

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).

Suscetibilidade à corrosão em âncoras de estaiamento de torres de transmissão de energia elétrica.

Márcio A. Sens^a, Mauro Z. Sebrão^b

Abstract

Old and new transmission lines, supported by galvanized steel towers, cable-stayed towers in many cases, have been targets of catastrophic collapse, motivated by corrosion, completely predictable. This work shows an innovative technique used in experimental research field, for the identification of susceptibility to corrosion of the anchors rigging towers electricity transmission, without shutting down and without interference in the transmission system. It is noteworthy that this work is not about integrity assessments of foundations, nor to identify the state of corrosion of buried metallic structures. The experimental technique uses measurements of electric currents in the frequency of 60 Hz and electrical conductance in the frequency of 1685 Hz, allowing quick identification of higher or lower susceptibility to corrosion of the anchors that hold thousands of galvanized steel towers for transmission lines electricity and, thus, enabling a preventive maintenance operation and safe in cases with more disposition or tendency to establish a process of progressive deterioration by galvanic corrosion.

Keywords: corrosion, stay, anchor, tower, steel, transmission

Resumo

Antigas e novas linhas de transmissão de energia elétrica, sustentadas por torres de aço galvanizado, em muitos casos torres estaiadas, têm sido alvos de quedas catastróficas, motivados pela corrosão, absolutamente previsíveis. O presente trabalho mostra uma técnica inovadora utilizada em investigações experimentais de campo, destinada à identificação da suscetibilidade à corrosão das âncoras de estaiamento de torres de transmissão de energia elétrica, sem desligamento e sem interferência no sistema de transmissão. Ressalta-se que este trabalho não trata de avaliações de integridade de fundações e tampouco de identificação do estado de corrosão em estruturas metálicas enterradas. A técnica experimental utiliza medições de correntes elétricas na frequência de 60 Hz e de condutância elétrica na frequência de 1685 Hz, permitindo a identificação rápida da maior ou menor suscetibilidade à corrosão das milhares de âncoras que sustentam as torres de aço galvanizado de linhas de transmissão de energia elétrica e, com isto, possibilitar uma intervenção de manutenção preventiva e segura nos casos com mais disposição ou tendência para o estabelecimento de um processo de degradação progressivo por corrosão galvânica.

Palavras-chave: corrosão, estai, âncora, torre, aço, transmissão

^a Engenheiro Eletricista – Eletrobrás Cepel

^b Engenheiro Metalúrgico – Eletrobrás Cepel

1 Introdução

Nos últimos anos, desde 2003, sistemas de transmissão de energia elétrica têm sido objetos alvos das concessionárias destes serviços. De fato, o governo federal tem outorgado a concessão para exploração de serviço público de transmissão de energia elétrica por trinta anos, através de linhas de transmissão interligando subestações que comportam mais de mil torres de aço galvanizado e, em muitos casos, torres estaiadas. Entretanto, com três anos de operação, em apenas um caso avaliado, encontrou-se o desmoronamento de cinco torres, por problemas de corrosão no sistema de estaiamento. Os problemas associados à corrosão em estruturas tão novas levaram as concessionárias a solicitar a colaboração de especialistas no assunto, para a avaliação da integridade dos sistemas de ancoragem das torres, e para a identificação das causas de quedas tão prematuras das mesmas, além da prevenção de novas ocorrências. O presente trabalho mostra uma técnica inovadora utilizada em investigações experimentais de campo, destinadas à identificação da suscetibilidade à corrosão das âncoras de estaiamento de torres de transmissão de energia elétrica, sem desligamento e sem interferência no sistema de transmissão. Ressalta-se que este trabalho não trata de avaliações de integridade de fundações e tampouco de identificação do estado de corrosão em estruturas metálicas enterradas. A técnica experimental utiliza medições de correntes elétricas na frequência de 60 Hz e de condutância elétrica na frequência de 1685 Hz, permitindo a identificação da maior ou menor suscetibilidade à corrosão das milhares de âncoras que sustentam as torres de aço galvanizado de linhas de transmissão de energia elétrica e, com isto, possibilitar uma intervenção de manutenção preventiva e segura nos casos com mais disposição ou tendência para o estabelecimento de um processo de degradação progressivo por corrosão galvânica.

2 Histórico

Em 1984 o Setor Elétrico brasileiro viu nascer um sistema de transmissão de energia elétrica arrojado. Era o primeiro sistema de transmissão em corrente contínua no Brasil, numa tensão também pioneira, de 600 kV entre linha e terra e de 1200 kV entre linhas. Em paralelo com o novo empreendimento, a cargo de FURNAS Centrais Elétricas S.A., uma linha convencional, trifásica, porém de extra-alta tensão, foi construída, na tensão de 750 kV.

A necessidade da grande São Paulo fez nascer o complexo de Itaipu, cuja energia fluiria até a capital paulista por duas linhas de transmissão pioneiras, de cerca de 800 km de comprimento, uma em corrente contínua e outra em corrente alternada.

Desta forma, em se tratando de novas tecnologias, e de projetos inovadores, todo o cuidado na seleção de materiais seria necessário. A linha de corrente contínua, em particular, deveria receber as maiores atenções, pois as experiências com a mesma eram mínimas.

Embora todo o cuidado no projeto de obra de tamanha responsabilidade, entretanto, mesmo antes da entrada em operação do sistema de Itaipu já apareceram os primeiros problemas. Os ventos, de intensidades acima daqueles levados em conta, derrubaram algumas das primeiras torres, felizmente sem energia elétrica.

A linha de transmissão em corrente alternada foi energizada praticamente em simultaneidade com a linha de corrente contínua e ambas conduziam a energia em ultra-alta-tensão para São Paulo. Logo após a energização, os olhos atentos das equipes de operação e de manutenção,

receosos com o sistema em corrente contínua, passaram a detectar também os primeiros sintomas anormais.

Além das quedas de torres, os primeiros problemas foram verificados com os isoladores de vidro temperado, que se observou estarem quebrando com taxa bem acima da esperada (0,040 % ao ano), conforme relatos da própria equipe de FURNAS [1]; [2] e [3]. Eram isoladores especialmente desenhados para tal linha. Comparou-se com o desempenho dos isoladores tradicionais do sistema de corrente alternada em 750 kV, constatando-se que a linha de corrente contínua levava grande desvantagem.

O colapso de alguns transformadores de grande porte, das estações conversoras de corrente contínua para alternada, constituiu o segundo grande problema do sistema de corrente contínua. Falharam equipamentos nacionais e também os similares europeus [4].

O terceiro grande problema da linha de corrente contínua, não verificado com a linha paralela em corrente alternada, foi a corrosão das estruturas metálicas.

Para os três problemas verificados, aos olhos das equipes de manutenção, a causa provável deveria ser a corrente contínua, já que na linha paralela, em corrente alternada, nenhum destes problemas foram constatados.

Uma análise dos peritos em materiais, nos casos onde os fabricantes permitiram, em conjunto com os projetistas, revelou, entretanto, falhas nos processos de fabricação e de seleção dos materiais.

Para o terceiro caso, o da corrosão das estruturas metálicas das torres, havia as maiores suspeitas quanto aos efeitos das fugas de corrente da linha para os suportes metálicos e, como nos casos anteriores, o CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica foi contactado para investigar as causas da corrosão e efetuar medições. Em 2012, nasce o complexo do Rio Madeira, cuja transmissão também será em corrente contínua, e esperamos que os mesmos enganos técnicos não se repitam.

