



**XV SNTPEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GLT/22

17 à 22 de outubro de 1999
Foz do Iguaçu – Paraná - Brasil

**GRUPO III
LINHAS DE TRANSMISSÃO – (GLT)**

UTILIZAÇÃO DE FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA EM PROTEÇÃO CATÓDICA DE GRELHAS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

JOSÉ MAURÍLIO DA SILVA
COPEL/LACMAT

*S. FILIPPO CIAMMARELLA
COPEL/LACELE

JOSÉ LÁZARIS
COPEL/LACMAT

V. PEREIRA
COPEL

RESUMO

A idéia do presente trabalho é aplicar a proteção catódica por corrente impressa, utilizando como fonte de energia, as fontes eólicas e solares, minimizando o uso de processos de armazenamento e colocando como premissa a não necessidade de uma energia estabilizada mas suficiente para manutenção de um potencial de proteção mínimo onde o processo de migração de íons chega ao seu menor grau.

Neste trabalho faz-se comentários sobre vários processos de obtenção de energia como fonte de alimentação para um sistema de proteção catódica. O estudo consiste em, determinando-se os parâmetros necessários para análise dos aspectos corrosivos em grelhas de LT'S, fornecer energia suficiente para proteção de uma estrutura de aço.

PALAVRAS-CHAVE

Proteção Catódica -Corrosão pelo solo-Linhas de transmissão-Energia Fotovoltaica-Energia Eólica.

1.0 INTRODUÇÃO

Na COPEL, tem sido verificado que as fundações das torres estão em um processo bastante avançado de corrosão, quando se compara com as ferragens da superestrutura. O grande desafio é alcançar taxas equivalentes entre as fundações e as ferragens da superestrutura.

Em adição as técnicas já conhecidas de proteção catódica por corrente impressa, a COPEL está fazendo proteção catódica⁽⁰¹⁾ de fundações em grelhas, utilizando como fonte a energia induzida pelo campo elétrico da própria linha de

transmissão com a vantagem de fácil aplicação tanto em zonas urbanas como em zonas rurais.

Com objetivo de obter uma correlação entre estudos de campo e estudos de laboratório, realizou-se medições de parâmetros eletroquímicos em pés de torres e em um perfil de aço enterrado próximo ao laboratório, utilizado para os testes iniciais.

A idéia do presente trabalho é aplicar a proteção catódica por corrente impressa, utilizando como fonte de energia, as fontes eólicas e solares. Os resultados serão apresentados, ora observando-se a polarização remanente que a interface metal-solo introduz, ora observando-se a junção com baterias recarregáveis.

2.0 - DESENVOLVIMENTO

Este item está composto pela determinação da resistividade do solo, obtenção do potencial estrutura/solo, determinação da corrente de proteção e obtenção do potencial de proteção através da injeção de corrente .

3.0 - RESULTADOS

A discussão dos resultados está baseada nos itens de 3.1 a 3.4 a seguir:

3.1 - RESULTADOS ELETROQUÍMICOS EM UMA GRELHA COM PRODUTO DE CORROSÃO ADERENTE

Para a realização do estudo neste tipo de grelha (vide Foto 1), a célula eletroquímica foi o solo local com resistividade próximo de 1000Ω.m, a temperatura foi a ambiente e o experimento foi feito conforme descrito no item 2.1. Após observar um resultado típico de uma região de

Tafel catódica para altos sobrepotenciais (100mV mais negativo que o potencial de corrosão), além do potencial de repouso estacionário na região de baixos sobrepotenciais e verificar que a reação anódica era desprezível em relação a reação

catódica para a intensidade de corrente injetada e a inclinação de Tafel das polarizações catódicas mostradas apresentavam valores de 50mV/dec, indicando que a polarização do sistema estava no catodo, isto é, o deslocamento de potenciais na direção catódica era facilitada e, portanto a reação catódica predominava sobre todo o processo. Além disso, verificou-se que o potencial de corrosão se encontrava próximo a região do potencial reversível da reação anódica, o que facilitou na obtenção do potencial de proteção da reação anódica.



Foto 1: Grelha de área 22m².

A Foto 1 refere-se a perna “B” da torre 110 da LT 138kV União da Vitória-Rio Azul e mostra uma grelha bastante corroída e com produto de corrosão bastante aderente à superfície metálica. A partir de uma planilha de polarização catódica em campo, obteve-se vários parâmetros eletroquímicos: potencial de corrosão (E_{corr}), Inclinação tipo Tafel em condições de circuito fechado (β_{on}), densidade de corrente de proteção em condições de circuito fechado (i_{p-IR}), Inclinação tipo Tafel em condições de circuito aberto (β_{off}), densidade de corrente de proteção em condições de circuito aberto (i_p) e a densidade de corrente de proteção média (i_{p-m}). Para a torre acima mencionada, obteve-se: $E_{corr}=-183\text{mV}$, $\beta_{on}=220\text{mV/dec}$, $i_{p-IR}=1,36\text{mA/m}^2$, $\beta_{off}=33\text{mV/dec}$, $i_p=1,40\text{mA/m}^2$, $i_{p-m}=1,38\text{mA/m}^2$.

catódica, concluiu-se que era possível a realização de curvas de polarização no campo (na própria linha) sem haver a necessidade do potenciostato. A curva obtida através da injeção de corrente se inicia na região de altos sobrepoten

3.2 - RESULTADOS ELETROQUÍMICOS EM UMA GRELHA COM PRODUTO DE CORROSÃO NÃO ADERENTE

Para a realização do estudo neste tipo de grelha (vide Foto 2), o solo local apresentou resistividade próximo de 100 Ω .m, a temperatura foi a ambiente e o experimento foi feito conforme descrito no item acima.

