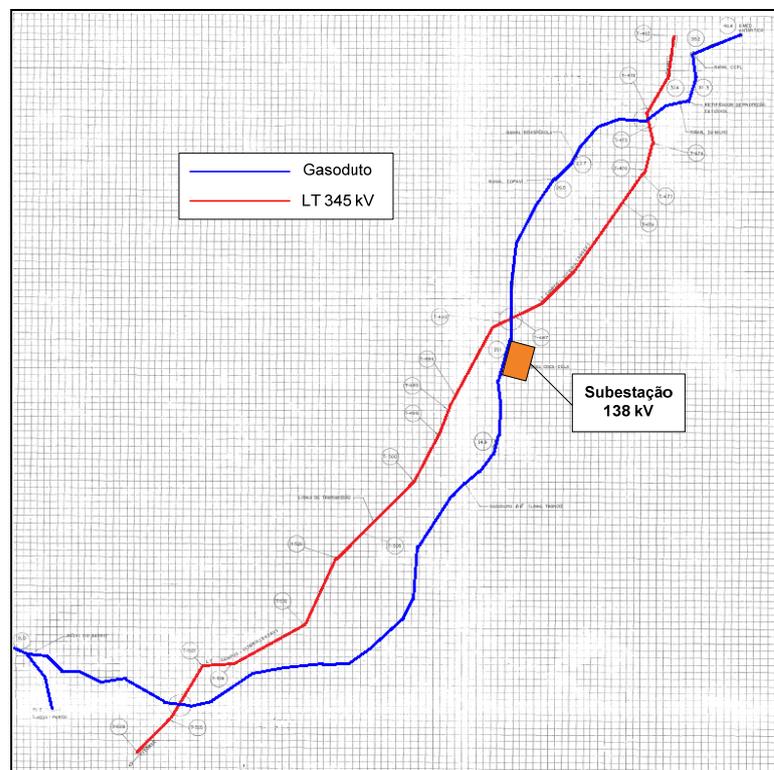


Figura 3 - Visão geral do gasoduto em estudo e fontes de interferência

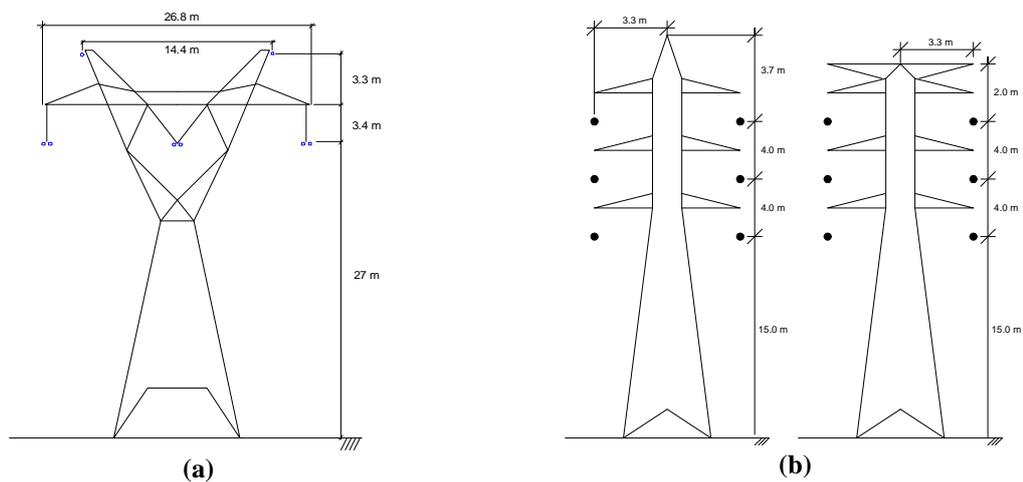
Os parâmetros de interesse dos condutores e correntes de carregamento das linhas de transmissão são sumarizados, respectivamente, nas Tabelas 3 e 4. A silhueta típica das torres interferentes é apresentada na Figura 4.

