



GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO - GLT

INSPEÇÃO DE FUNDAÇÕES DE TORRES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO PELA TÉCNICA DE INJEÇÃO DE CORRENTE

ELBER VIDIGAL BENDINELLI⁽¹⁾; ALBERTO PIRES ORDINE⁽¹⁾; GERSON VALE DE RESENDE⁽²⁾

CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA CEPEL⁽¹⁾; FURNAS-CENTRAIS ELETRICAS S. A.⁽²⁾

RESUMO

A maior parte das linhas de transmissão do país tem mais de 30 anos de serviço, e muitas delas vêm sofrendo com o processo corrosivo avançado. No presente trabalho, são apresentados resultados de inspeções em campo, para avaliação da confiabilidade da técnica na determinação do grau de degradação de fundações de linhas de transmissão de Furnas e da CGT Eletrosul. Após o diagnóstico emitido pela ferramenta de inspeção FidCorr, o resultado foi comparado com a inspeção visual realizada após a escavação. A FidCorr foi efetiva em 10 do total de 11 torres inspecionadas, nas quais os seus resultados e aqueles da inspeção visual foram convergentes.

PALAVRAS-CHAVE: inspeção, fundações, técnica eletroquímica, redução de custos.

1.0 INTRODUÇÃO

A confiabilidade do sistema de transmissão de energia elétrica é essencial no mundo moderno, principalmente no Brasil onde a energia percorre grandes distâncias entre as usinas e os centros de cargas consumidores. Além disso, a maior parte das linhas de transmissão do país tem mais de 30 anos de serviço, e muitas delas vêm sofrendo com o processo corrosivo avançado. As falhas relacionadas com corrosão em componentes de linhas de transmissão somam milhares de reais em custos de manutenção, além de outros gastos relacionados com a indisponibilidade dos ativos. Nesse contexto, destaca-se ainda que a corrosão dos pés de torres de linhas de transmissão pode ser responsável pela interrupção no sistema de transmissão de energia [1].

O fato de os pés de torres estarem enterrados dificulta muito a inspeção, a verificação da integridade estrutural do material metálico e a avaliação do real estado de corrosão do aço galvanizado. A inexatidão destas informações somada a fatores climáticos e aceleradores de processos corrosivos está diretamente relacionada com a queda de torres de linhas de transmissão, conforme comprovado em casos de perícias técnicas conduzidas pela equipe da área de Corrosão do Cepel [2].

Geralmente, nas ocorrências registradas, o colapso de uma torre pode provocar danos em torres vizinhas e acarretar a suspensão do abastecimento de energia elétrica em certas localidades, representando um aumento de custos diretos para as empresas do setor elétrico. Como os recursos anuais para substituição e manutenção de ativos são limitados, as empresas necessitam de estratégias e técnicas de manutenção para estender a vida útil das suas linhas de transmissão.

Atualmente as empresas Eletrobras tem aproximadamente 48.000 Km, cerca de 96.000 torres, 384.000 pés de torres que possuem mais 20 anos de vida operacional, aproximadamente 70 % das torres do sistema Eletrobras. Nessas condições, o aço galvanizado original já cumpriu o seu papel de proteção anticorrosiva do aço carbono (base), sendo necessárias inspeções rotineiras para avaliar o grau de corrosão das fundações. Nesse contexto, é urgente a utilização de ferramentas e instrumentação mais ágeis e precisas para encarar o desafio de inspecionar e evitar falhas de um backlog enorme de fundações de linhas de transmissão pertencente ao sistema Eletrobras.

Atualmente, na grande maioria das empresas do setor elétrico utiliza-se a técnica de escavação associada com a amostragem de torres para a inspeção de fundações. Entretanto, o procedimento de amostragem apresenta pouca confiabilidade para a inspeção técnica. Empregando-se tal procedimento, pode-se deixar de avaliar torres que estejam com grau de corrosão em estágio avançado. Além disso, a escavação apresenta baixa produtividade e acarreta gastos excessivos com pessoal, pela mobilização de equipes numerosas.

