

Copyright 2012, ABRACO

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

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

Monitoramento do Estado de Corrosão das Grelhas Metálicas de Torres de Linhas de Transmissão de Energia Elétrica, Utilizando Técnicas Eletroquímicas
Mauro Zanini Sebrao^a, Alberto Pires Ordine^b, Renato Antonio de Oliveira^c

Abstract

The complexity of monitoring and evaluating the corrosion degree of the metallic buried grillage of the transmission line towers is a challenge for the maintenance teams of the electric sector, since it demands the opening of the foundations and the cleaning of the grillage, such activities involve plenty of labor, a long time and a high cost. Considering these facts, electrochemical techniques were studied such as corrosion potential, electrochemical noise and linear polarization resistance, besides the measurement of the soil resistivity, in order to assess the corrosion state of the metallic buried grillage, without the need of digging the tower legs. By the help of these techniques, Cepel and Eletronorte performed a technical inspection in the metallic grillage of 15 towers of the LT 230 kV Rio Verde-Rondonópolis-Coxipó located in the state of Mato Grosso. In addition, the tower legs were dug, aiming to confirm the results obtained by the electrochemical measurements through a visual inspection. This paper presents the methodology applied, the results obtained from the field inspections as well as the technical considerations. It was found that the usage of the electrochemical techniques, such as tools of evaluation, achieved a rightness degree above 95% in comparison to the visual observation.

Keywords: metallic grillage, soil corrosion, electrochemical techniques, hot-dip galvanizing, electric energy.

Resumo

A complexidade de monitorar e avaliar o grau de corrosão das grelhas metálicas enterradas de torres de linhas de transmissão é um desafio para as equipes de manutenção do setor elétrico, uma vez que exigem abertura das fundações e limpeza das grelhas, atividades estas que envolvem grande número de mão-de-obra, longo tempo e alto custo. Diante destes fatos, estudou-se técnicas eletroquímicas como potencial de eletrodo, ruído eletroquímico e resistência de polarização, além de medidas de resistividade do solo, como ferramentas de avaliação do estado, quanto à corrosão, das grelhas metálicas enterradas, sem a necessidade de cavar os pés das torres. Com o auxílio destas técnicas, o Cepel e a Eletronorte realizaram uma inspeção técnica nas grelhas metálicas de 15 torres da LT 230 kV Rio Verde-Rondonópolis-Coxipó situada no estado de Mato Grosso. Adicionalmente, cavou-se os pés das torres inspecionadas, visando confirmar os resultados obtidos pelas medições eletroquímicas através de uma inspeção visual. Este trabalho apresenta a metodologia empregada, os resultados obtidos das inspeções de campo e as considerações técnicas. Verificou-se que a utilização das técnicas eletroquímicas, como ferramentas de avaliação, alcançou um grau de acerto acima de 95% comparado à observação visual.

Palavras-chave: grelha metálica, corrosão pelo solo, técnicas eletroquímicas, aço zincado a quente, energia elétrica.

^a M.Sc., Engenheiro Metalúrgico – Eletrobras Cepel

^b D.Sc. Engenheiro Químico – Eletrobras Cepel

^c Engenheiro Eletricista – Eletrobras Eletronorte

1 - Introdução

A confiabilidade dos sistemas de transmissão de energia elétrica é essencial no mundo moderno. As falhas nos componentes das linhas de transmissão somam milhares de dólares só em custos de manutenção, além de outros relacionados. Muitas destas falhas estão associadas com a corrosão devido à exposição dos materiais do sistema elétrico em ambientes agressivos, como a atmosfera ou o solo. Uma destas falhas é a corrosão dos pés de torres que se encontram enterrados. O bom estado de conservação destes componentes é essencial, já que a sua desintegração metálica provocará o colapso da torre, muitas vezes acompanhada da queda de outras torres vizinhas, resultando na interrupção de energia elétrica, a qual está associada aos custos diretos (manutenção, reparo etc.) e indiretos (falta de energia elétrica doméstica, industrial e comercial).

Muitas das linhas de transmissão no Brasil foram construídas nas décadas de 60 e 70 e agora estão começando a mostrar efeitos de envelhecimento e corrosão. Podem-se substituir componentes de tempo em tempo, porém os recursos anuais são limitados, o que requer estratégias de programas de manutenção para estender sua vida útil.

O objetivo do presente trabalho foi o de determinar a possibilidade de aplicar técnicas eletroquímicas com resultados confiáveis para:

- Avaliar os pés das torres de linhas de transmissão e decidir sobre a necessidade ou não de escavação para realizar manutenção;
- Estabelecer uma metodologia de avaliação da condição dos pés das torres de linhas de transmissão; e
- Adotar uma ferramenta de prática comum para a tomada de decisões nos procedimentos de manutenção.

Com este propósito analisou-se o estado de corrosão das grelhas metálicas das torres da linha de transmissão 230 kV Rio Verde-Rondonópolis-Coxipó pertencente à Eletronorte, onde os resultados obtidos com a utilização das técnicas eletroquímicas como ferramentas de avaliação alcançaram um grau de acerto acima de 95% comparado à observação visual.

