

Proteção Contra Corrosão Nas Fundações Das Torres Metálicas, Utilizando Energia Induzida Pelo Campo Elétrico Da Linha de Transmissão

João Nelson Hoffmann¹
José Maurílio da Silva²

¹Copel – Companhia Paranaense de Energia
hoffmann@copel.com

²Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – Lactec
maurilio@lactec.org.br

Resumo: Este artigo apresenta um método inédito de proteção contra a corrosão das fundações do tipo “grelhas”, largamente utilizadas em torres de linhas de transmissão de energia elétrica. Neste método, é utilizado, como fonte de energia para a proteção catódica, a corrente elétrica gerada pela indução da própria linha de transmissão. O resultado da pesquisa originou pedido de Patente de Invenção, registrado no INPI (referência [Cope95]).

Palavras-Chave: Corrosão pelo Solo, Linha de transmissão, fundações em grelhas, proteção catódica, campo elétrico.

1 Introdução

As torres das linhas de transmissão são projetadas para atender a longos períodos de operação, devendo possuir proteção anti-corrosiva compatível com o meio. Normalmente são dotadas de um revestimento obtido por imersão em banho de zinco, estando sujeitas à agressividade de dois ambientes totalmente diferentes, que são a *atmosfera* e o *solo*.

Na atmosfera, o metal não é corroído por uma grande quantidade de eletrólitos e, por isto, a maior parte da corrosão atmosférica opera lentamente, de forma que toda a superfície metálica funciona como catodo e anodo ao mesmo tempo.

No caso do solo, a presença de íons em determinada profundidade pode proporcionar a

formação de um gradiente iônico ao longo das fundações, fazendo com que as regiões mais ricas em sais se tornem anódicas, o que, com o passar do tempo, pode corroer totalmente as fundações em grelhas. Desta forma, os solos arenosos (com boa aeração e baixa umidade) seriam indicadores de pouca corrosão, enquanto que solos de pastagem e agricultáveis facilitariam, em princípio, o processo corrosivo. Do mesmo modo, a formação de gradiente de concentração de oxigênio (aeração diferencial) ao longo das fundações propicia acelerada corrosão nas regiões menos ricas deste elemento.

No caso da Companhia Paranaense de Energia – COPEL, a maioria de suas linhas de transmissão está localizada em terrenos propícios à corrosão das fundações. Examinando-se várias torres, foi constatada corrosão *parcial* e mesmo *total* do revestimento galvanizado, além de corrosão avançada no aço. Em torres novas foi verificado que a região de afloramento é a mais atingida pela corrosão, enquanto que em torres antigas o processo corrosivo está presente praticamente sobre toda a superfície das grelhas.

Além dos fatores físico-químicos, existem também fatores externos que interferem no processo corrosivo, como, por exemplo, a existência de materiais diferentes (contrapeso de aço-cobre). Neste caso, tem-se estudado a possibilidade de uso do alumínio como contrapeso [Hoff95a].

Para o caso de fundações em “stub”, tem-se utilizado como medida corretiva a escavação próxima à região de afloramento, quebra de parte do concreto, pintura e reconstituição do concreto até cerca de 50 cm acima do solo.

Os custos relativos à implementação destes procedimentos são, aproximadamente, de:

- US\$ 500 para a simples escavação em volta dos quatro pés da torre;
- US\$ 650 para a instalação de contrapesos de alumínio;
- US\$ 2000 para se executar a substituição de todas as grelhas em uma torre de suspensão de 138 kV, que pode chegar a cerca de US\$ 4000 em torres de maior porte.;
- US\$ 3000 para a recuperação de fundações em “stub” em torres de 138 kV.

Em vista destes custos, torna-se atrativa a busca por meios alternativos de controle da corrosão. A *proteção catódica* é uma técnica que permite o controle da corrosão de estruturas metálicas enterradas, objetivando reduzir os custos com manutenção. A proteção catódica por *corrente impressa* é um método amplamente utilizado, por exemplo, na proteção de dutos metálicos enterrados, utilizados na indústria petroquímica. Sua aplicação em fundações de torres de linhas

de transmissão até há poucos anos não havia sido explorada devido às dificuldades inerentes às linhas de transmissão, como, por exemplo, a necessidade da existência de uma fonte permanente de corrente contínua junto às torres.