Dessa forma, a área de Corrosão do Cepel, em parceria técnica com as Empresas Eletrobras, vem pesquisando técnicas para o diagnóstico do estado de corrosão de estruturas enterradas de linhas de transmissão. Esta técnica pode ser utilizada como ferramenta para monitorar o processo corrosivo de estruturas enterradas, permitindo-se estabelecer prioridades na recuperação das fundações, de forma mais assertiva do que com o emprego de escavação [3, 4, 5].

No presente trabalho, são apresentados resultados de inspeções em campo, para avaliação da confiabilidade da técnica na determinação do grau de degradação de fundações de linhas de transmissão de Furnas e da CGT

Eletrosul. Foi utilizado um software desenvolvido pelo Cepel chamado FiCorr – Ferramenta de Inspeção e Diagnóstico de Corrosão.

O uso sistemático da FidCorr pelas equipes de manutenção permite a criação de um banco de dados com o histórico do comportamento de cada torre ao longo do tempo. O que torna a atuação das equipes de manutenção mais precisa, evitando que a fundação seja comprometida pelo processo corrosivo.

2.0 OBJETIVO

O objetivo principal desse trabalho foi desenvolver uma ferramenta (software) capaz de realizar diagnóstico confiável, rápido e preciso do real grau de corrosão da fundação indicando quando a manutenção deve ser realizada para evitar fraturas na fundação.

3.0 METODOLOGIA

3.1 DESENVOLVIMENTO DA TÉCNICA

A ferramenta foi desenvolvida com base em sólidos fundamentos de corrosão e de processos eletroquímicos em solo, e em conhecimento e experiência técnica de anos de pesquisa da equipe da área de Corrosão do Cepel. Usando uma técnica conhecida por injeção de corrente, a grande inovação e diferencial da ferramenta foi construir uma relação matemática, que nem sempre é linear, entre o percentual de área corroída da estrutura enterrada e a densidade de corrente medida, com base em pulsos de corrente aplicados à estrutura por uma fonte. Em segundo passo, foi determinar critérios e faixas para o grau de corrosão das fundações. Por fim, implementar a técnica de injeção de corrente com o desenvolvimento do software FidCorr, que permite fazer a coleta e tratamento dos dados obtidos em campo durante as inspeções.

Confirmado o suporte teórico fundamental para o uso da injeção de corrente em fundações, foram realizados testes em escala de laboratório. Em seguida, foi desenvolvida uma instrumentação piloto para testes em escala reduzida no solo do Cepel. E por fim, a metodologia foi validada por meio de testes em ambiente real e de campo em linhas de transmissão de Furnas e da CGT Eletrosul. A Figura 1 resume o processo de desenvolvimento da ferramenta pela área de Corrosão do Cepel.



Figura 1 – Etapas da evolução da ferramenta FidCorr.

3.2 INSPEÇÃO EM CAMPO

Durante a inspeção nas linhas de transmissão de Furnas, foram avaliadas seis torres das LT Campos – Rocha Leão, Campos – Cachoeiro de Itapemirim e Campos – Macaé. Na CGT Eletrosul, foram inspecionadas cinco torres da LT Farroupilha – Monte Claro I. A Tabela 1 apresenta a listagem das torres inspecionadas durante a etapa de trabalho de campo.

TABELA 1. Relação de linhas de transmissão e respectivas torres inspecionadas.

| Empresa | Linhas de transmissão (LT) | Torre | Idade da torre (anos) |
|---------------|---|-------|-----------------------|
| FURNAS | Campos – Rocha Leão 138 kV | 198 | 45 |
| | Campos – Rocha Leão 138 kV | 277 | 45 |
| | Campos – Rocha Leão 138 kV | 252 | 45 |
| | Campos – Cachoeiro de Itapemirim 138 kV | 27 | 45 |
| | Campos – Macaé 345 kV | 652 | 41 |
| | Campos – Macaé 345 kV | 649 | 41 |
| CGT ELETROSUL | Farroupilha – Monte Claro I 230 kV | 58 | 47 |
| | | 56 | |
| | | 52 | |
| | | 50 | |
| | | 48 | |

Na Figura 2, pode-se observar uma ilustração esquemática da montagem experimental utilizada na aplicação da FidCorr. Essa montagem foi reproduzida fielmente em campo, onde: WE – eletrodo de trabalho (pé da torre); CE – contra eletrodos de aço galvanizado; RE – eletrodo de referência de cobre-sulfato de cobre.