2 - Metodologia

Os pés das torres de linhas de transmissão estão enterrados no solo e, geralmente, são de aço zincado a quente, o que oferece boa proteção contra corrosão. Algumas vezes, estes se encontram embebidos em concreto que oferece proteção extra. A água e os sais penetram o solo ou então são encontrados neste e conseqüentemente causam corrosão e enfraquecimento do pé. A inspeção visual é o método tradicional de avaliação, o qual precisa de escavação que é lenta e cara. Uma alternativa seria utilizar técnicas eletroquímicas para avaliar a condição dos pés, as quais são simples e rápidas para aplicar e têm sido muito confiáveis na indústria petrolífera para avaliar tubos de dutos (1,2).

2.1 - Potencial eletroquímico

Uma medição eletroquímica muito comum é o potencial de corrosão. Este potencial é a tensão medida de um eletrodo corroendo-se livremente a circuito aberto em um eletrólito. Esta

tensão é medida com relação a um eletrodo de referência. Para compreender os mecanismos da corrosão, o potencial medido normalmente está relacionado com o potencial calculado a partir dos dados termodinâmicos, como por exemplo, aqueles dos diagramas de Pourbaix. Os pés novos de aço zincado a quente enterrados exibem um potencial abaixo de -0,8V em referência ao eletrodo de Cu/CuSO₄. Quando se perde o zincado, nova superfície exposta de aço apresentará um potencial entre -0,4V e -0,8V. O aço corroído apresenta uma camada dura de óxidos e produtos de corrosão e exibe potenciais acima de -0,4V.

2.2 - Resistência de polarização linear

Além da inspeção do potencial, uma técnica de polarização eletroquímica é usada para determinar a velocidade de corrosão galvânica. A técnica de resistência de polarização linear funciona fornecendo uma pequena corrente elétrica entre o pé da torre e um corpo-de-prova enterrado próximo ao pé da torre (cerca de um metro de distância). Esta corrente perturba os processos eletroquímicos em qualquer sitio com corrosão ativa e as variações resultantes de potencial são registradas com um eletrodo de referência de meia célula Cu/CuSO₄ em contato com o solo junto ao pé da torre em estudo. O nível de corrente obtida é mais intenso quanto maior a gravidade do processo de corrosão no processo.

2.3 - Ruído eletroquímico

O método de ruído eletroquímico vem incrementando seu uso como uma ferramenta não destrutiva para avaliar a suscetibilidade à corrosão localizada, especialmente em aplicações em plantas de processo. É atraente porque ele pode ser aplicado em condições de circuito aberto, sem perturbar o sistema corrosivo (3). O ruído eletroquímico descreve flutuações de potenciais espontâneas e/ou corrente que ocorrem na interface de um eletrodo; estes eventos aleatórios em um sistema corrosivo se relacionam com a velocidade de corrosão total.

2.4 - Resistividade do solo

A resistividade do solo é um dos métodos de ensaio de solo e tem sido muito usado como um indicador da capacidade de um solo para promover a corrosão de uma estrutura metálica. O critério mais simples para a corrosividade de um solo é sua resistividade, que depende muito da sua natureza e quantidade de sais dissolvidos no solo e também é afetada pela temperatura e a umidade, compactação do solo e a presença de materiais inertes como rochas ou areia. Este conceito não é o único critério para avaliar a agressividade do solo.

Uma classificação típica de resistividade do solo em função do grau de agressividade ou corrosividade é apresentada na Tabela 1. Esta classificação é arbitrária (4).

Tabela 1 - Corrosividade do solo em função de sua resistividade.

Corrosividade do solo	Resistividade do solo (ohm-cm)
Muito Corrosivo	<1.000
Corrosivo	1.000 – 10.000
Pouco Corrosivo	10.000-100.000
Nulo	>100.000

2.5 – Descrição da metodologia

A metodologia do trabalho foi o de empregar as técnicas eletroquímicas anteriormente citadas e a resistividade do solo em todas as torres inspecionadas para se avaliar o estado da corrosão das grelhas metálicas enterradas, sem que seja necessário cavar os pés das torres. Com os parâmetros medidos pelas técnicas eletroquímicas e a resistividade do solo, estimou-se o estado de corrosão das grelhas metálicas, utilizando-se a Tabela 2. Esta tabela (tabela de risco de manutenção) foi elaborada pelo Cepel com base em dados experimentais de pesquisas anteriores, em que se obtiveram bons resultados da estimativa do estado de corrosão pelas técnicas eletroquímicas em relação ao real estado das grelhas.

Tabela 2 – Tabela de risco de manutenção.

Material	Potencial ^(*) E _{corr} (mV)	Resistência de Polarização R _p (ohm.cm ²)	Resistividade ρ (ohm.cm)	Risco de manutenção
Galvanizado (corrosão do zinco)	E < -800	> 1,2.10 ⁶	> 20000	NULO Não inspecionar, monitorar c/12 anos
			< 20000	BAIXO Não inspecionar, monitorar c/10 anos
		< 1,2.10 ⁶	> 20000	MODERADO BAIXO Não inspecionar, monitorar c/5 anos
			< 20000	MODERADO (Alerta!) Não inspecionar, monitorar c/3 anos
Aço nú (corrosão do zinco e/ou do aço)	-800 a -400	> 1,2.10 ⁶	> 20000	MODERADO ALTO (Alerta!) Não inspecionar, monitorar c/1 ano
			< 20000	ALTO – Decidir inspecionar ou monitorar c/1 ano
		< 1,2.10 ⁶	> 20000	SEVERO INSPECIONAR
			< 20000	
Aço com produtos de corrosão (corrosão do aço)	E > -400	> 1,2.10 ⁶	> 20000	
			< 20000	
		< 1,2.10 ⁶	> 20000	
			< 20000	

^(*) em relação ao eletrodo de Cobre-Sulfato de Cobre (Cu/CuSO₄).