A constatação de corrosão avançada nas fundações em grelhas motivou algumas concessionárias a desenvolver sistemas de proteção catódica próprios para linhas de transmissão. Um desses sistemas utiliza como fonte a energia solar [Serr93]. A utilização de fontes convencionais em 127 ou 220 V também é possível, porém torna-se viável apenas nas proximidades dos centros urbanos.

Em adição às técnicas já conhecidas de proteção catódica por corrente impressa, este trabalho propõe a alternativa de proteção catódica de fundações em grelhas, utilizando como fonte a *energia induzida pelo campo elétrico da própria linha de transmissão* (“PC de Grelhas”), com as vantagens de baixo custo e fácil aplicação tanto em zonas urbanas como em zonas rurais.

2 Descrição do “PC de Grelhas”

Por “PC de Grelhas” entende-se todo o conjunto de componentes necessários à proteção catódica da fundação da torre, sendo composto de três subconjuntos básicos:

- *Acoplamento*: elemento destinado à captação da energia do campo elétrico (Figura 1);
- *Amplificador*: elemento destinado à conversão da corrente elétrica induzida em corrente elétrica própria à proteção catódica;
- *Leito de anodos*: sistema de aterramento adequadamente projetado de modo que seus eletrodos se corroam preferencialmente em relação às grelhas da fundação.

2.1 Acoplamento

Trata-se de um tubo de alumínio conectado à torre através de dois suportes, sendo posicionado paralelamente aos cabos energizados da linha de transmissão, próximo a um deles (usualmente o cabo inferior), e interligado ao amplificador com um condutor elétrico em alumínio rígido.

Os suportes são em aço galvanizado (Figura 2) contendo um isolador como suporte para o tubo de alumínio e uma braçadeira para a conexão do conjunto à torre.

2.2 Amplificador

É um equipamento com componentes eletrônicos, composto por um amplificador-retificador da corrente induzida e um conjunto de dispositivos de proteção contra surtos, completamente encapsulados em material polimérico impermeável (Figura 3).



Figura 1: Montagem do “PC de Grelhas”

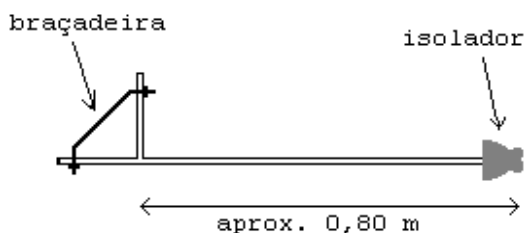


Figura 2: Suporte do Acoplamento

O amplificador possui três terminais:

- terminal de alta-tensão, composto por um isolador e conectado ao acoplamento;
- terminal de baixa-tensão, conectado ao leito de anodos;
- terminal terra, conectado à torre.

2.3 Leito de anodos

Usualmente constituído de hastes metálicas (cantoneiras de aço galvanizado) de 1,2 metros de comprimento, instaladas no espaço interno à torre da linha de transmissão (Figura 4). A quantidade e a localização das hastes são determinadas basicamente em função da resistividade do solo local e do grau de corrosão da instalação a ser protegida.

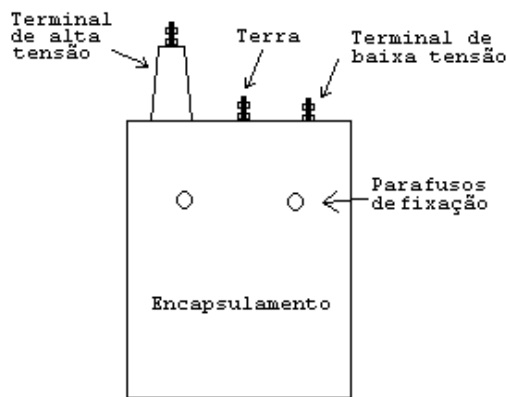


Figura 3: Amplificador

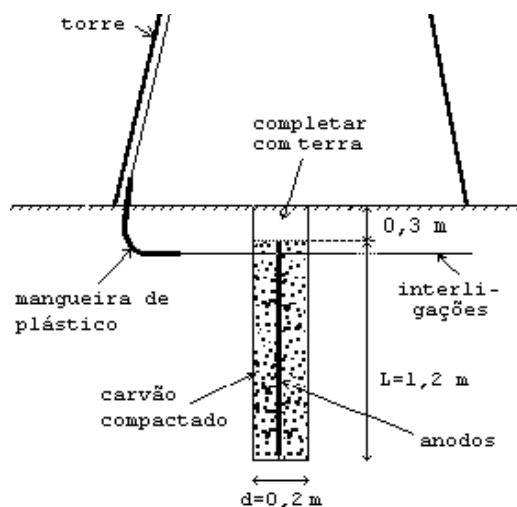


Figura 4: Leito de Anodos

A interligação entre o leito de anodos e o terminal de baixa tensão do amplificador (que fica localizado no suporte do acoplamento, ou seja, em média a cerca de 20 m do solo) é feita por um condutor elétrico isolado com seção de $1,5 \text{ mm}^2$, o qual é preso no lado interno do montante da torre por meio de massa plástica.