3 Torres de transmissão de energia elétrica

Antes de muitos detalhes sobre o caso de corrosão em torres de linhas de transmissão, cabem alguns conceitos fundamentais sobre tais torres [12] e [13].

As linhas de transmissão de energia elétrica caracterizam-se por serem obras de grande extensão linear suportadas por estruturas metálicas. As fundações destas torres servem de base para as estruturas. Normalmente adotam-se fundações do tipo grelhas metálicas, estacas, tubulão e sapata em obras de linha de transmissão, dependendo da natureza do solo. A escolha mais adequada do tipo de fundação tem impacto direto no tempo de execução da obra e no custo.

3.1 Torres autoportantes

As torres metálicas autoportantes são feitas de estruturas metálicas galvanizadas a fogo, compostas por uma parte reta superior e uma parte piramidal na base. São formadas por módulos treliçados e todas as ligações são feitas através de parafusos e porcas. As torres metálicas autoportantes utilizam fundações dos tipos: Tubulão; sapata; estaca; bloco e grelha.

3.2 Torres estaiadas

As torres estaiadas são as mais econômicas e fáceis de montar, porém exigem maior área para instalação que as torres autoportantes, de mesma altura.

As torres estaiadas são constituídas por um corpo metálico modulado, de aço ASTM A36, fixo por estais ao longo de sua extensão. Os estais são constituídos por cordoalhas de aço fixadas ao longo da torre e às fundações (blocos de ancoragem). As torres estaiadas utilizam, principalmente os seguintes tipos de fundação: Estai – bloco de concreto (tronco cônico e prismático) e mastro central – tubulão e sapata.

As fundações dos estais são submetidas apenas a esforços de tração (na direção do estai). Na fundação do mastro central atuam esforços de compressão verticais e horizontais. A **Figura 1** ilustra o formato e o modelo de uma torre estaiada.

As torres estaiadas possuem sua estrutura em aço galvanizado a fogo com diversas tipologias, em aço, que se constitui de estrutura uniforme em toda sua extensão, construídas em módulos de treliçamento por cantoneiras. Sua montagem é feita através da união dos módulos por meio de parafusos e porcas. A própria estrutura é utilizada como escada.

4 Constatações de campo – caso Itaipu - 1984

Embora muitas medições e muita perda de tempo na condução de investigações experimentais destinadas a identificar as correntes de fuga das linhas de corrente contínua de Itaipu para as torres, e se estas poderiam provocar efeitos corrosivos nas estruturas metálicas das fundações enterradas, chegou-se a um bom êxito. Durante as escavações das bases das torres, constatou-se, para surpresa da equipe de eletricitas, que os cabos de aterramento, ou contrapesos, como também são denominados, eram constituídos de cobre, formando, portanto, uma pilha galvânica com a estrutura de aço galvanizado (zinco) também enterrada.

Nas torres do sistema de corrente alternada de Itaipu não foram verificados os mesmos problemas de corrosão, pois o aterramento era em aço galvanizado, semelhante ao da estrutura metálica da torre. Diferença esta bastante apreciável entre os sistemas de aterramento, para serem considerados similares, como afirmavam, inicialmente, os técnicos de FURNAS.

Através das investigações concluiu-se que o excesso de cuidado para com o sistema inovador de transmissão de energia elétrica, em corrente contínua, levou alguém a decidir por um material de melhor qualidade, o cobre, no lugar do aço galvanizado, esquecendo-se, entretanto, dos mais elementares conceitos da corrosão galvânica ^{[5], [6] e [7]}. Cabe observar, que umas das referências, anteriormente assinaladas, adverte para a possibilidade de ocorrência da corrosão com bastante antecedência, há exatamente 100 anos – 1912.

Constitui fato notório que o cobre e o zinco formam um par galvânico quando imersos em meio eletrolítico, e que, se eletricamente conectados, geram correntes eletrolíticas e a corrosão do zinco e do aço. Ou seja, a ocorrência da corrosão nas torres das linhas de transmissão de Itaipu, cujas fundações estão enterradas juntamente com os cabos de cobre do sistema de aterramento, era totalmente previsível e constitui falha técnica de projeto ou de especificação.

Felizmente o processo de corrosão instaurado logo no início do plantio das torres do complexo de Itaipu, cuja maioria das sustentações constitui-se pelo tipo autoportante, não derruba as torres tão cedo, caso contrário, todas estariam no chão. O mesmo não ocorre com torres estaiadas, quando o processo de corrosão ocorre nos estais ou nas âncoras.

5 Constatações de campo – caso Piauí - 2008

A STN – Sistema de Transmissão Nordeste S. A. foi constituída em 27 de outubro de 2003, como concessionária de serviço de transmissão de energia elétrica, tendo como acionistas a

Alupar Investimento S.A., com 51% do capital social, e a Companhia Hidro Elétrica do São Francisco – CHESF, com 49 % ^[8].

Pelo decreto de 21 de janeiro de 2004 foi outorgada à Sociedade de Propósito Específico STN - Sistema de Transmissão Nordeste S. A. a concessão para exploração de serviço público de transmissão de energia elétrica, relativa à linha de transmissão interligando a Subestação Teresina II, localizada no Estado do Piauí, à Subestação Fortaleza II, localizada no Estado do Ceará, conforme Processo ANEEL no 48500.000744/03-45 ^[9].

Desta forma, a STN recebeu a concessão pelo prazo de trinta anos para a construção, operação e manutenção dos empreendimentos da LT Teresina II - Sobral III, em 500 kV, circuito simples, com extensão aproximada de 322 km, segundo circuito, conforme mostrado na **Figura 1**.

Um ano após a concessão, a STN tinha concluído o empreendimento, com aproximadamente 1200 torres em aço galvanizado, sendo aproximadamente mil torres estaiadas, na maioria com ancoragem cravada na rocha. Com três anos de operação, cinco torres desmoronaram ao solo, por problemas de corrosão nas âncoras do sistema de estaiamento. Os problemas associados à corrosão em estruturas tão novas levaram a STN a solicitar a colaboração do CEPEL e de outras empresas especializadas, inclusive da CHESF e de uma Universidade Federal para a identificação das causas e a prevenção de novas ocorrências.

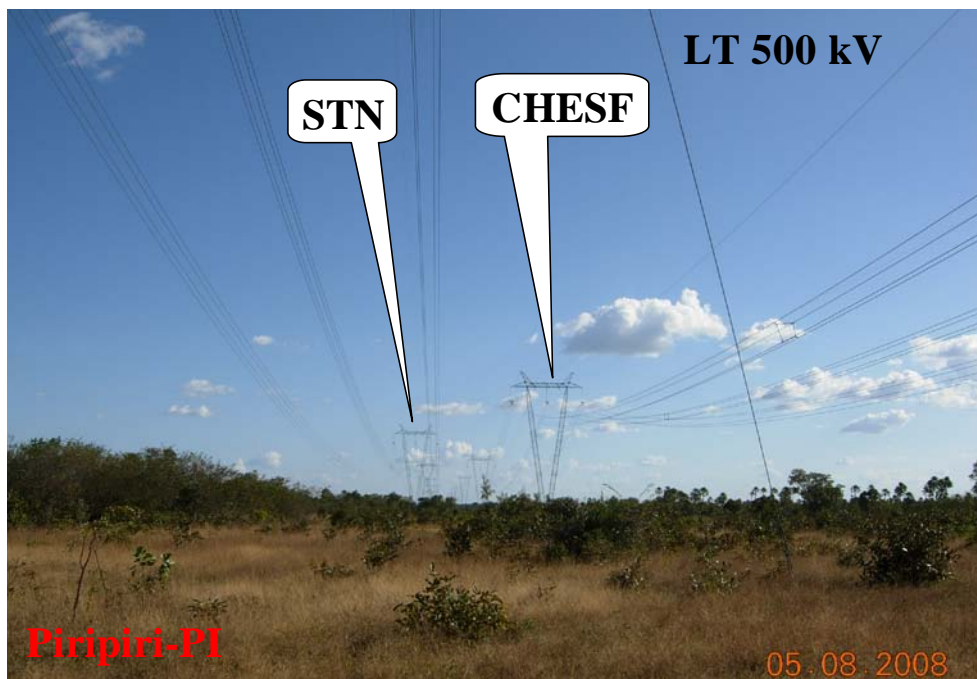


Figura 1 – Torres e linhas de transmissão de energia elétrica dos sistemas STN e CHESF