As medidas de resistividade do solo foram realizadas pelo método dos quatro pinos ou método Wenner, utilizando-se um terrômetro e quatro hastes de cobre, próximas ao pé da torre investigada e em duas condições diferentes: com espaçamento de 1 m e de 2 m entre as hastes. O aparelho utilizado fornecia valores de resistência e a resistividade foi calculada pela equação: $\rho = 2\pi R.a$, onde ρ é a resistividade (ohm.cm); R , a resistência (ohm); e a , o espaçamento entre as hastes (100 cm ou 200 cm).

Para a realização das medidas eletroquímicas, nas torres da LT de 230 kV, primeiramente foi necessário desconectar o cabo de aterramento de todos os pés da torre a ser medida, pois este

era de *copperweld*, um material mais nobre que a estrutura da torre, formando com esta um contato bimetálico, o que resultaria em medidas errôneas.

O potencial de eletrodo da torre foi determinado em relação a um eletrodo de referência de cobre-sulfato de cobre (Cu-CuSO_4) e as curvas de ruído eletroquímico e de resistência de polarização linear foram obtidas utilizando-se o equipamento *Field Machine* (com o *software* próprio do equipamento) e um *Notebook*, conforme é ilustrado no esquema da Figura 1. Como eletrodo auxiliar, utilizou-se uma haste de aço-carbono.

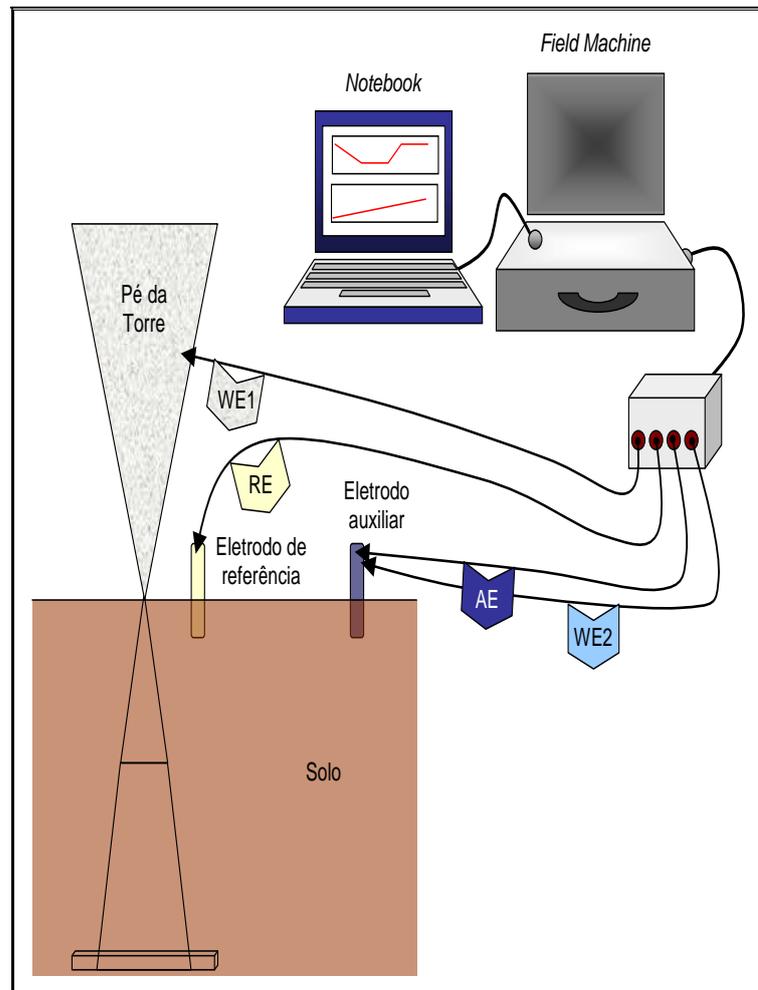


Figura 1 – Esquema das medidas eletroquímicas. WE1 = eletrodo de trabalho 1; RE = eletrodo de referência; AE = eletrodo auxiliar; WE2 = eletrodo de trabalho 2

Após a configuração dos parâmetros de medida, o *Field Machine* automaticamente realiza as medidas de ruído eletroquímico e de resistência de polarização linear. Para tais técnicas, a torre foi ligada à conexão do eletrodo de trabalho 1 (WE1), o Cu-CuSO_4 foi ligado à conexão do eletrodo de referência (RE), e a haste de aço-carbono foi ligada a duas conexões: a conexão de eletrodo auxiliar (AE), e a conexão de eletrodo de trabalho 2 (WE2). O próprio equipamento fecha o circuito elétrico com a haste de aço-carbono, configurando-a como eletrodo auxiliar (AE) ou eletrodo de trabalho 2 (WE2), dependendo da técnica a ser utilizada. Na condução das medidas, utilizaram-se duas posições diferentes para o eletrodo de referência, como ilustra o esquema da Figura 2.