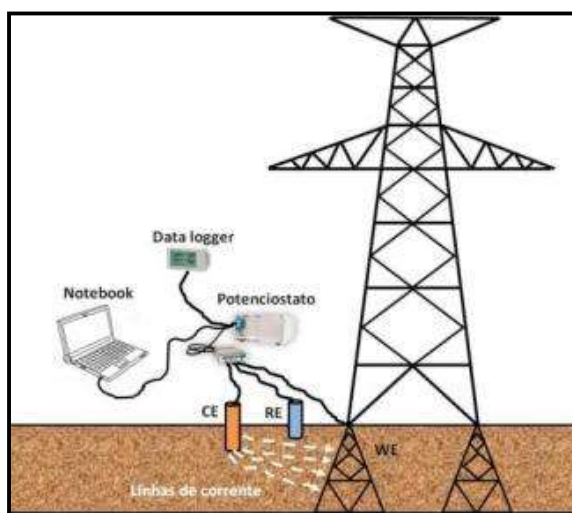


Figura 2 - Ilustração esquemática da montagem experimental utilizada na aplicação da inspeção, onde: WE – eletrodo de trabalho (pé da torre); CE – contra eletrodos de aço galvanizado; RE – eletrodo de referência de cobre-sulfato de cobre.

A Figura 3 exibe como o circuito da célula eletroquímica de três eletrodos foi montado para o ensaio em campo, onde se observam: o pé da torre (WE); três das quatro hastes de aço galvanizado (CE), instaladas ao redor do pé da torre

(a quarta haste encontra-se atrás do pé da torre), formando um losango; e o eletrodo de referência (RE). Foi necessário fazer um lixamento leve para a melhora do contato elétrico entre a torre e o conector.

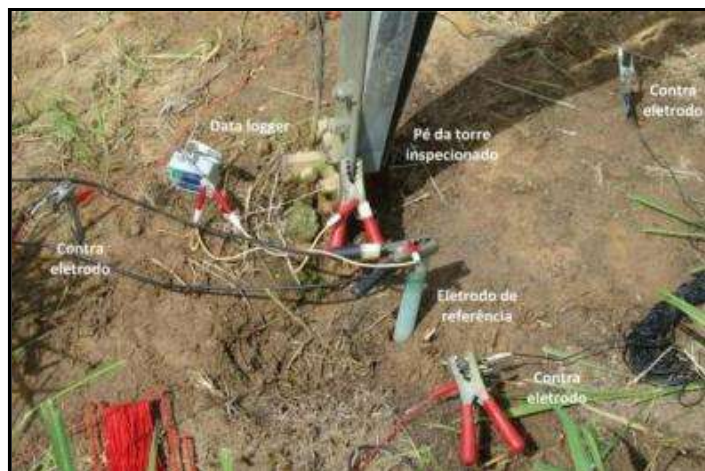


Figura 3 - Montagem experimental utilizada na aplicação da FidCorr.

Para a aplicação da metodologia desenvolvida é necessário conhecer a área da estrutura que se encontra enterrada. Esse valor foi obtido através das cotas presentes no desenho de projeto da torre, fornecido pela CGT Eletrosul e por Furnas. Os cabos contrapeso foram desconectados do pé da torre antes da realização das medidas. Este procedimento foi importante para evitar que a malha de aterramento influenciasse nas medidas.