Este informe técnico trata de investigações experimentais de campo destinadas à identificação da suscetibilidade à corrosão das âncoras de estaiamento de torres de transmissão de energia elétrica, sem desligamento e sem interferência no sistema de transmissão. Particularmente, este trabalho trata das âncoras de estaiamento de torres de transmissão de energia elétrica, na tensão de 500 kV do sistema Teresina II – Sobral III, de propriedade da STN, localizadas entre Teresina – PI e Piripiri – PI. Os ensaios foram realizados pela equipe técnica do CEPEL entre 4 e 6 de agosto de 2008, em condições de tempo bom e temperaturas entre 35 e 40 °C.

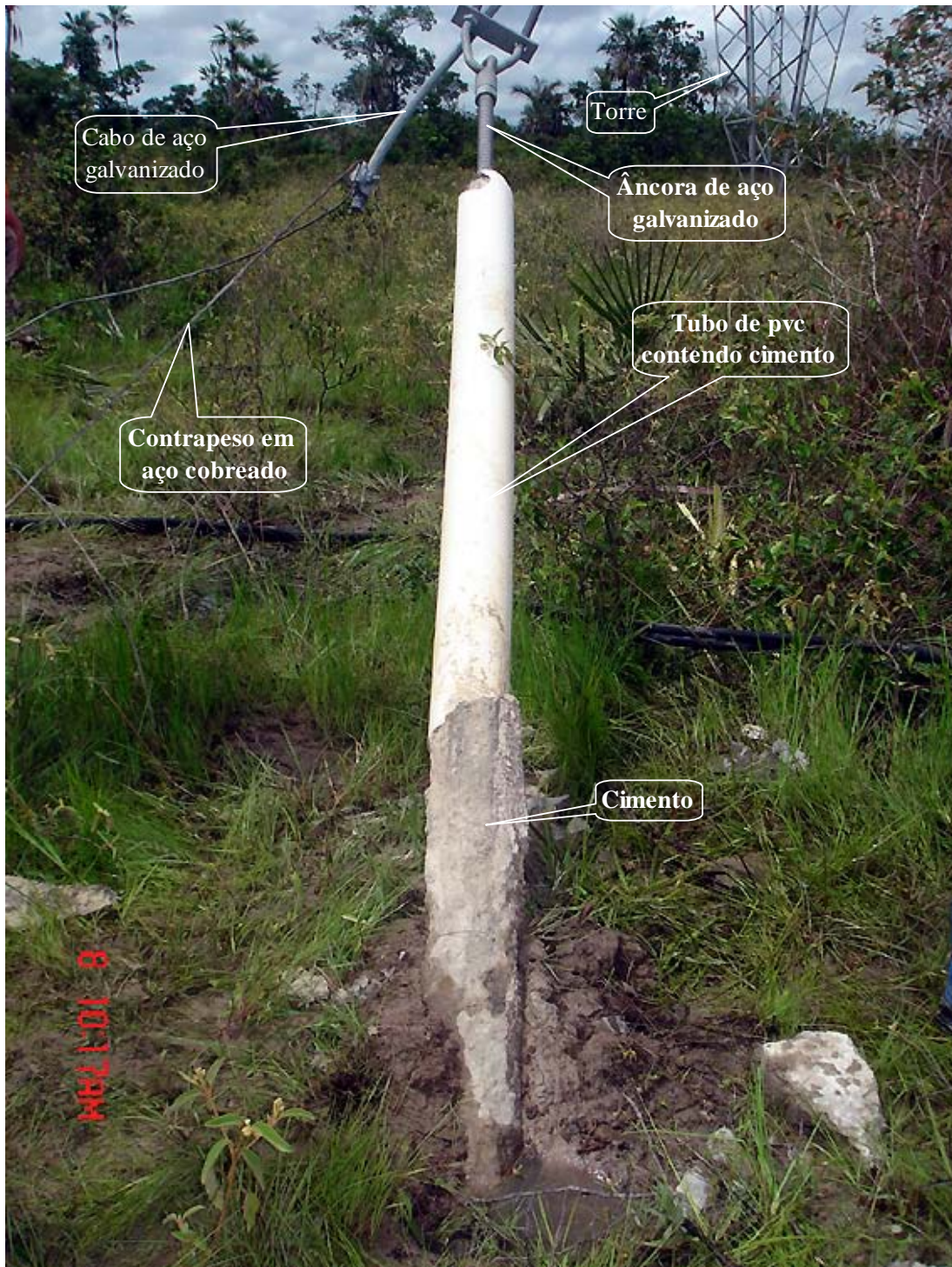


Figura 2 – Ruptura de um sistema de ancoragem de linha de transmissão

Como já citado, este trabalho não trata de avaliações de integridade de fundações e tampouco de identificação de corrosão em estruturas metálicas enterradas. Entretanto, embora não fosse o objetivo, as técnicas utilizadas, aqui descritas e adotadas, serviram também para a identificação de falhas no sistema de aterramento das torres de transmissão do sistema STN e, certamente, servirá para outras linhas semelhantes. A [Figura 3](#) e a [Figura 2](#) mostram a ruptura de uma âncora.



Figura 3 – Detalhe da ruptura de uma âncora por corrosão

5.1 Procedimentos experimentais

Considerando que as torres de transmissão eram constituídas por estruturas de aço galvanizado; e que eram conectadas ao terra por meio de fios de aço cobreados; que o sistema de ancoragem por estais era também constituído por hastes e cabos de aço galvanizados - cordoalhas, e ainda, que o cobre e o zinco, interligados e em contato pelo solo, formavam um par galvânico com o meio eletrolítico do solo, capaz de promover a corrosão, procurou-se identificar a condutância elétrica entre tais eletrodos enterrados.

Havia a informação de que todas as hastes de ancoragem, denominadas âncoras, estariam cobertas por nata de cimento, em toda a extensão enterrada, e que esta estaria contida por tubo isolante elétrico de pvc, como mostrado no croqui da [Figura 4](#)^[11]. Entretanto, como foi identificado pelo menos um caso de ruptura de uma âncora por corrosão bem localizada, formulou-se a hipótese de que outras âncoras poderiam estar com ruptura na cobertura de cimento ou mesmo estarem com o cobrimento originalmente incompleto.