**Tabela 3 - Características dos condutores das linhas de transmissão**

Conductor(es)	Raio externo	Raio interno	Resistividade elétrica	Permeabilidade magnética
Fase	0,0148 m	0,003696 m	$3,94 \times 10^{-8} \Omega.m$	$1,18 \times 10^{-6} H/m$
Pára-raios	0,004572 m	0,001524 m	$2,44 \times 10^{-7} \Omega.m$	$6,47 \times 10^{-5} H/m$

**Tabela 4 - Correntes de carregamento nas LTs, em função da classe de tensão**

Linha de transmissão	Corrente nominal
345 kV	1746 A
138 kV	751 A



**Figura 4 - Silhueta típica das torres: (a) 345 kV, (b) 138 kV**

Os valores de resistividade elétrica do solo ao longo dos diversos pontos de afloramento do duto são expressos na Tabela 5. O gasoduto é catódicamente protegido por um conjunto retificador / leito de anodos e possui juntas de isolamento elétrico em suas extremidades.

Após a pré-operação do duto, foram registrados potenciais tubo-solo AC superiores a 20 V, em condições normais de operação das linhas de transmissão.

Posteriormente, foram detectados defeitos no revestimento do duto por meio de técnicas de inspeção indireta, com perdas de espessura localizadas e pites com morfologia alveolar. O problema foi investigado mais profundamente com uso de sondas e cupons de corrosão, tendo-se comprovado que a degradação do metal foi causada por correntes AC.

Os defeitos encontrados foram reparados e, como estratégia de mitigação de potenciais AC, o gasoduto foi aterrado em diversos pontos ao longo do traçado, com instalação de leitos de

anodos galvânicos de magnésio, nas posições indicadas na Tabela 5 - Resistividades elétricas do solo ao longo do gasoduto

Ponto de medição	Resistividade do solo
1	300,0 $\Omega$ .m
2	440,0 $\Omega$ .m
3	150,0 $\Omega$ .m
4	120,0 $\Omega$ .m
5	290,0 $\Omega$ .m
6	80,0 $\Omega$ .m
7	80,0 $\Omega$ .m
8	130,0 $\Omega$ .m
9	280,0 $\Omega$ .m

Tabela 6.

Tabela 5 - Resistividades elétricas do solo ao longo do gasoduto

Ponto de medição	Resistividade do solo
1	300,0 $\Omega$ .m
2	440,0 $\Omega$ .m
3	150,0 $\Omega$ .m
4	120,0 $\Omega$ .m
5	290,0 $\Omega$ .m
6	80,0 $\Omega$ .m
7	80,0 $\Omega$ .m
8	130,0 $\Omega$ .m
9	280,0 $\Omega$ .m

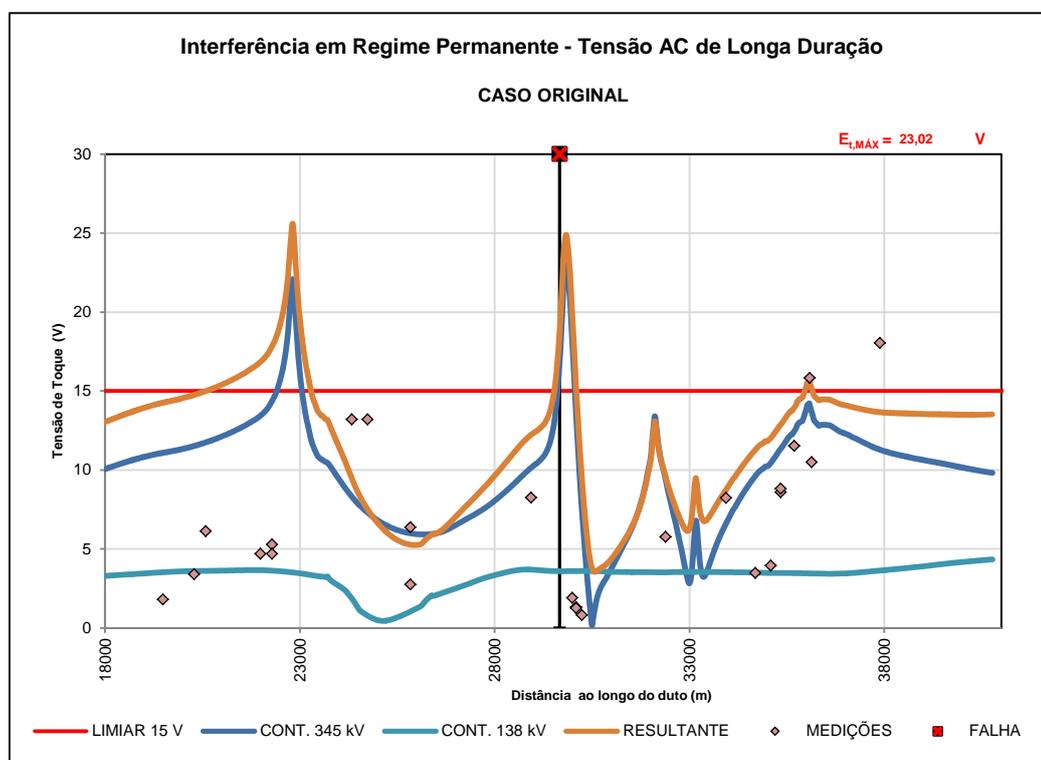
Tabela 6 - Posições dos anodos para mitigação dos potenciais AC