No cabo de interligação, a cerca de 3 m de altura, é instalado um terminal que permite a medição periódica da corrente elétrica gerada pelo sistema de proteção catódica.

3 Instalação do “PC de Grelhas”

As etapas necessárias à instalação do protetor catódico são descritas a seguir:

3.1 Avaliação do estado de corrosão das grelhas

Inicialmente procede-se à avaliação do estado de corrosão das fundações, mediante a medição da corrente elétrica necessária (I_p) para a proteção

catódica. Isto pode ser feito com a injeção de corrente contínua na estrutura por meio de uma bateria.

O critério mais confiável para a obtenção de I_p é o de polarizar a estrutura até o potencial “off” (E_{off}) de 100 mV mais negativos do que o potencial estrutura/solo [Nace92]. Em muitos casos também é utilizado o critério de que o potencial estrutura/solo deva ser mais negativo que -850 mV [Nace92].

3.2 Projeto do leito de anodos

O projeto do leito de anodos tem importância fundamental para o bom funcionamento do “PC de Grelhas”. Em função de I_p , determinado na seção anterior, obtém-se o valor aproximado para a resistência de aterramento máxima do leito de anodos, determinado pela expressão,

$$R_{max} = 1,5 \times 10^5 / I_p^2 - R_T,$$

Onde I_p = corrente elétrica necessária para a proteção catódica das grelhas;

R_T = resistência de aterramento da torre.

Um valor de R_{max} negativo nesta expressão indica que será necessária a instalação de um acoplamento e amplificador adicional.

O valor de R_{max} , por sua vez, define o número de anodos n a serem instalados, com a expressão

$$n \geq [\rho_m \ln(4L/d)] / 2\pi L R_{max}$$

onde ρ_m = resistividade média do solo;

L, d = comprimento e diâmetro da instalação, conforme Figura 4 .

Em resumo, o projeto ideal para o leito de anodos resulta de uma combinação entre o valor de I_p , da resistividade do solo e da geometria do aterramento.

3.3 Projeto do acoplamento

O acoplamento é dimensionado uma vez apenas para cada padrão de estruturas. Nesta fase estuda-se o dimensionamento e a localização do acoplamento, de modo a assegurar que a energia induzida seja suficiente para a proteção catódica, sem comprometimento do isolamento da cabeça de torre da linha de transmissão.

A definição do acoplamento para os padrões de estruturas da COPEL foi feita por meio de medições da corrente induzida, variando-se experimentalmente o posicionamento e as dimensões (diâmetro e comprimento), até obterem-se os valores desejados de I_p . Os valores medidos de corrente elétrica induzida pela linha de transmissão no acoplamento estão indicados na Tabela 1.

Tabela 1: Corrente Elétrica Induzida no Acoplamento

Tensão da LT (kV)	Corrente Induzida (μA)
69	150
138	300
230	450
500	600
750	750

Estas medições permitiram concluir, com base nessas experiências, que o conjunto poderia ser padronizado para aplicação nas tensões de 69 kV até 750 kV, variando-se apenas a distância acoplamento-cabo energizado. Assim, os seguintes parâmetros foram definidos:

- Comprimento do acoplamento: 6 m
- Diâmetro do acoplamento: 33 mm
- Extensão do suporte do acoplamento: 0,8 m
- Distâncias acoplamento-cabo energizado: conforme Tabela 2.

Tabela 2: Distâncias Acoplamento-Cabo

Tensão da LT (kV)	Distância (m)
69	1,25
138	1,75
230	3,0
500	6,0
750	7,5

Como alternativa para outros padrões de torres, o projeto do acoplamento pode ser feito por meio de simulações computacionais, utilizando um software desenvolvido pela COPEL, que toma como base a metodologia descrita em [Hoff95b]. Neste software, a torre (incluindo treliças), o acoplamento e os cabos são considerados num ambiente tridimensional, sendo determinadas a corrente, tensão e potência induzidas pela linha de transmissão no acoplamento.