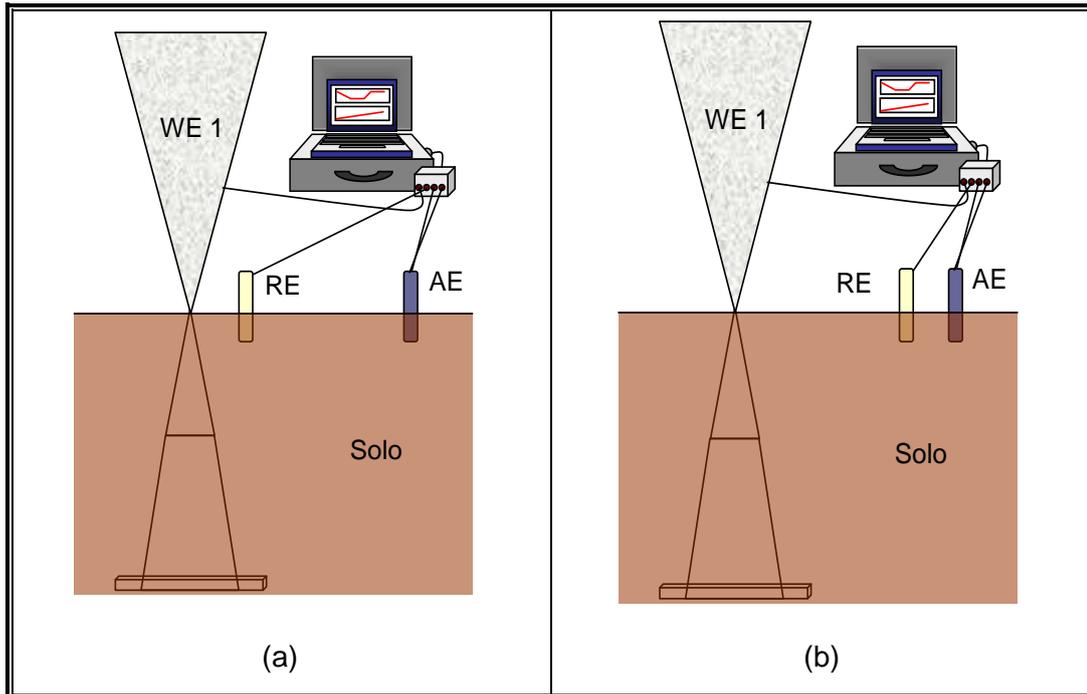


Figura 2 – Diferentes posições do eletrodo de referência (RE) durante as medidas eletroquímicas, sendo (a) “perto” e (b) “longe”

Pela Figura 2, a posição do eletrodo chamada de “perto”, é aquela em que o eletrodo está bem perto da torre (aproximadamente 10 cm) e as medidas eletroquímicas, neste caso, refletem o estado de corrosão da parte da estrutura mais próxima da superfície do solo, convencionalmente, 10% da área total da grelha enterrada. Já na posição denominada “longe”, o eletrodo de referência foi colocado a aproximadamente 1,5 m de distância do pé da torre e neste caso, as medidas eletroquímicas refletem o estado de corrosão da parte mais profunda da estrutura, compreendendo, supostamente, 90% da área total da grelha.

Após a realização das medidas, utilizando-se os parâmetros “potencial (E_{corr})”, “resistência de polarização (R_p)” e “resistividade do solo (ρ)”, e com a Tabela 2, estimou-se o estado de corrosão das grelhas, tanto na configuração de medida “perto”, quanto na configuração de medida “longe”. Neste trabalho, os valores de R_p apresentados foram calculados dividindo-se a resistência de ruído (R_n) por dez.

Para verificar se o estado de corrosão das grelhas estava coerente com o resultado das medidas eletroquímicas, cavou-se os pés das torres até uma profundidade de, aproximadamente, 1,5 m, e a estrutura foi limpa, por meio de escovamento e lavagem com água e inspecionada visualmente. A inspeção visual foi documentada por meio de fotografias.

3 - Resultados

A LT 230 kV Rio Verde-Rondonópolis-Coxipó é dividida em dois trechos denominados de LT 230 kV Rio Verde-Rondonópolis C01 e LT 230 kV Rondonópolis-Coxipó C02. Para melhor visualização e compreensão, os resultados obtidos através das medições das técnicas eletroquímicas e da observação visual estão discriminados em dois subitens, os quais representam, respectivamente, cada trecho descrito anteriormente.

3.1 - LT 230 kV Rio Verde/Rondonópolis C01

3.1.1 - Resistividade do solo e medidas eletroquímicas

A Tabela 3 apresenta os resultados das medidas de resistividade do solo, de potencial e de resistência de polarização linear (R_p), nas condições “perto” e “longe” das torres da LT 230 kV Rio Verde/Rondonópolis. O R_p foi calculado dividindo-se a resistência de ruído (R_n) por dez. O risco de manutenção foi obtido de acordo os parâmetros “ E_{corr} ”, “ R_p ” e “ ρ ”, consultando-se a Tabela 2. Em todos os casos, a resistividade (ρ) sempre foi maior que 20000 ohm.cm.