Após a montagem dos eletrodos em torno do pé da torre, os mesmos foram conectados ao potenciostato *Field Machine*, por meio de uma caixa adaptadora de conexões elétricas. Antes de iniciar a injeção dos pulsos de corrente, foi adicionada água no solo, com o objetivo de melhorar sua condutividade elétrica e permitir a aplicação da referida técnica. Sem isso, torna-se difícil aplicar técnicas eletroquímicas em solo devido à sua alta resistividade elétrica.

Enquanto era realizada a mediação na torre inspecionada, registrava-se o potencial de circuito aberto (OCP) de uma placa de aço galvanizado, levada para campo com essa finalidade. A medida de OCP do aço galvanizado sem corrosão e em bom estado de conservação é muito importante, pois serve de referência para o tratamento de dados das medidas nos pés das torres. Foi realizada a leitura do OCP, diretamente no multímetro, na escala adequada, após as devidas conexões.

Após a aplicação da técnica, foi realizada uma modelagem matemática baseada em um modelo empírico para obtenção dos coeficientes da reta que melhor descrevem esses pontos experimentais.

4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2, encontra-se a classificação dos graus de corrosão do aço galvanizado enterrado, resultante da etapa de laboratório deste projeto. Esta tabela foi obtida variando-se a relação de área de aço carbono e de zinco nos corpos de prova. Neste contexto, foi possível observar uma faixa de densidade de corrente característica para cada razão de área de aço carbono e de zinco. Esta tabela vai auxiliar na classificação das fundações inspecionadas de acordo com a densidade de corrente obtida em cada situação.

Tabela 2. Classificação para os graus de corrosão do aço galvanizado enterrado.

| Estado de corrosão do aço galvanizado enterrado nas fundações de torres | Densidade de corrente extrapolada para o aço galvanizado novo (mA/cm ²) |
|---|---|
| 100% da área com camada de zinco preservada | $j > 0,0$ |
| Entre 100% e 75% da área com camada de zinco preservada e apresentando mecanismo atuante de proteção catódica | $0,00 > j > -0,050$ |
| 50% da área com camada de zinco e 50% da área com aço carbono exposto | $-0,050 > j > -0,100$ |

| | |
|---|-----------------------|
| 25% da área com camada de zinco e 75% da área com aço carbono exposto | $-0,100 > j > -0,155$ |
| 100% da área com aço carbono exposto e ausência completa da camada de zinco | $j < -0,155$ |

j - densidade de corrente determinada através da técnica de injeção de corrente

Na Tabela 3, encontra-se um resumo dos resultados obtidos após a inspeção das torres disponibilizadas por Furnas e pela CGT Eletrosul. Os resultados obtidos foram classificados em convergentes, aqueles em que os diagnósticos obtidos pela injeção de corrente e pela inspeção visual foram equivalentes entre si, e divergentes, aqueles em que as duas técnicas apresentaram diagnósticos distintos.

Tabela 3. Comparação entre os resultados obtidos pela técnica de injeção de corrente e pela inspeção visual.

| LT | Torres | Diagnóstico pela injeção de corrente | Diagnóstico por inspeção visual | Comparação entre as técnicas |
|---|--------|---|--|------------------------------|
| Campos – Rocha Leão 138 kV | 198 | 100% de área de aço carbono | 100% de área de aço carbono | Convergente |
| | 277 | 100% de área de aço carbono | Não foi possível fazer a escavação | - |
| | 252 | 100% de área de aço carbono | 100% de área de aço carbono | Convergente |
| Campos – Cachoeiro de Itapemirim 138 kV | 27 | 50% de área de aço carbono e 50% de área de zinco | Presença de camada de zinco na superfície | Convergente |
| | 27 | 100% de área de zinco | Fundação recente com apenas 1 ano de instalação | Convergente |
| | 652 | 50% de área de aço carbono e 50% de área de zinco | Não foi possível observar zinco na região escavada | Divergente |
| | 649 | 100% de área de aço carbono | 100% de área de aço carbono | Convergente |
| Farroupilha – Monte Claro I 230 kV | 58 | 25% de área de aço carbono e 75% de área de zinco | 25% de área de aço carbono e 75% de área de zinco | Convergente |
| | 56 | 25% de área de aço carbono e 75% de área de zinco | 25% de área de aço carbono e 75% de área de zinco | Convergente |
| | 50 | 50% de área de aço carbono e 50% de área de zinco | 50% de área de aço carbono e 50% de área de zinco | Convergente |