Ponto de aterramento	Posição ao longo da geratriz
1	22.400,0 m
2	22.700,0 m
3	26.450,0 m
4	26.850,0 m
5	27.950,0 m
6	32.200,0 m
7	32.350,0 m

8	34.500,0 m
9	36.050,0 m
10	36.800,0 m
11	37.200,0 m
12	37.450,0 m
13	38.250,0 m

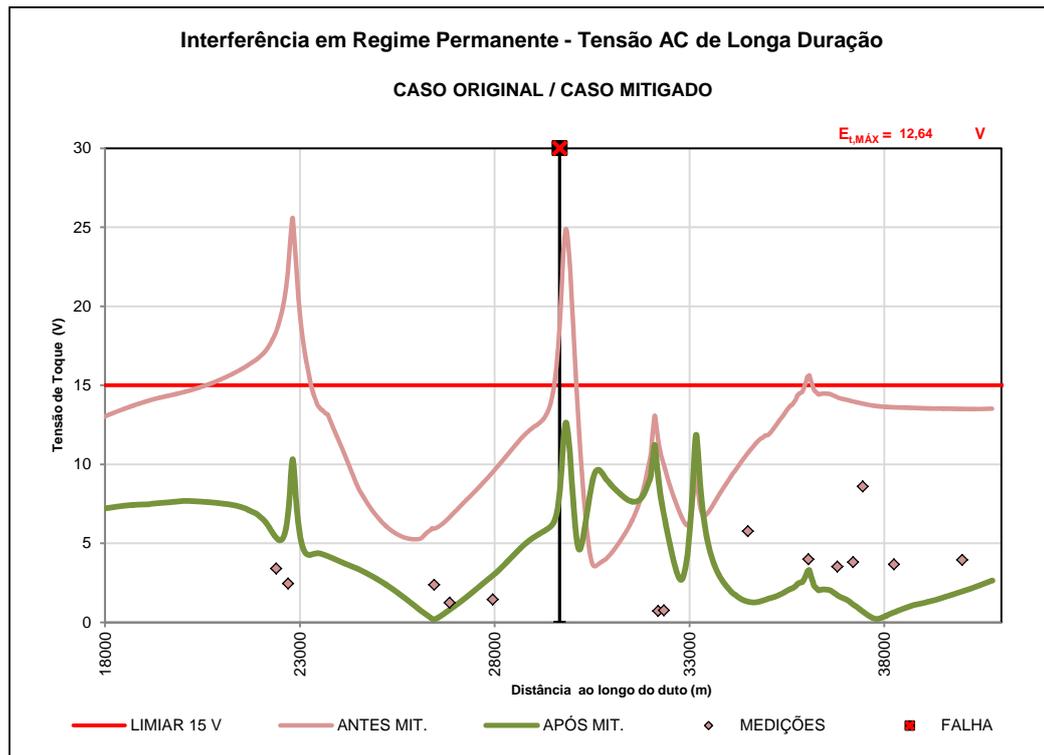
## Resultados e discussão

Os perfis de tensão de longa duração em regime permanente para o caso original, isto é, sem as mitigações, são apresentados na Figura 5. São destacadas as contribuições parciais da linha de transmissão de 345 kV e sobreposição das contribuições das linhas de 138 kV, bem como a tensão resultante. São indicados o limiar de 15 V, as leituras nos pontos de medição do gasoduto e a posição de um dos defeitos (com corrosão AC) encontrados.