3.1.2 - Observações visuais

Todos os pés de torres inspecionados neste trecho foram escavados, limpos e documentados fotograficamente com o objetivo de comparar o estado real das grelhas, quanto à corrosão, com as medidas eletroquímicas obtidas. A seguir são apresentadas apenas duas inspeções visuais de dois pés inspecionados de duas torres deste trecho.

Tabela 3 – Resultados das torres da LT 230 kV Rio Verde / Rondonópolis.

Torre	ρ (ohm.cm)		Medidas “perto”			Medidas “longe”			
	a = 1 m	a = 2 m	E_{corr} (mV)	R_p (ohm.cm ²)	Risco de manutenção	E_{corr} (mV)	R_p (ohm.cm ²)	Risco de manutenção	
38	2260800	4596960	-574	1,2.10 ⁶	Moderado baixo	-406	1,6.10 ⁸	Moderado baixo	
85	268784	111784	-734	5,9.10 ⁶		-598	1,4.10 ⁹		
117	425156	550128	-453	3,3.10 ⁵	Moderado	-433	6,7.10 ⁷		
177	95504	108070	-506	1,0.10 ⁶		-464	6,9.10 ⁸		
222	250699	251327	-511	3,4.10 ⁵		-483	4,7.10 ⁶		
260	22619	21362	-525	9,5.10 ⁴		-449	3,5.10 ⁵		Moderado
270	46181	41594	-521	1,3.10 ⁵		-411	3,7.10 ⁶		Moderado baixo
359	63460	44987	-279	4,3.10 ⁴	Alto	-271	1,8.10 ⁶	Moderado alto	

E_{corr} = potencial em relação ao eletrodo de Cu/CUSO₄ ; ρ = resistividade; a = espaçamento entre as hastes; R_p = resistência de polarização.

Torre 38

Na Figura 3, observa-se que, após a escavação, as grelhas da torre 38 não apresentaram corrosão vermelha nas estruturas de aço galvanizado. Tais estruturas estavam em bom estado de conservação, verificando-se pouca corrosão do zinco (corrosão branca). Para esta torre, o risco de manutenção obtido pelas medidas eletroquímicas foi moderado baixo (Tabela 3).



Figura 3 – Aspecto visual das grelhas da torre 38 da LT 230 kV Rio Verde/Rondonópolis, após escavação de 1,5 m. (A) Vista geral e (B) detalhe de um dos perfis

Torre 85

Na torre 85, Figura 4, as estruturas de aço galvanizado também estão em bom estado de conservação, o que é confirmado pela foto de um dos perfis, na Figura 5. Novamente, para esta torre, o risco de manutenção obtido pelas medidas eletroquímicas foi moderado baixo (Tabela 3). Dessa forma, tanto a observação visual, quanto as medidas eletroquímicas indicaram que as torres 38 e 85 encontram-se no mesmo estado de conservação.



Figura 4 – Aspecto visual das grelhas da torre 85 da LT 230 kV Rio Verde/Rondonópolis, após escavação de 1,5 m. (A) Vista geral e (B) detalhe dos perfis



Figura 5 – Aspecto visual das grelhas da torre 85 da LT 230 kV Rio Verde/Rondonópolis, após escavação de 1,5 m. Detalhe do perfil da base da parte desenterrada da estrutura

3.2 - LT 230 kV Rondonópolis/Coxipó C02

3.2.1 - Resistividade do solo e medidas eletroquímicas

A Tabela 4 apresenta os resultados das medidas de resistividade do solo, de potencial e de resistência de polarização linear (R_p), nas condições “perto” e “longe” das torres da LT 230 kV Rondonópolis/Coxipó. O R_p foi calculado dividindo-se a resistência de ruído (R_n) por dez. O risco de manutenção foi obtido de acordo os parâmetros “ E_{corr} ”, “ R_p ” e “ ρ ”, consultando-se a Tabela 2. Em todos os casos, a resistividade (ρ) sempre foi maior que 20000 ohm.cm.

Tabela 4 – Resultados das torres da LT 230 kV Rondonópolis / Coxipó.

Torre	ρ (ohm.cm)		Medidas “perto”			Medidas “longe”		
	a = 1 m	a = 2 m	E_{corr} (mV)	R_p (ohm.cm ²)	Risco de manutenção	E_{corr} (mV)	R_p (ohm.cm ²)	Risco de manutenção
102	408407	115610	-330	$2,7 \cdot 10^6$	Moderado alto	-244	$2,8 \cdot 10^7$	Moderado alto
186	348716	565486	-431	$5,9 \cdot 10^5$	Moderado	-309	$1,7 \cdot 10^6$	
348	753983	2890265	-436	$1,2 \cdot 10^6$	Moderado baixo	-202	$2,8 \cdot 10^7$	
350	452389	3644247	-390	$6,8 \cdot 10^4$	Alto	-356	$3,8 \cdot 10^7$	
404	39081	26012	-241	$5,1 \cdot 10^4$	Alto	-217	$2,9 \cdot 10^6$	
436	2419026	7536822	-408	$8,4 \cdot 10^5$	Moderado	-349	$1,4 \cdot 10^7$	
441	106814	69366	-372	$1,7 \cdot 10^5$	Alto	-281	$2,9 \cdot 10^6$	

E_{corr} = potencial em relação ao eletrodo de Cu/CuSO₄; ρ = resistividade; a = espaçamento entre as hastes; R_p = resistência de polarização.