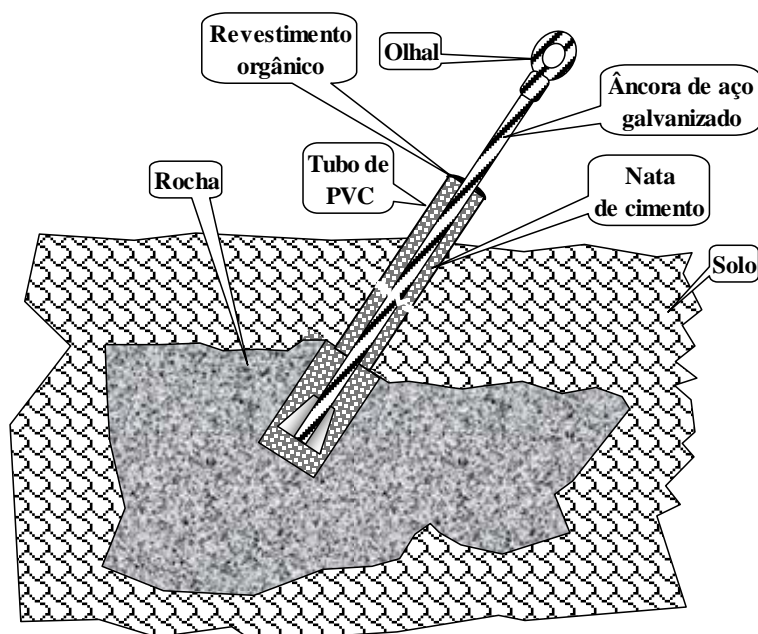


Figura 4 – Sistema de ancoragem na rocha

Foram experimentadas técnicas distintas para a avaliação do acoplamento elétrico entre as âncoras e o sistema de aterramento da torre. Em nenhuma das técnicas utilizou-se de corrente contínua aplicada nas ferragens ou no solo, para evitar a polarização e consequente alteração das características eletroquímicas do solo.

A **Figura 4** mostra um sistema de fixação da âncora do estai na rocha e a proteção por tubo de pvc. A **Figura 5** mostra um detalhe do olhal e engate da âncora com o estai.

5.1.1 Corrente elétrica entre a âncora e o aterramento em 60 Hz

Esta técnica se constitui na medição da corrente elétrica alternada que percorre a âncora de sustentação do estai, quando conectada à torre pelo cabo de estaiamento. Esta corrente é oriunda do acoplamento elétrico capacitivo e resistivo entre os cabos de energia e a torre de sustentação dos mesmos, seja pelo ar, seja através das cadeias de isoladores de suspensão. A intensidade desta corrente depende da tensão entre fase e terra do sistema de transmissão, do acoplamento elétrico entre a torre e os cabos energizados e das impedâncias entre a torre e o terra. As torres ensaiadas eram aterradas por meio de oito eletrodos, quatro de cobre (aço cobreado) e quatro de zinco (aço zincado, ou galvanizado). Um nono caminho para as correntes capturadas pela torre ainda pode ser considerado como sendo pela base de sustentação, em concreto, onde os parafusos são cravados. As impedâncias, ou resistências elétricas, ainda são influenciadas pelas condições e tipo do solo, principalmente pelo conteúdo de umidade, e pelas condições do revestimento de cimento das âncoras. Âncoras mais isoladas do solo, eletricamente, resultam de menores correntes para o terra e, conseqüentemente, com menores correntes eletrolíticas. Uma âncora perfeitamente isolada do terra anula as correntes galvânicas, mas não anula as correntes de 60 Hz devido aos efeitos capacitivos.

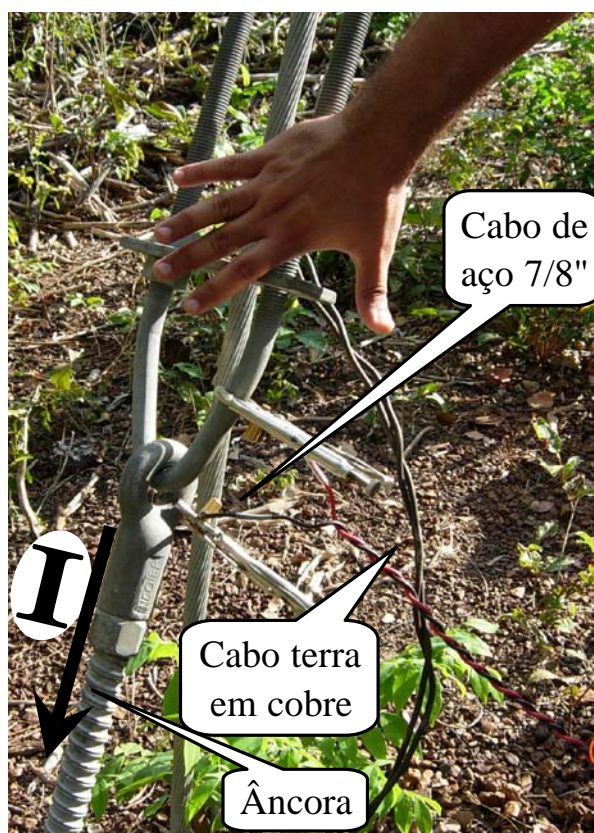


Figura 5 – Âncora e engate com o cabo do estaiamento

5.1.2 Corrente elétrica no cabo de estaiamento em 60 Hz

A corrente elétrica no cabo de estaiamento, pela configuração construtiva adotada, não tem qualquer correlação com a resistência, ou resistividade do solo, e tampouco com a integridade da argamassa que cobre a âncora. Entretanto, foi medida para a identificação de possíveis problemas no sistema de aterramento, que poderiam influenciar os resultados das outras medições. Esta corrente depende do acoplamento indutivo entre os cabos energizados, no alto da torre, e o circuito de estaiamento, incluindo a torre. A intensidade da corrente no cabo de estaiamento depende ainda da intensidade da corrente pelos cabos energizados, ou seja, da carga do sistema de transmissão.

5.1.3 Corrente elétrica entre a âncora e o aterramento em 1685 Hz

Esta corrente foi aplicada na parte externa da âncora metálica, por indução, através de um transformador de núcleo segmentado, tipo alicate, e medida por sistema semelhante. A intensidade desta corrente independe das condições operacionais do sistema de transmissão e esta técnica pode ser utilizada mesmo com a linha desligada. Esta independência constitui relevância, pois, segundo os técnicos da STN ^[11] a linha pode ser desligada ou ligada diretamente pelo ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico, sem consulta ou aviso prévio. Pela corrente induzida nesta parte do circuito, é possível determinar a condutância que inclui o sistema de ancoragem. Quanto menor a corrente para uma condição semelhante de medição, menor a condutância e, portanto, melhor o isolamento elétrico da âncora com o terra. Com se trata de baixas resistências elétricas, as medições foram realizadas com as devidas cautelas, para que não fossem incorporadas resistências de contato, indesejáveis ^[14].

A **Figura 7** ilustra o circuito elétrico de um estai, como encontrado tipicamente nas torres objetos de ensaios, incluindo âncora e acoplamento elétrico entre eletrodos, através do solo, além dos sistemas de indução e medição da corrente utilizados nas investigações de campo.