4 Resultados de Aplicações Práticas

A seguir são descritas as etapas relativas à instalação do "PC de grelhas" em todas as torres de uma linha de transmissão de 138 kV em Guarapuava-PR (LT Guarapuava-Vila Carli), bem como serão apresentados resultados de outras aplicações em torres de 69 kV, 138 kV, 230 kV e 500 kV.

4.1 LT Guarapuava - Vila Carli

Esta LT começou a operar em 69 kV no início de 1997, porém a instalação do "PC de Grelhas" foi dimensionada para a tensão final de operação, ou seja, para a tensão de 138 kV a partir de junho de 1997. Os dados relatados a seguir referem-se à operação na tensão de 69 kV. O "PC de Grelhas" foi instalado em 63 torres, sendo que as torres nº 1 a 50 são novas, e as torres nº 51 a 63 são antigas, tendo sido instaladas há vinte anos.

4.1.1 Avaliação do estado de corrosão das grelhas

A Figura 5 mostra o valor da densidade de corrente elétrica (i_p , em mA/m^2 de área de contato da fundação com o solo) necessária para a proteção catódica, medido em algumas torres. Esta figura mostra a nítida diferença entre os valores de i_p necessários para o trecho novo e para o trecho antigo.

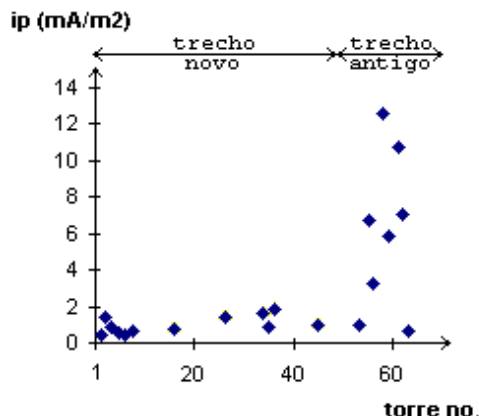


Figura 5: Densidade de Corrente i_p

Conclui-se que, para a instalação do "PC de Grelhas" em torres novas, pode-se prever uma i_p da ordem de $1 \text{ mA}/\text{m}^2$. Em linhas de transmissão antigas, no entanto, deve-se determinar i_p para cada torre ou por meio de amostragem.

4.1.2 Projeto do leito de anodos

Com base nos valores de i_p requeridos (usualmente entre 10 e 100 mA , determinados experimentalmente), e com base nos valores de resistividade média do solo (300 a $2800 \Omega\text{m}$), adotou-se como padrão quatro anodos interligados para o trecho novo (Figura 6), e oito anodos para o trecho antigo.

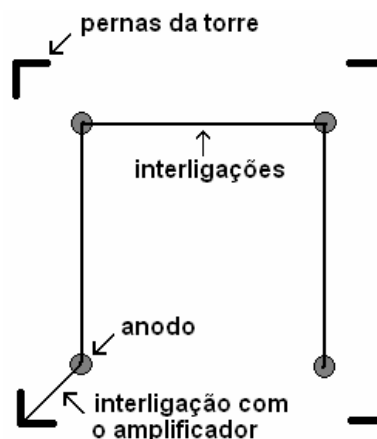


Figura 6: Leito de Anodos

4.1.3 Projeto do acoplamento

Utilizou-se dois conjuntos acoplamento/amplificador nas torres do trecho antigo e nas dez primeiras torres do trecho novo, pois havia a suspeita de que o sistema de aterramento das subestações pudesse drenar parte da corrente de proteção catódica das estruturas próximas. Nas demais, foi utilizado apenas um conjunto acoplamento / amplificador.

4.1.4 Resultados

Considerando que o "PC de Grelhas" foi projetado para a operação final da linha de transmissão em 138 kV, mesmo com a operação em 69 kV já foi possível constatar valores de correntes de proteção catódica suficientes em muitas torres, como demonstram as Figuras 7 e 8.

Nestas figuras, i_i refere-se à densidade de corrente injetada pelo "PC de Grelhas". Estes valores foram medidos com a LT operando em 69 kV, sendo que os valores indicados para 138 kV foram estimados.