3.1.2 - Observações visuais

Todos os pés de torres inspecionados neste trecho foram escavados, limpos e documentados fotograficamente com o objetivo de comparar o estado real das grelhas, quanto à corrosão, com as medidas eletroquímicas obtidas. A seguir são apresentadas apenas duas inspeções visuais de dois pés inspecionados de duas torres deste trecho.

Torre 102

Pela Figura 6, verifica-se o aspecto visual das grelhas da torre 102, após a escavação de 1,5 m. Neste caso, as grelhas apresentaram parte de sua área com corrosão do aço (corrosão vermelha) e parte ainda contendo zinco, o que pode ser visto em detalhe em um dos perfis na Figura 6 (B). Mesmo os perfis na base da estrutura, Figura 7, ou seja, aqueles mais afastados da superfície do solo apresentaram muita corrosão vermelha. Pelas medidas eletroquímicas, o risco de manutenção foi moderado alto, tanto de “perto”, quanto de “longe” (Tabela 4).

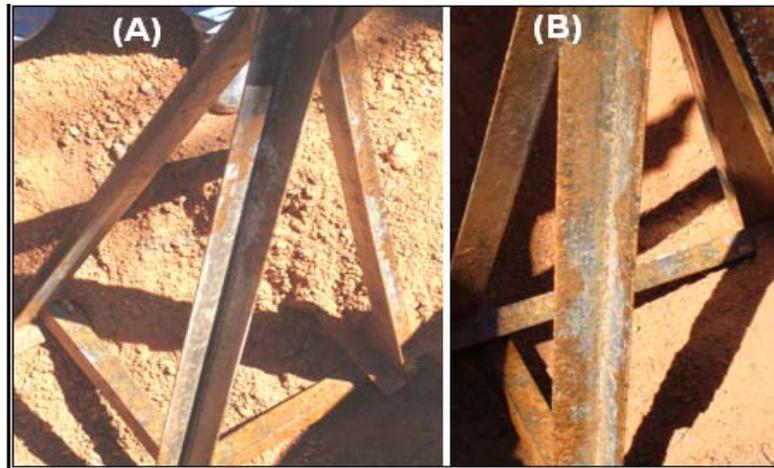


Figura 6 – Aspecto visual das grelhas da torre 102 da LT 230 kV Rondonópolis/Coxipó, após escavação de 1,5 m. (A) Vista geral e (B) detalhe de um dos perfis



Figura 7 – Aspecto visual das grelhas da torre 102 da LT 230 kV Rondonópolis/Coxipó, após escavação de 1,5 m. Detalhe do perfil da base da parte desenterrada da estrutura

Torre 404

Pela Figura 8, verifica-se o aspecto visual das grelhas da torre 404, após a escavação de 1,5 m. Neste caso, as grelhas apresentaram toda a sua área com corrosão do aço (corrosão vermelha), o que pode ser visto em detalhe em um dos perfis na Figura 8(B). Mesmo os perfis na base da estrutura, Figura 9, ou seja, aqueles mais afastados da superfície do solo apresentaram corrosão vermelha na área total do perfil. Pelas medidas eletroquímicas (Tabela 4), obteve-se risco de manutenção alto para as medidas de “perto” e moderado alto, para as medidas de “longe”.

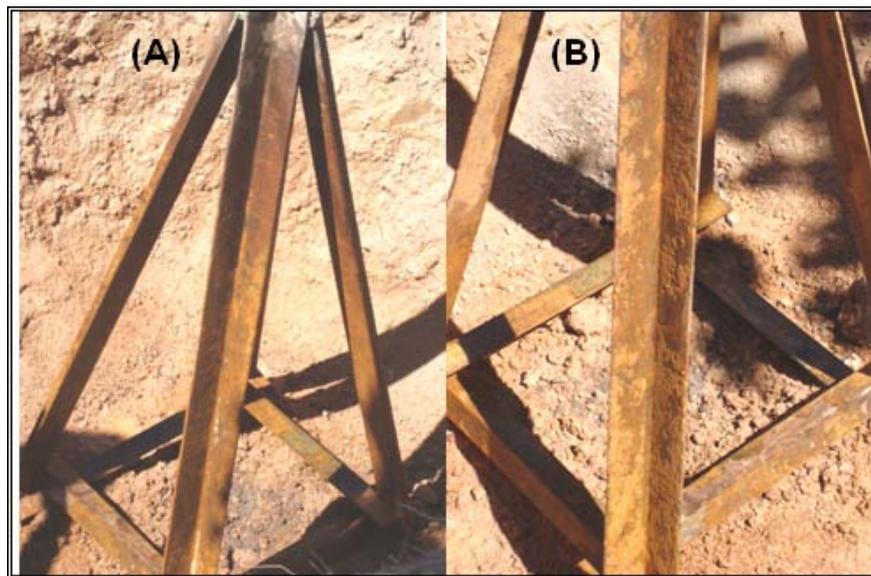


Figura 8 – Aspecto visual das grelhas da torre 404 da LT 230 kV Rondonópolis/Coxipó, após escavação de 1,5 m. (A) Vista geral e (B) detalhes dos perfis