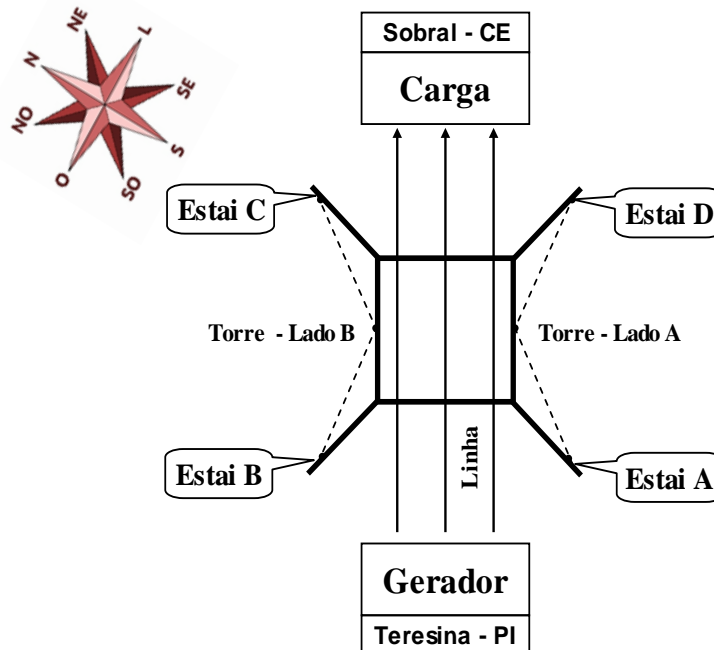


Figura 6 – Posição e identificação dos estais na torre

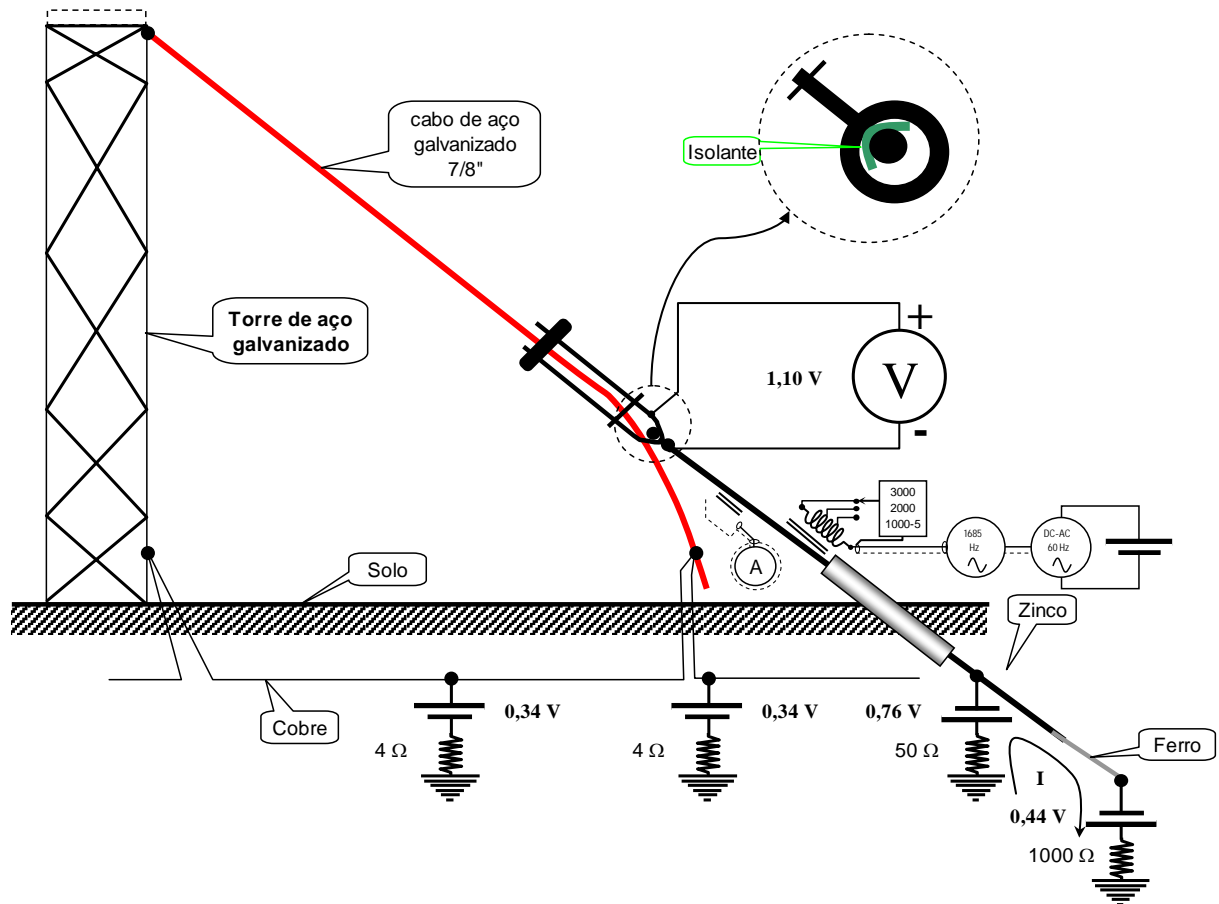


Figura 7 – Circuito equivalente e de medição de um estai

Para uma âncora perfeitamente isolada não haveria corrente elétrica induzida, ou mensurável, pelas técnicas adotadas. Por outro lado, a intensidade da corrente induzida será tanto maior quanto maiores for as falhas no recobrimento da âncora, objeto de análise. A [Figura 6](#) mostra a identificação dos estais em relação às torres avaliadas.

5.1.4 Corrente elétrica no cabo de estaiamento em 1685 Hz

Esta corrente foi aplicada no cabo de estaiamento, na parte logo acima da sustentação pelo pré-formado, também por indução, através de um transformador de núcleo segmentado, tipo alicate, e medida por sistema semelhante. A intensidade desta corrente independe das condições operacionais do sistema de transmissão e esta técnica pode ser utilizada mesmo com a linha sem carga ou desligada, identificando possíveis anomalias nos condutores de aterramento. Esta corrente não tem implicações com a suscetibilidade à corrosão das âncoras, pois circula, em condições normais, apenas pela torre, cabos de estaiamento e condutores de terra. Mas correntes anormais podem indicar anomalias no circuito de aterramento, que têm relevância com as demais grandezas medidas.

5.1.5 Tensão e corrente contínua entre âncora e sistema de aterramento da torre

Esta técnica procura identificar a atividade das pilhas galvânicas formadas entre os pares de metais distintos, tanto em intensidade quanto em sentido. A intensidade das correntes independe das condições operacionais do sistema de transmissão, mas apenas das condições do solo, da proteção de argamassa na âncora e do estado da proteção de zinco da mesma. Para

esta medição, entretanto, foi necessário o isolamento elétrico da âncora das demais partes da torre e do sistema de aterramento. Para tanto, foi introduzido um material isolante, denominado Melinex®, no olhal, separando eletricamente este do grampo conectado ao cabo do estai. A equipe da CHESF sugeriu, por outro lado, a utilização de um material mais resistente, que já utilizam ou pretendem utilizar, denominado Grafeno^[10]. A técnica consistiu da medição da tensão e da corrente através de instrumento digital introduzido entre a âncora e as demais partes metálicas da torre. Por promover leves alterações ao solo nas vizinhanças dos eletrodos, esta foi a última técnica utilizada. A **Figura 8** mostra o circuito equivalente da torre completa, com quatro âncoras e quatro condutores de aterramentos.