| | | | | |
|--|----|---|---|-------------|
| | 48 | 50% de área de aço carbono e 50% de área de zinco | 50% de área de aço carbono e 50% de área de zinco | Convergente |
|--|----|---|---|-------------|

As Figuras 4 e 5 exibem o aspecto visual do aço galvanizado de algumas das torres da CGT Eletrosul e de Furnas, respectivamente. Na Figura 4 pode-se observar que ambos os pés das torres estão com aspecto de superfície similar, com grande parte de superfície ainda coberta com zinco (áreas cinzas) e poucas áreas com aço carbono exposto (áreas alaranjadas). Não houve perda significativa de massa nos perfis da torre, indicando baixo consumo do aço carbono, apenas do zinco. Esse resultado está de acordo Tabela 3.



Figura 4 – Aspecto visual do aço galvanizado enterrado de algumas torres inspecionadas na CGT Eletrosul.

Na Figura 5 pode-se observar que ambos os pés das torres estão com aspecto de superfície muito similar, observa-se aço carbono exposto sem a presença de zinco nas partes enterradas, indicando que todo o zinco foi consumido. Em alguns perfis houve perda significativa de massa de aço carbono, podendo prejudicar a integridade estrutural da fundação, sendo necessária manutenção corretiva o quanto antes. Esse resultado está de acordo com a Tabela 3.



Figura 5 – Aspecto visual do aço galvanizado enterrado de algumas torres inspecionadas em Furnas.

Não há dúvidas de que a técnica de injeção de corrente pode ser uma ferramenta muito eficiente na otimização do processo de inspeção de fundações de linhas de transmissão, evitando gastos excessivos na manutenção preventiva e danos maiores, tais como: quedas de torres por corrosão e desligamento de linhas de transmissão.

5.0 CUSTO-BENEFÍCIO

Considerando o modelo atual de inspeção por escavação manual, normalmente utiliza-se uma equipe de 6 pessoas (4 ajudantes de escavação, 1 técnico de linhas de transmissão, de manutenção ou encarregado e 1 motorista) para realização do processo de inspeção via escavação de fundações de linha de transmissão e uma produtividade média

de 2,0 torres por dia. Além disso, estimando que para escavar cada pé de torre são necessários remover 10 m³ de solo a um custo médio de R\$ 100/m³ escavado, o total necessário para inspecionar todo o backlog de torres (96.000 torres) será em torno de R\$ 384 milhões.

Como o processo de inspeção do backlog de torres do sistema Eletrobras exige um investimento alto, na prática, trabalha-se com amostragem. Neste caso, podem acontecer casos de falhas e quedas de torres devido a erros no processo de amostragem e variações significativos nos tipos e parâmetros físico-químicos dos solos.

A FidCorr necessita de uma equipe de 3 pessoas (1 ajudante, 1 técnico de linhas de transmissão manutenção e 1 motorista) para inspecionar as fundações, ou seja, uma redução de 50 % na equipe necessária devido simplesmente a automatização do processo de inspeção. Além disso, a produtividade aumenta para 12 torres inspecionadas por dia, 600 % a mais de produtividade. O uso da ferramenta aprimora o processo de amostragem, permitindo inspecionar um número maior de torres e com mais precisão.

6.0 CONCLUSÕES

A FidCorr foi efetiva em 11 das 10 torres analisadas, em que seus resultados, comparados aos da inspeção visual foram convergentes. Apenas uma única torre apresentou divergência entre os resultados de ambas as técnicas, o que pode ter sido provocado pela não realização da escavação até a profundidade adequada, na inspeção visual.