Figura 9 – Aspecto visual das grelhas da torre 404 da LT 230 kV Rondonópolis/Coxipó, após escavação de 1,5 m. Detalhe do perfil da base da parte desenterrada da estrutura

4 - Discussão dos Resultados

A vantagem do emprego das técnicas eletroquímicas para analisar o estado de corrosão das grelhas metálicas das torres de LT reside no fato de se poder estimar, com razoável exatidão, a necessidade ou não de se fazer uma manutenção, sem que seja preciso cavar os pés das torres. Dessa forma, o emprego destas técnicas é uma ferramenta útil para monitoração da corrosão das grelhas metálicas. Neste trabalho, além do emprego de tais técnicas, também se cavou o solo em torno das grelhas que estavam sendo investigadas e foi possível comparar os resultados das medidas eletroquímicas com o aspecto visual das grelhas.

A definição visual do estado de corrosão e a classificação das diferentes grelhas inspecionadas é um tanto subjetiva, porém visando adotar um critério mais sistemático de avaliação, observando-se as imagens das Figuras do item 3, as grelhas das torres foram classificadas em 4 grupos, em função da presença de zinco metálico e de corrosão vermelha do aço, conforme descrito abaixo.

- **Grupo 1 (ausência de corrosão vermelha):** neste caso, as grelhas se encontram com o aço galvanizado envelhecido, ainda em bom estado, sem corrosão do aço (corrosão vermelha). Pelas observações visuais, são pertencentes ao grupo 1 as torres 38, 85, 222 da LT 230 kV Rio Verde / Rondonópolis.
- **Grupo 2 (corrosão branca e corrosão vermelha com baixa intensidade):** neste caso, as grelhas se encontram com o aço galvanizado envelhecido, ainda em bom estado, apresentando corrosão do zinco e pequenos pontos vermelhos ou pequena área da estrutura com corrosão do aço (corrosão vermelha). Pelas observações visuais, são pertencentes ao grupo 2 as torres 177, 260, 270, da LT 230 kV Rio Verde / Rondonópolis e a torre 350 da LT 230 kV Rondonópolis/Coxipó.
- **Grupo 3 (corrosão branca e vermelha):** neste caso, as grelhas apresentam áreas maiores de corrosão vermelha, mas ainda algumas áreas contendo zinco. As torres deste grupo apresentaram mais do que 50% da área inspecionada com corrosão do aço, e foram classificadas igualmente, devido à dificuldade de quantificar as suas pequenas diferenças visualmente. Pelas observações visuais, são pertencentes a este grupo as torres 359 (LT 230 kV Rio Verde / Rondonópolis); 102, 186, 348, 436, 441 (LT 230 kV Rondonópolis/Coxipó).
- **Grupo 4 (intensa corrosão vermelha):** neste caso, não há mais nenhuma área de zinco na estrutura, apenas corrosão vermelha. Enquadra-se neste grupo a torre 404 da LT 230 kV Rondonópolis/Coxipó.

Com esta classificação foi possível construir a Tabela 5, que apresenta as torres distribuídas por grupo, de acordo com a observação visual, ou seja, com a menor ou maior intensidade de corrosão do aço. Também foram incluídos os resultados dados pelas medidas eletroquímicas, na coluna “risco de manutenção”, permitindo-se assim comparar diretamente os resultados da inspeção visual com os das medidas eletroquímicas.

Durante a condução do trabalho de inspeção de campo, devido a problemas técnico-operacionais, o pé da torre 117 da LT 230 kV Rio Verde/ Rondonópolis não foi analisado por observação visual. Assim, esta torre foi excluída da comparação apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 – Comparação de resultados das torres inspecionadas

Torre	Classificação visual das torres				Risco de manutenção	
	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Medidas de “perto”	Medidas de “longe”
	Ausência de corrosão vermelha	Corrosão branca e corrosão vermelha com baixa intensidade	Corrosão branca e vermelha	Intensa corrosão vermelha		
38					Moderado baixo	Moderado baixo
85						
177						
222						
260						
270						
Provável mudança das características físico-químicas dos solos						
359					Alto	Moderado alto
102					Moderado Alto	
186					Moderado	
348					Moderado baixo	
350					Alto	
404					Alto	
436					Moderado	
441					Alto	

Comparando-se os resultados da avaliação visual do estado de corrosão com aqueles obtidos pelas medidas eletroquímicas, observa-se uma boa coerência entre os mesmos.

As torres 38, 85, 177, 222, 260 e 270, classificadas dentro dos grupos 1 e 2 apresentaram risco de manutenção como moderado ou moderado baixo, o que é condizente com o aspecto visual. O aço galvanizado encontra-se isento de corrosão vermelha ou com corrosão em baixa intensidade na superfície. Nas torres classificadas dentro dos grupos 3 e 4, onde se

verificou maiores áreas de aço corroído, todas as medidas eletroquímicas de “longe” indicaram risco de manutenção “moderado alto”, o que foi também bastante coerente com a observação visual, com exceção da torre 350. Esta pode ser considerada como o único resultado discrepante ao se comparar a observação visual com a medida eletroquímica.