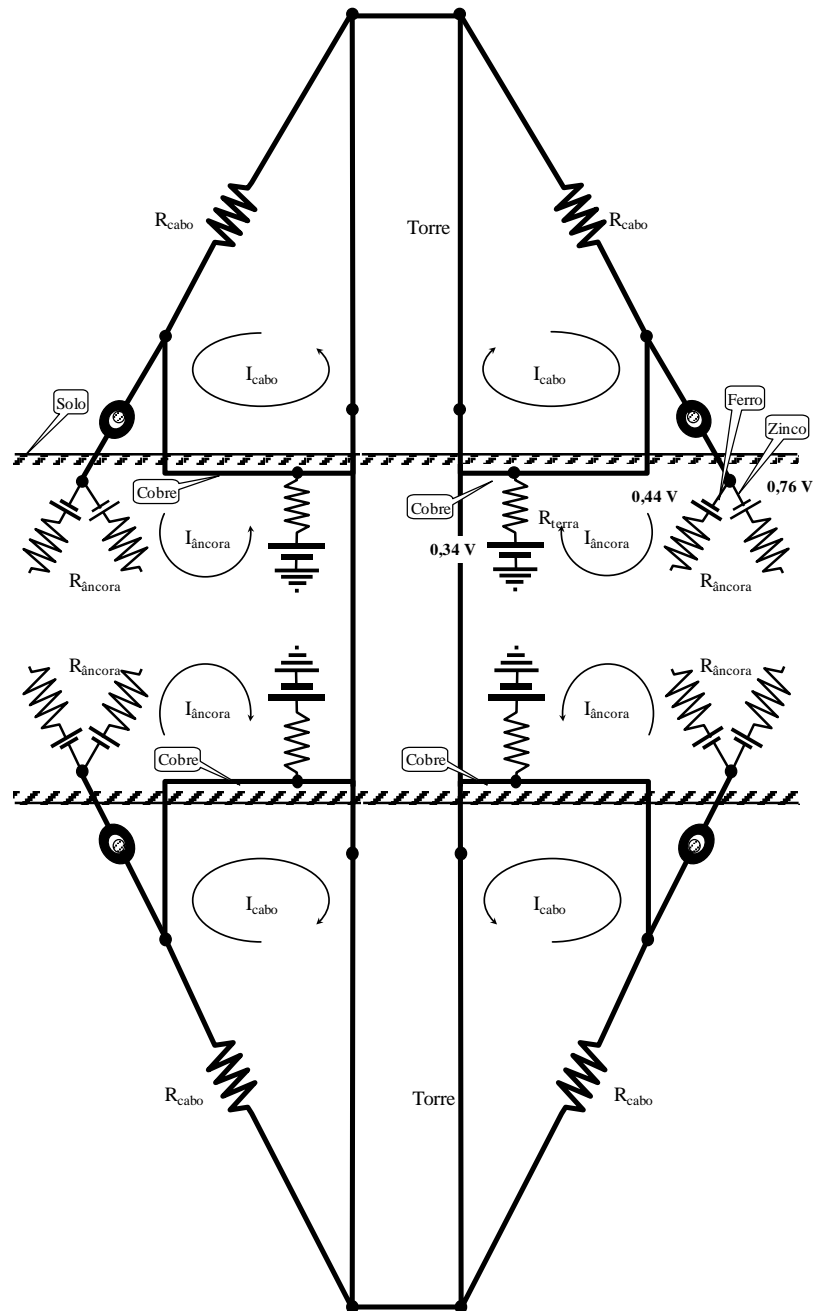


Figura 8 – Circuito equivalente típico das torres estaiadas avaliadas

6 Resultados

Para avaliação das técnicas experimentais foram ensaiados 36 sistemas de estaiamento, incluindo os cabos de e as âncoras. Os resultados mais relevantes serão mostrados a seguir. A **Tabela 1** mostra as correntes nos cabos; as resistências elétricas dos mesmos; as correntes das âncoras sem contrapesos; as correntes das âncoras e a resistência elétrica das mesmas. Além destas grandezas, também são mostradas na citada tabela o inverso de algumas e a corrente relativa da âncora, como forma de análise comparativa, para cada torre e estai ensaiados.

Tabela 1 – Resultados das leituras de correntes e resistências dos cabos e âncoras

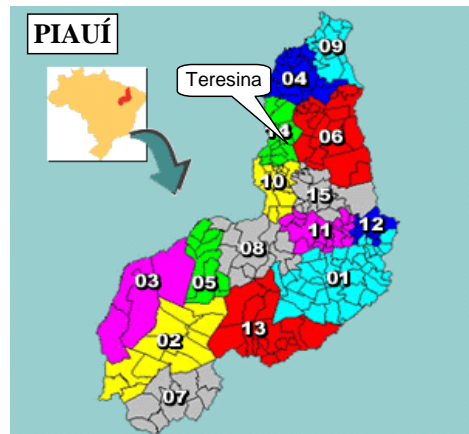
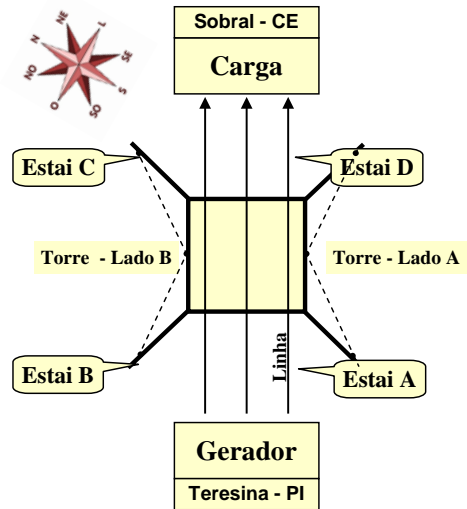
N	Torre-Estai	Icabo (A)	Rcabo(Ω)	Gcabo(mS)	Ia-s/CP (mA)	Iâncora (mA)	1/Iâncora	Râncora(Ω)	1/Râncora(mS)	Iâncora(%)
1	56,1A	2,55	1,31	763,36	4,60	3,50	0,286	70,2	14,2	0,137
2	56,1B	2,75	1,28	781,25	5,50	4,50	0,222	91,2	11,0	0,164
3	56,1C	3,03	1,20	833,33	47,0	36,5	0,0274	15,1	66,2	1,20
4	56,1D	2,80	1,28	781,25	66,0	53,5	0,0187	15,1	66,2	1,91
5	56,2A	2,70				11,5	0,0870			0,426
6	56,2B	2,92				38,0	0,0263			1,30
7	56,2C	3,07				136	0,00735			4,43
8	56,2D	2,68				104	0,00966			3,86
9	72,2A	2,75	1,41	709,22	66,5	57,5	0,0174	12,2	82,0	2,09
10	72,2B	3,21	1,21	826,45	53,5	36,1	0,0277	10,2	98,0	1,12
11	72,2C	3,01	1,31	763,36	81,9	66,5	0,0150	10,3	97,1	2,21
12	72,2D	2,67	1,41	709,22	36,5	23,5	0,0426	11,5	87,0	0,880
13	73,1A	2,66	1,23	813,01	78,0	65,0	0,0154	10,9	91,7	2,44
14	73,1B	2,98	1,16	862,07	36,8	23,6	0,0424	12,3	81,3	0,792
15	73,1C	3,05	1,14	877,19	59,1	48,3	0,0207	13,8	72,6	1,58
16	73,1D	2,63	1,25	800,00	31,2	21,7	0,0461	12,2	82,0	0,825
17	124,2A	2,45	1,57	636,94	30,0	32,0	0,0313	57,5	17,4	1,31
18	124,2B	3,20	1,33	751,88	26,5	24,3	0,0412	84,9	11,8	0,759
19	124,2C	3,10	1,38	724,64	4,60	5,00	0,200	340	2,94	0,161
20	124,2D	2,47	1,57	636,94	8,80	8,50	0,118	170	5,88	0,344
21	139,1A	2,37	1,09	917,43	115	115	0,00870	5,90	169	4,85
22	139,1B	2,52	1,07	934,58	29,4	26,0	0,0385	26,9	37,2	1,03
23	139,1C	2,36	1,13	884,96	9,50	9,10	0,110	27,9	35,8	0,386
24	139,1D	2,45	1,15	869,57	109	103	0,00971	5,30	189	4,20
25	148,1A	2,22	1,41	709,22	1,50	1,20	0,833	386	2,59	0,0541
26	148,1B	2,50	1,35	740,74	1,40	1,20	0,833	400	2,50	0,0480
27	148,1C	2,28	1,39	719,42	1,80	1,30	0,769	280	3,57	0,0570
28	148,1D	2,11	1,47	680,27	1,00	0,800	1,25	361	2,77	0,0379
29	148,2A	2,46	1,42	704,23	12,6	12,0	0,0833	56,5	17,7	0,487
30	148,2B	2,81	1,33	751,88	7,70	6,70	0,149	77,2	13,0	0,239
31	148,2C	0,0145	59,0	16,9	5,60	5,30	0,189	120	8,33	36,6
32	148,2D	2,39	1,43	699,30	9,00	5,50	0,182	25,3	39,5	0,231
33	149,1A	2,25				5,60	0,179			0,249
34	149,1B	0,0110	40,0	25,0		5,50	0,182	57,0	17,5	50,0
35	149,1C	2,67				14,2	0,0704			0,532
36	149,1D	2,25				11,2	0,0893			0,498
	Média	2,51	4,63	721,51	33,6	31,2	0,174	95,4	49,2	3,54