**Figura 5 - Distribuição de tensões AC em regime permanente para o caso original**

O perfil de tensão AC resultante na presença das mitigações adotadas, é exposto na Figura 6, juntamente com os valores medidos em campo. Para melhor visualização, são sobrepostas as curvas correspondentes a antes e depois do aterramento do duto.



**Figura 6 - Distribuição de tensões AC em regime permanente para o caso mitigado**

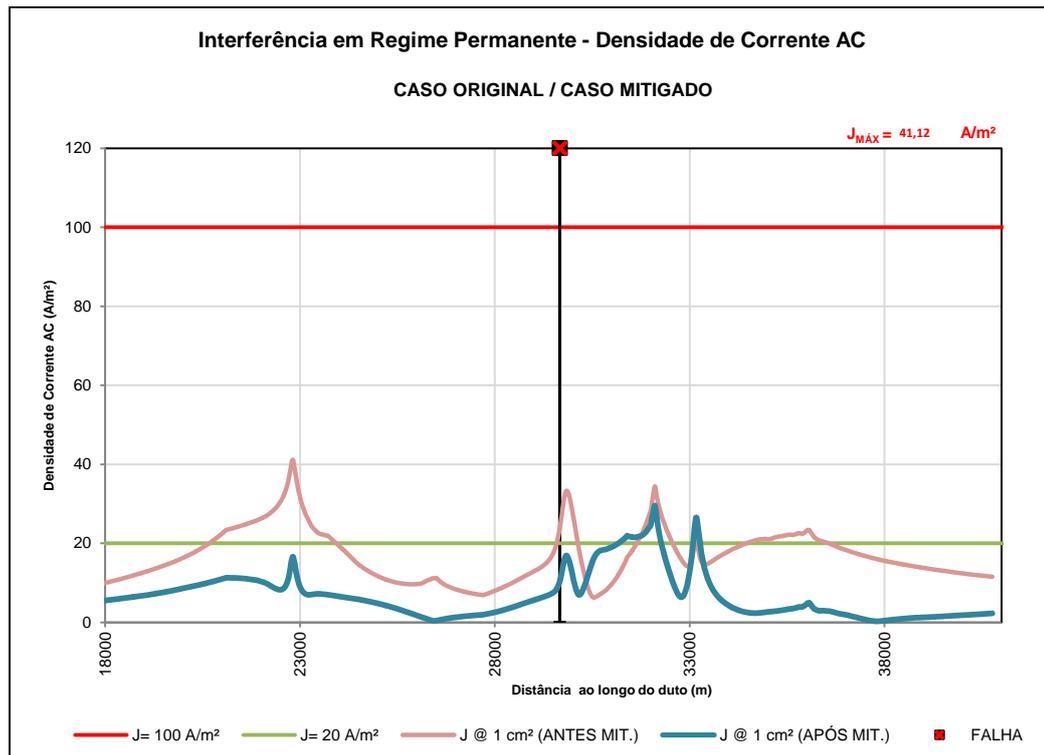
A Figura 5 indica que o acoplamento indutivo é determinado predominantemente pela LT de 345 kV, que dirige o formato da curva resultante, o que se confirma pela comparação com a planta de visão geral contida na Figura 3. Picos de tensão ocorrem nos pontos de cruzamento entre a LT e o gasoduto, o que concorda com a teoria de indução eletromagnética.