No trecho antigo, três torres estão sem a proteção completa em 69 kV, enquanto que no trecho novo cinco torres ainda estão desprotegidas (isto se deve à presença de fios de aterramento de aço cobreado, que tem maior tendência para corroer as grelhas). Nesta ocasião foi possível prever que, após a energização da LT em 138 kV, apenas as torres 1, 2 (trecho novo) e 61 (trecho antigo) não estariam totalmente protegidas.

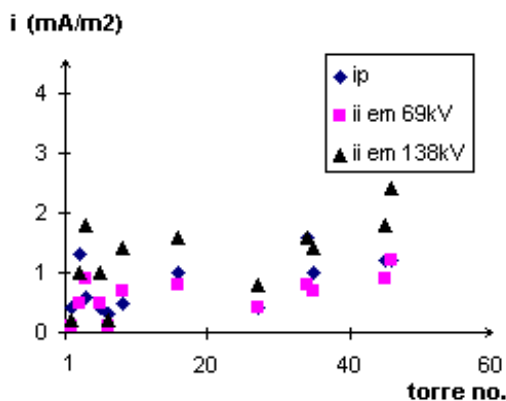


Figura 7: Medições No Trecho Novo

Foram medidos os potenciais "on" (E_{on}) a partir de polarizações catódicas em circuito fechado [Nace92] até a completa proteção das grelhas. Os valores encontrados foram de certa forma aleatórios, demonstrando que a estrutura pode estar protegida mesmo com E_{on} não tendo atingido -850 mV. Deste modo, o critério apresentado em [Nace92], de que as grelhas estão protegidas com E_{off} pelo menos 100 mV mais negativo do que E_{corr} , demonstrou maior coerência.

Do ponto de vista dos potenciais estrutura/solo (E_{corr}), verificaram-se valores entre -400 mV e -600 mV para o trecho antigo (Figura 9).

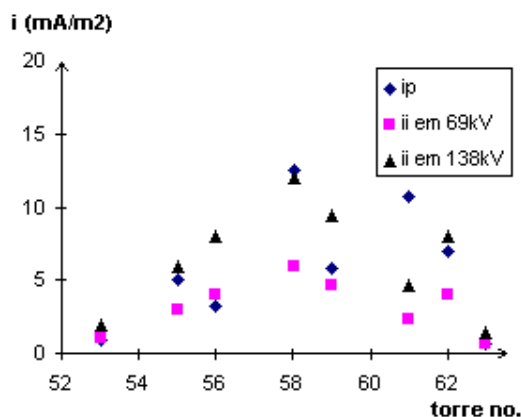


Figura 8: Medições No Trecho Antigo

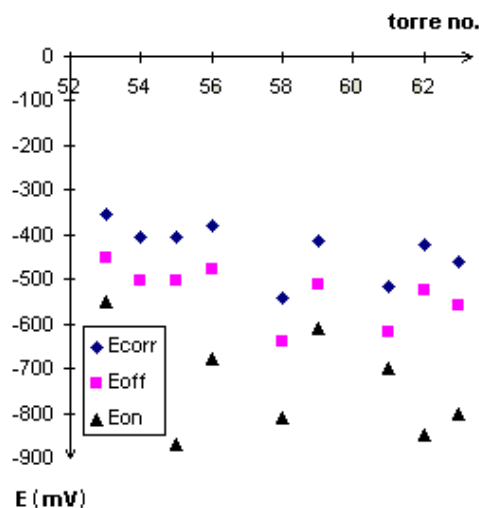


Figura 9: Potenciais E_{corr} , E_{off} e E_{on}

4.2 LT Francisco Beltrão - Pato Branco (138 kV)

A torre 91 desta LT apresentava $E_{corr} \cong -430$ mV, sendo este valor deslocado para -892 mV com a injeção de 80,5 mA por meio da instalação do "PC de Grelhas".

Neste caso, tanto o pára-raios (em CAA) como os contrapesos (aço-cobre) foram isolados da estrutura. Constatou-se que o cabo pára-raios em CAA desvia para a estrutura vizinha boa parte da corrente injetada no solo pela proteção catódica, o que indica a necessidade de proteção catódica em todas as estruturas para uma proteção efetiva. O cabo contrapeso aço-cobre, por sua vez, desloca E_{corr} para valores mais positivos devido ao cobre, o que sugere a utilização de contrapesos de alumínio [Hoff95a] [Serr93] ou aço galvanizado para retardar o processo de corrosão das fundações.