Não há dúvida de que a ferramenta é útil e eficiente na otimização do processo de inspeção de fundações de linhas de transmissão, pois em 40 minutos é possível se obter um diagnóstico do real estado de corrosão de uma fundação.

O uso sistemático da técnica da ferramenta no futuro irá permitir a criação de um banco de dados com o histórico de avaliação de cada torre. Este tipo de acompanhamento irá permitir a atuação mais precisa das equipes de manutenção no momento ideal, antes da perda de espessura dos perfis da fundação, evitando que a fundação seja comprometida pelo processo corrosivo.

7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. SERRA, E. T. "Corrosão e proteção anticorrosiva dos metais no solo", 1ª Edição, CEPEL, 2006.
2. BENDINELLI, E.; ORDINE, A. P. Desenvolvimento em laboratório e em escala piloto da técnica de injeção de corrente para inspeção de estruturas enterradas de linhas de transmissão - 3º Colóquio sobre materiais dielétricos e técnicas emergentes de ensaios e diagnóstico, 2018.
3. BENDINELLI, E.; ORDINE, A. P. Inspeção de fundações de torres de linhas de transmissão por técnica de injeção de corrente, XVIII ERIAC, Décimo Oitavo Encontro Regional Ibero-Americano do CIGRE, 2019.
4. BENDINELLI, E.; ORDINE, A. P. Inspeção de fundações de torres de linhas de transmissão por técnica de injeção de corrente. II Seminário de Corrosão do Setor Elétrico, 2018.
5. DIAS, J. V.; BENDINELLI, E. V. Técnica de injeção de corrente como ferramenta de inspeção de estruturas enterradas do setor elétrico. Anais do Congresso Internacional de Corrosão (INTERCORR), 2018.

8.0 DADOS BIOGRÁFICOS



Engenheiro Químico, graduado pela UFRRJ; Engenheiro de Processos CAE pelo PROMINP/UFF; Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela COPPE/UFRJ; Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela COPPE/UFRJ; Pesquisador concursado no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL). Responsável pelo Laboratório de Materiais e Mecânica do Cepel. Áreas de atuação: pesquisa e desenvolvimento de revestimentos anticorrosivos inteligentes, corrosão em solo, técnicas eletroquímicas, ensaios acelerados de corrosão, modelos de vida remanescente. Principais prêmios profissionais: I Olimpíada Eletrobras de Inovação, 2020. V Prêmio CREA-RJ de Trabalhos Científicos e Tecnológicos 2017, CREA; Prêmio INTERCORR 2014, ABRACO.

(2) ALBERTO PIRES ORDINE

Engenheiro químico pela UFRJ, Mestre e Doutor em Ciências, pela COPPE/UFRJ, na área de Corrosão. Atuou como professor universitário em cursos de engenharia, e como pesquisador na área de eletroquímica no Inmetro (2004 a 2006). Desde 2006, é pesquisador efetivo do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel, na área de corrosão. Foi gerente do Laboratório de Corrosão do Cepel (2001 a 2021) e em 2021, assumiu a função de Chefe de Departamento dos Laboratórios da unidade Fundação. É autor de, aproximadamente, 105 publicações, considerando artigos técnicos em revistas e em anais de congressos e seminários.

(3) GERSON VALE DE RESENDE

Engenheiro Eletricista, com ênfase em Eletrotécnica, formado pela Universidade Gama Filho em 1992, com pós-graduação no Curso de especialização em manutenção do sistema elétrico pela UNIFEI-MG em 2011, atuando na área de manutenção de linhas de transmissão em Furnas Centrais Elétricas S.A desde 10/01/2005 e na LIGHT Serviços de Eletricidade S.A, no período de 01.06.1994 até 10/01/2005. Atuou como Técnico em Eletrotécnica também na Light, no período de 01/05/1982 a 31/05/1994.