Observou-se também nesta torre um aspecto esbranquiçado da grelha, diferente das demais, sugerindo-se que pode ter sido aplicado algum produto visando à proteção anticorrosiva na grelha. A Figura 10 mostra esse aspecto visual esbranquiçado da torre 350 da LT 230 kV Rondonópolis/Coxipó, que pode ser comparado ao aspecto normal de uma estrutura galvanizada envelhecida, como a grelha da torre 222 da LT 230 kV Rio Verde/Rondonópolis.

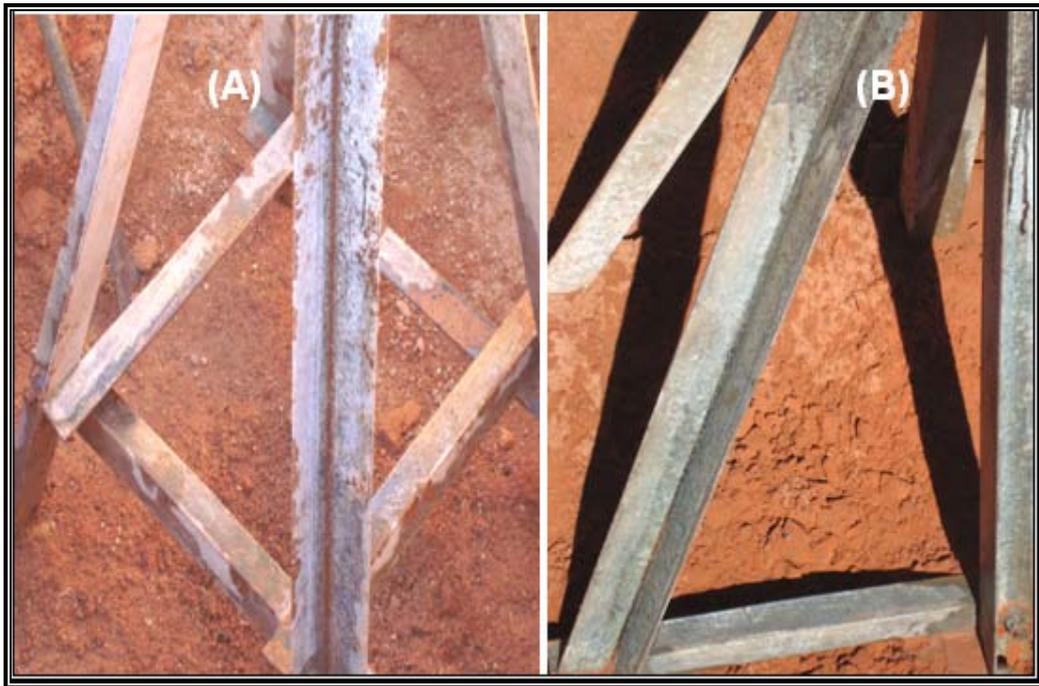


Figura 10 – Aspecto visual comparativo entre as grelhas das torres 350 (A) da LT 230 kV Rondonópolis/Coxipó e 222 (B) da LT 230 kV Rio Verde / Rondonópolis

Alguns comentários adicionais podem ser feitos sobre estes resultados. A ordem como as torres estão dispostas na Tabela 5 representa a ordem como as mesmas foram inspecionadas, ou seja, partindo-se da região de Alto Araguaia em direção à Cuiabá. De Alto Araguaia até Garça Branca, estão localizadas as torres 38 até 270 da LT 230 kV Rio Verde/Rondonópolis, que são aquelas com melhor estado de conservação das grelhas. A primeira torre inspecionada no pé da Serra da Petrovina foi a torre 359 da LT 230 kV Rio Verde/Rondonópolis, que também foi a primeira a mostrar corrosão do aço, em maior intensidade. A partir daí, até Cuiabá, todas apresentaram corrosão do aço, em maior intensidade.

Portanto, tanto pelas medidas eletroquímicas, como pelo aspecto visual, observa-se um retrato muito bem definido do estado de corrosão das grelhas das torres, o que provavelmente está relacionado a uma mudança do tipo de solo, de uma região para outra. A exceção foi a torre 350, que estava localizada na segunda região mencionada, devido à possível presença de um produto na superfície da sua grelha que teria inibido o processo corrosivo.

5 - Conclusões

Com base nos resultados apresentados, pode-se concluir que:

- Houve concordância das medidas eletroquímicas com o aspecto visual das grelhas, confirmando que a metodologia empregada é adequada para monitorar o estado de corrosão das grelhas sem a necessidade de se cavar.
- Os resultados obtidos, tanto através das técnicas eletroquímicas como pelas observações visuais, apresentaram um retrato do estado de corrosão das grelhas nas linhas de transmissão inspecionadas, de acordo com a localização geográfica.

6 - Referências Bibliográficas

- (1) ASTM Standard; **Standard practice for conventional applicable to electrochemical measurements in corrosion testing**, Standard G3-89
- (2) ASTM Standard; **Standard guide for on line monitoring of corrosion in plant equipment (electrical and electrochemical methods)**, Standard G96-90
- (3) KEARNS, SCULLY, ROBERGE, REICHERT, DAWSON; **Electrochemical noise measurements for corrosion applications**, ASTM STP1277, Philadelphia, 1996.
- (4) ROBINSON, **Testing Soil Corrosivity**, NACE Materials Performance, 4, 1993