4.3 LT Umbará - Siderúrgica Guairá (230 kV)

A baixa resistividade do solo na torre 11 desta linha de transmissão, aliada à aplicação de cabos pára-raios em aço, permitiu uma corrente de proteção catódica de cerca de 100 mA, deslocando E_{corr} de -580 mV para -1000 mV.

4.4 LT Areia - Foz do Areia (500 kV)

Foram feitos testes preliminares em uma estrutura de circuito duplo de 500 kV, onde obteve-se $I_p = 68$ mA com o acoplamento a 9 m da fase inferior, e $I_p = 105$ mA a 6 m das fases.

4.5 Número de Torres Protegidas

A Tabela 3 mostra o número de torres onde o sistema já foi aplicado.

Tabela 3: Aplicação do "PC de Grelhas"

Empresa	Linha de Transmissão	Nº de Torres	Ano
COPEL	230kV(Umbará–SIG)	1	1996
	138 kV (Pato Branco – Francisco Beltrão)	1	1997
	69/138 kV (Vila Carli – Guarapuava)	63	1997
	138 kV (Lapa – Piên)	133	1998
	138 kV (Sabará – Ponta Grossa Norte)	23	1998
	138 kV (Alto Paraná – Paranavaí)	69	1998
	138 kV Iratí – Sabará	144	1998
	230 kV (Salto Osório – Cascavel)	20	2000
	138 kV (Fóz do Chopim – Realeza)	31	2000
	69 kV (Klabin)	3	2000
CPFL	138 kV	88	2001
ELETRO-SUL	500 kV	9	2001
FURNAS	500/750 kV	4	2001
ESCELSA	138 kV	4	1998
COELBA	69 kV	63	2001
KLABIN	69 kV	2	1997

5 Benefícios Econômicos

Com a instalação de proteção catódica para as fundações das torres de linhas de transmissão, pode-se prever uma expressiva redução nos custos de manutenção envolvendo escavações, reaterro, serviços de pintura ou substituição de fundações corroídas.

Tabela 4: Custos Percentuais

Tipo de Instalação	%
Substituição de grelhas e contrapeso	138
Substituição somente das grelhas	100
Prot. catódica convencional(127/220V)	100
Proteção catódica com energia solar	80
PC de grelhas	38

Estes custos variam de US\$ 600 a US\$ 2000 por torre até 138 kV, e US\$ 1200 a US\$ 4400 em 230

kV, enquanto que a instalação da proteção catódica pode ser avaliada conforme a Tabela 4.

Desta forma, pode-se concluir que a proteção catódica utilizando energia induzida pelo campo elétrico da linha de transmissão é bastante atrativa economicamente.

6 Conclusões

Em função da experiência obtida pelas aplicações práticas acima relatadas, e baseado nos custos apresentados, conclui-se que a proteção catódica utilizando energia induzida pelo campo elétrico da linha de transmissão é viável **técnica** e **economicamente**. Em resumo, o "PC de Grelhas" pode representar a solução definitiva para o problema da corrosão de fundações em grelhas de torres de linhas de transmissão.

7 Bibliografia

- [Cope95] Copel, Protetor catódico de grelhas de linhas de transmissão, Pedido de privilégio registrado no Instituto Nacional de Propriedade Industrial, em 19/06/1995
- [Hoff01] Hoffmann, J. N., Silva, J. M. Cathodic protection for tower foundations using induction from the transmission line electric field. *IEEE Transmission & Distribution Conference*, Atlanta/EUA, Outubro, 2001.
- [Hoff95a] Hoffmann, J. N., Silva, J. M., Soncin, A. - Viabilidade do uso do alumínio como contrapeso para o aterramento de linhas de transmissão. *VI Encontro Regional Latino-Americano Del Cigré*, 1995.
- [Hoff95b] Hoffmann, J. N., Pulino, P. New developments on the combined application of charge simulation and numerical methods for the computation of electric fields. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Abril, 1995.
- [Hoff97] Hoffmann J. N., Silva, J. M. Proteção catódica contra a corrosão de fundações em grelhas. *XIV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Belém/PA, 1997.
- [Nace92] Nace RP0169, Control de corrosion externa de sistemas de tuberías metálicas subterráneas o sumergida. 1992.
- [Serr93] Serra, E. T., Sebrão, M. Z., Dutra, A. C. Aplicação de painéis foto-voltaicos na proteção catódica de fundações de torres de transmissão. *XII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Outubro, 1993.