É importante registrar que as distâncias de separação entre a LT e o duto chegam a ser superiores a 3 km, valor considerado alto, porém inferior ao comprimento total da exposição, que é da ordem de 30 km, e que em tais condições foram verificadas violações ao critério de segurança de 15 V e, inclusive, corrosão por correntes alternadas. Isto denota que valores significativos de tensão AC ocorrem quando  $L$  (comprimento da exposição)  $\gg d$  (separação entre as estruturas).

O perfil mitigado (Figura 6) esclarece que o aterramento nas extremidades da estrutura interferida produz o efeito de reduzir o valor médio da curva de tensão resultante. A distribuição de anodos ao longo do encaminhamento do duto resulta na atenuação dos picos nas proximidades dos cruzamentos, como confirmado pelas leituras em campo, antes e depois das mitigações.

As divergências entre os valores teóricos e os verificados em campo são explicadas pelas variações de resistividade do solo ao longo do encaminhamento do duto e, também, pelas condições sazonais em que foram realizadas as leituras nos pontos de teste. De maneira geral, existe boa correlação entre a resposta das simulações e as medições, o que sugere que os resultados obtidos podem ser adotados como referência válida para análises mais aprofundadas de densidades de corrente AC.

Os perfis prováveis de densidades de corrente AC fluindo por um defeito circular com área de seção igual a  $1,0 \text{ cm}^2$ , modelado conforme a equação (1), nas condições de antes e depois das mitigações, são apresentados na Figura 7.



**Figura 7 - Distribuição de densidades de corrente AC, antes e depois das mitigações**

As curvas de densidade de corrente atingem picos situados na faixa entre 20 e 100 A / m<sup>2</sup>, valores que, de acordo com os critérios resumidos na Tabela 1, configuram probabilidade moderada de ocorrência de corrosão. No caso em pauta foram registradas ocorrências de corrosão AC para tensões da ordem de 16 V e densidades de corrente próximas a 24 A / m<sup>2</sup>, correspondentes ao ponto destacado nos gráficos e evidenciado na Figura 8. O processo corrosivo foi passivado quando os níveis de tensão no duto foram reduzidos a valores inferiores a 10 V.



**Figura 8 - Registro de corrosão AC no local indicado nos gráficos**

Estes resultados sugerem uma insuficiência no critério proposto pelo TG-327 como mecanismo de predição do fenômeno da corrosão AC, o que reforça o parecer de outros autores [5-8]. Referenciar a análise a um defeito circular com área igual a 1,0 cm<sup>2</sup>, sem

---

considerar suas dimensões efetivas, também parece superficial, uma vez que, como demonstrado analiticamente na equação (2), a relação entre o raio de um defeito e espessura do revestimento influencia consideravelmente a resposta para densidade de corrente.

Persistindo a lacuna de um limiar bem definido a partir do qual a corrosão AC ocorre, o uso de simulações computacionais se mostra como instrumento de grande utilidade para identificação de regiões potencialmente problemáticas. Se combinado com outras ferramentas, por exemplo, o ECDA (inspeções indiretas de revestimento), é possível detectar precocemente a existência de pontos sujeitos a degradação por influência de correntes alternadas, para adoção em tempo hábil de ações corretivas.

### **Conclusões**

---

Foi descrito um caso de interferências eletromagnéticas sobre um gasoduto em aço carbono, 41 quilômetros de extensão e diâmetro 8", exposto a influências de linhas de transmissão de energia elétrica em 345 kV e 138 kV, operando em condições normais. No caso estudado, foram verificadas tensões AC induzidas no duto superiores a 20 V e ocorrências de falhas no revestimento, com perdas de espessura causadas por correntes alternadas.