Na **Tabela 2** mostram-se as condutâncias elétricas dos cabos de estaiamento e das âncoras, para as amostras ensaiadas, no momento do ensaio.

Os resultados das medições das correntes que percorrem as âncoras, na frequência de 60 Hz, na direção do solo, são mostrados na **Figura 9**, enquanto na **Figura 12** são mostrados os resultados das medidas de correntes nos cabos de estaiamento, em aço galvanizado, que conectam a torre com as âncoras, conforme esquema mostrado na **Figura 7**.

Tabela 2 – Condutâncias (G) dos cabos e das âncoras

N	Torre-Estai	Data	Gcabo(mS)	Gâncora(mS)
1	56,1A	6/8/2008 16:15	763	14,2
2	56,1B	6/8/2008 16:20	781	11,0
3	56,1C	6/8/2008 16:25	833	66,2
4	56,1D	6/8/2008 16:30	781	66,2
5	56,2A	6/8/2008 16:35	769 (*)	20,3 (*)
6	56,2B	6/8/2008 16:40	823 (*)	59,2 (*)
7	56,2C	6/8/2008 16:45	861 (*)	203 (*)
8	56,2D	6/8/2008 16:50	764 (*)	155 (*)
9	72,2A	5/8/2008 16:15	709	82,0
10	72,2B	5/8/2008 16:25	826	98,0
11	72,2C	5/8/2008 16:35	763	97,1
12	72,2D	5/8/2008 16:44	709	87,0
13	73,1A	5/8/2008 17:00	813	91,7
14	73,1B	5/8/2008 17:15	862	81,3
15	73,1C	5/8/2008 17:20	877	72,6
16	73,1D	5/8/2008 17:25	800	82,0
17	124,2A	6/8/2008 15:04	637	17,4
18	124,2B	6/8/2008 14:40	752	11,8
19	124,2C	6/8/2008 14:50	725	2,94
20	124,2D	6/8/2008 15:10	637	5,88
21	139,1A	5/8/2008 11:30	917	169
22	139,1B	5/8/2008 12:00	935	37,2
23	139,1C	5/8/2008 10:25	885	35,8
24	139,1D	5/8/2008 10:44	870	189
25	148,1A	6/8/2008 11:35	709	2,59
26	148,1B	6/8/2008 11:40	741	2,50
27	148,1C	6/8/2008 11:45	719	3,57
28	148,1D	6/8/2008 16:28	680	2,77
29	148,2A	4/8/2008 17:00	704	17,7
30	148,2B	4/8/2008 17:20	752	13,0
31	148,2C	4/8/2008 16:10	16,9	8,33
32	148,2D	4/8/2008 16:42	699	39,5
33	149,1A	6/8/2008 10:44	657 (*)	11,7 (*)
34	149,1B	6/8/2008 10:52	25,0	17,5
35	149,1C	6/8/2008 11:04	761 (*)	24,3 (*)
36	149,1D	6/8/2008 11:15	657 (*)	19,9 (*)
(*) Interpolação	Média		728	53,3



Linha de transmissão de energia elétrica de 500 kV
 Teresina II - Sobral III - C2
 Sistema de Transmissão Nordeste S.A.
 Análise dos estais - corrente na âncora

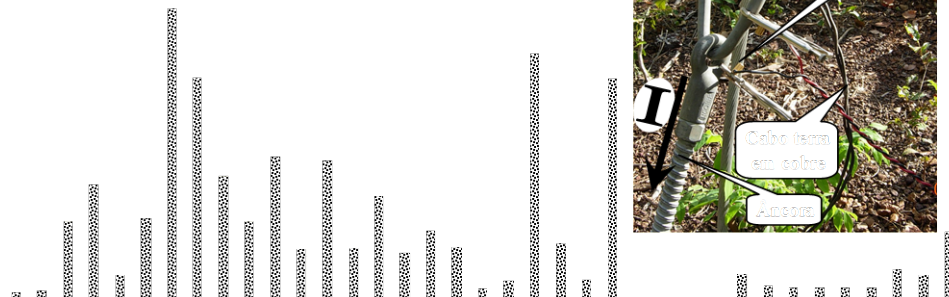


Figura 9 – Correntes de 60 Hz em todas as âncoras ensaiadas

Algumas das âncoras foram analisadas quanto à condutância elétrica com o sistema de aterramento, nem todas, e os resultados são mostrados na **Figura 10**. Para estas mesmas âncoras, para comparação, as correntes de 60 Hz encontradas são mostradas na **Figura 11**.

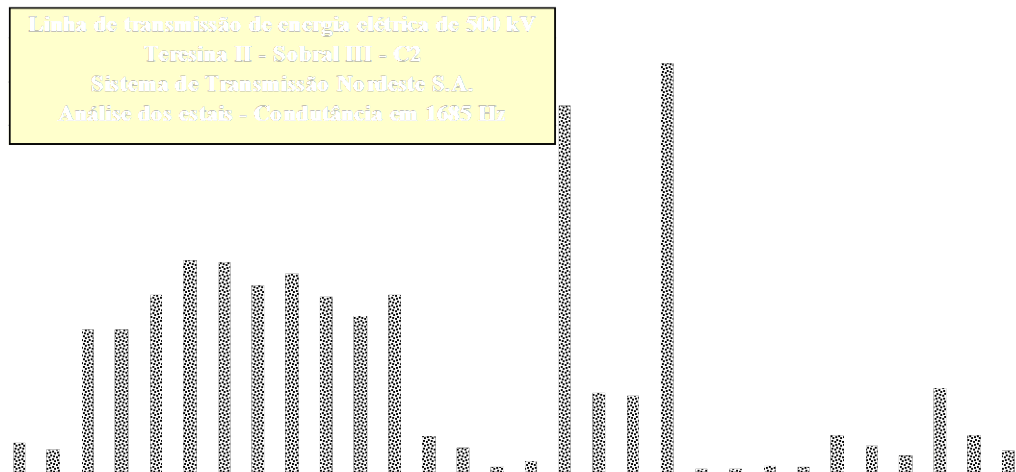


Figura 10 – Condutâncias em 1685 Hz em algumas das âncoras

Da mesma forma, para as mesmas âncoras cujas condutâncias foram medidas, para comparação, as correntes de 60 Hz encontradas nos respectivos cabos são mostradas na **Figura 12**.