O problema foi analisado por meio de simulações computacionais de acoplamento indutivo em regime permanente, utilizando o software CDEGS, objetivando identificar regiões críticas e evidenciar as causas e parâmetros relevantes na resposta para tensões tubo-solo e densidades de corrente AC. Observou-se que os resultados medidos em campo concordam com os perfis de tensão calculados por meio dos algoritmos de simulação, com forte predominância do acoplamento magnético com a LT de 345 kV no perfil de tensão resultante. O uso de pontos de aterramento distribuídos (anodos de magnésio) como solução de mitigação se demonstrou eficaz para neutralização do problema em regime permanente.

A aplicação do modelo preditivo descrito no relatório técnico NACE TG-327, para densidades de corrente sobre um defeito com 1 cm<sup>2</sup> de superfície, se mostrou insuficiente para determinar com precisão a probabilidade de corrosão AC, posto que verificadas ocorrências em locais com tensão da ordem de 16 V e densidade de corrente 24 A / m<sup>2</sup>.

Demonstrou-se que a utilização de modelos de simulação computacional é confiável e eficaz para a abordagem da problemática da corrosão AC, no sentido de que resulta em perfis contínuos de tensão entre a estrutura interferida e o solo adjacente. Com apoio desta ferramenta, é possível identificar regiões potencialmente problemáticas para investigação complementar e monitoramento de integridade. Da mesma forma, viabiliza a validação prévia de soluções de mitigação, resultando em projetos mais eficientes e econômicos, uma vez que o foco é deslocado para as regiões que efetivamente requerem a atenção do responsável pelo duto.

### **Referências bibliográficas**

---

- [1] J. R. CARSON, 1926, **Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return**, Bell Syst, Tech. J., No. 5, pp. 539-554.
- [2] CIGRÉ, **Working Group 36.02: Electromagnetic Compatibility with Telecommunication Circuits, Low Voltage Networks and Metallic Structures**, 1995, CIGRÉ, Paris, FR.
- [3] NACE TG-237, **AC Corrosion State-of-the-Art: Corrosion Rate, Mechanism, and Mitigation Requirements**, 2007, NACE International, Houston, TX, No. 35110.

- 
- [4] Y. HOSOKAWA, **Overcoming the New Threat to Pipeline Integrity – AC Corrosion Assessment and its Mitigation**, 2006, 23<sup>rd</sup> World Gas Conference, Amsterdam, No. 9831.
- [5] J. A. C. ALBERTINI, **Estudo da Influência da Corrente Alternada na Corrosão em Dutos Metálicos Enterrados**, 2008, Instituto Mauá, São Caetano do Sul, SP, IMT – CEUN, 95p.
- [6] CEOCOR, **A.C. Corrosion on cathodically protected pipelines. Guidelines for risk assessment and mitigation measures**. APCE Association for the Protection against Electrolytic Corrosion, 2001.
- [7] I. RAGAUT, 1998, **AC Corrosion Induced by VHV Electrical Lines on Polyethylene Coated Steel Gas Pipelines**, CORROSION/98, NACE, Houston, TX, No. 557.
- [8] R. M. BASS, F. P. DAWALIBI, Y. LI, S. FORTIN, H. ZHOU, **Investigation of AC Leakage Current Density in Electrically Heated Subsea Pipelines as a Function of Pipeline Parameters**, 2013, CDEGS Users’ Group Conference Proceedings.
- [9] F. P. DAWALIBI, F. DONOSO, 1993, **Integrated Analysis Software for Grouding, EMF and EMI**, IEEE Computer Applications in Power, Vol. 6, No. 2, pp. 19-24.
- [10] S. FORTIN, W. RUAN and F. P. DAWALIBI, 2004, **Comparison of Computational Methods for the Design and Analysis of Power System Grounding: Parametric Analysis**, Proceedings of the Seventh IASTED International Conference on Power and Energy Systems, Clearwater Beach, FL, USA, November 28 - December 1, pp. 357-363.
- [11] ABNT, **NBR-7117: Medição de resistividade do solo pelo método dos quatro pontos (Wenner)**, Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [12] DERI, A., TEVAN, G., SEMLYEN, A., et al., 1981, **The Complex Ground Return Plane: A Simplified Model for Homogeneous and Multi-Layer Earth Return**, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. 100, n. 8 (Aug), pp. 3686–93.