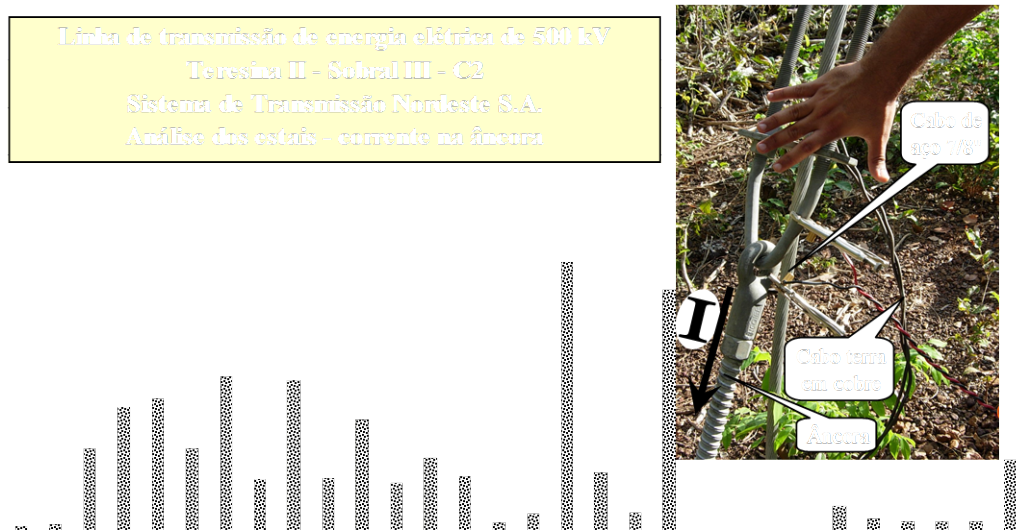


Figura 11 – Correntes de 60 Hz nas âncoras cujas condutâncias foram medidas

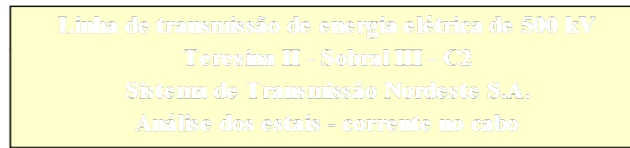


Figura 12 – Correntes nos cabos de estaiamento cujas condutâncias para o terra foram medidas

7 Conclusões

Embora fora dos objetivos e propósitos principais das investigações, pelos resultados obtidos e apresentados, entre os 36 sistemas de estaiamento ensaiados, objetivando apenas a avaliação das técnicas experimentais, foram identificados dois sistemas de aterramento com problemas, possivelmente por falha ou por falta de conexão elétrica apropriada entre o cabo de estaiamento e a torre, através do condutor de aço cobreado - contrapeso. As evidências para tais falhas podem ser vistas na **Figura 12**, onde o estai **148-2-C** e o estai **149-1-B** mostraram-se portadores de reduzidas correntes, se comparadas com os resultados obtidos para os demais ensaiados.

Quanto ao acoplamento das âncoras com o terra, concluiu-se que as âncoras **56-2-C**; **56-2D**; **139-1-A** e **139-1-D** mostraram-se bem mais condutivas para o terra, caracterizando suscetibilidade à corrosão, por possibilitar mais altas correntes eletrolíticas, conforme evidenciado pela análise mostrado na **Figura 9**, através das medidas das correntes em 60 Hz.

As discrepâncias encontradas sugerem que as amostras **139-1-A** e **139-1-D** devem merecer especial atenção e serem selecionadas para outras investigações quanto à integridade das fundações, por estarem mais susceptíveis ao processo de corrosão galvânica.

Pela mesma análise, concluiu-se, ainda, que as fundações mais isoladas eletricamente do terra foram encontradas nas torres **148-1A**; **148-1B** e **148-1C** e **148-1D**, conforme evidências também mostradas na **Tabela 1**, na **Tabela 2** e na **Figura 10**.

Conclui-se, portanto, que as técnicas experimentais baseadas nas correntes alternadas que penetram no solo, através das âncoras, oriundas sejam da própria energização das torres, sejam por injeção artificial, fornecem indicação da suscetibilidade destas âncoras à corrosão. Ou seja, tais técnicas servem para a identificação rápida sobre a qualidade da proteção do sistema de ancoragem pela camada de cimento e da integridade da mesma.

8 Referências bibliográficas

- [1] Peixoto, C.A.D., Pargamin, L., Marrone, G., Carrara, G. "Failure of Transmission Line Cap-and-Pin Insulators under DC Stresses", IEEE T. and D. Conf., 1986, paper 512-8.
- [2] Crusius, R. L., Nigri, A. I., "600 kV System External Insulation Performance- Four Years in Operation", Care International Colloquium on HVDC Power Transmission, Recife-Pe, August 1989, paper VII-01.
- [3] Mason, J. H., Silva, F.R., and Sens, M.A., "DC Salt-Fog Test on glass and porcelain Cap-and-pin Insulators" IEE 5th Int. Conf. on Dielectric Materials, Measurements and Applications, Canterbury-UK, June 1988, page 139-141.
- [4] Frontin, S., O., Reis, L., B., "Novas Tecnologias em sistemas de Transmissão CCAT, Jornada Técnica - Transmissão em Ultra Alta Tenso, Cigrè-CE-38, Brasília, abril 1988.
- [5] Thompson, Silvanus P., "Elementary Lessons in Electricity and Magnetism", in Electrochemical Power of Metals-artigo 489. The Macmillan Company - London 1912.
- [6] Koritsky, Yu. "Electrical Engineering Materials, page 278, MIR Publishers, Moscow, 1970.
- [7] Van Vlack, Lawrence H., "Principio de Ciência e Tecnologia dos Materiais", pag.463 a 483, 4ª Edição, Tradução de Edson Monteiro, Editora Campus, Rio de Janeiro, 1984.
- [8] <http://www.stnordeste.com.br>, acesso em 10/08/2008.
- [9] http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2004/Dnn/Dnn10102.htm
- [10] Informação pessoal passada por José Felipe Andre Gomes Wavrik, da CHESF, ao Mauro Zanini, do CEPEL, em 6/8/2008, em Piripiri – PI, durante as escavações das âncoras de estaiamento das torres.
- [11] Informação pessoal passada pelo Eng. Marcio Fontan - STN, em 6/8/2008, em Teresina – PI.
- [12] <http://www.metalica.com.br/torres-de-transmissao-de-energia/>, acesso em 17/01/2012.
- [13] Recomendações e Informações Técnicas Sobre fundações De Linhas De Transmissão Rubens Ashcar – CESP, VIII Erlac, Ciudad Del Este, 1999.
- [14] Sens, M. A. "Verificação da exatidão e da linearidade na medição de baixas resistências elétricas"; V Congresso Brasileiro De Metrologia, Salvador, Bahia 9 a 13 de novembro de 2009.