A Foto 2 refere-se a perna “C” da torre 118 da LT 138kV União da Vitória-Rio Azul e mostra uma grelha bastante corroída e com produto de corrosão não aderente à superfície metálica.



Foto 2: Grelha de área 29m².

Para a torre acima mencionada, obteve-se: $E_{corr}=-541\text{mV}$, $\beta_{on}=43\text{mV/dec}$, $i_{p-IR}=2,45\text{mA/m}^2$, $\beta_{off}=10\text{mV/dec}$, $i_p=3,45\text{mA/m}^2$, $i_{p-m}=2,95\text{mA/m}^2$.

Pelas duas fotos apresentadas observa-se que a inclinação catódica tipo Tafel é maior para as condições onde o produto de corrosão é aderente. Também verificou-se que o potencial de corrosão apresenta um valor mais positivo quando o produto de corrosão é aderente. Isto mostra a existência de uma Queda Homica, devido a existencia de um aumento na espessura de um filme aderente.

3.3 - RESULTADOS ELETROQUÍMICOS EM UMA GRELHA DE TESTE COM INÍCIO DE CORROSÃO

Para a realização do estudo neste tipo de grelha, o solo local apresentou resistividade próximo de 1000 Ω .m, a temperatura foi a ambiente e o

experimento foi feito conforme descrito nos ítems acima.

A grelha em questão refere-se a perna “A” da torre 79 da LT 230kV Umbará-Campo Comprido e mostra uma grelha com início de corrosão.

Para a torre acima mencionada, obteve-se: $E_{corr} = -587\text{mV}$, $\beta_{on} = 72\text{mV/dec}$, $i_p - IR = 0,37\text{mA/m}^2$, $\beta_{off} = 12\text{mV/dec}$, $i_p = 0,8\text{mA/m}^2$, $i_p - m = 0,6\text{mA/m}^2$.

Pelos ítems anteriores observa-se que esta grelha é mais fácil de proteger que as outras duas comentadas acima. Nesta torre foi instalado a proteção catódica por corrente impressa a partir da indução elétrica da própria linha (PC de Grelhas).

Nesta torre foram instalados duas unidades do equipamento eletrônico. O serviço consistiu em fazer 8 buracos de 20cm de diâmetro por 1,5 metros de profundidade, a interligação entre esses buracos foi feita através de uma vala de 10cm de diâmetro por 15cm de profundidade. Os anodos ficaram a uma distância de 3 metros um do outro. Após realizado o trabalho de escavação foi instalado 1 hastes de aterramento de cerca por buraco. As hastes foram compactadas com carvão e água. Na extremidade superior foi conectado cabo copperweld (16mm^2) através de conexão mecânica interligando as hastes entre si e de uma cava a outra, finalizando com compactação com terra, formando uma malha entre as oito hastes. Foram feitas escavações nos quatros pés da torre. Estas cavas tiveram formato quadrado com 1,5m de cada lado e na profundidade de 50 cm, para limpeza e aplicação de pintura. Também foi instalado um fio desde o solo até a distância de 2 metros abaixo do primeiro cabo fase, de tal forma a interligar a malha recém construída aos equipamentos eletrônicos próximo ao cabo fase. Este fio tem bitola de $1,5\text{mm}^2$ e foi fixado na torre através de pontos equidistantes de 2 metros, através de durepóxi, porém nos primeiros dois metros de altura a partir do nível do solo, este fio foi fixado na torre através de massa epóxi sikadur 32 de forma contínua. Foram instaladas 2 (duas) antenas de acoplamento medindo 33,3 mm de diâmetro por 6 (seis) metros de comprimento. Estas antenas foram fixadas através de suportes (dois por antena). Finalmente foi instalado um equipamento eletrônico por antena. Antes da instalação do PC de Grelhas pintou-se os pés das torres na região de afloramento previamente

escavada. O leito de anodos assim construído apresentou uma resistência de 780 Ohms.

Após a energização do “PC de Grelhas”, foi obtido o potencial de estrutura solo da torre protegida. O valor desse potencial (valor mínimo) para o ponto mais distante da entrada de corrente no pé da torre é de -750mV em função do eletrodo de referencia permanente cobre/sulfato de cobre saturado. O valor do potencial (valor máximo) para o ponto mais próximo da entrada de corrente no pé da torre é de -1100mV em função do eletrodo de referencia permanente cobre/sulfato de cobre saturado. Este valor foi monitorado de forma contínua durante 24 horas através do registrador corexco e do eletrodo de referência permanente e o valor permaneceu constante durante o tempo da experiência. Uma pequena variação foi observada, no intervalo de 6:00 as 10:00 horas da manhã. Esta pequena variação deve estar relacionada com a eliminação do orvalho condensado nas ferragens da superestrutura e na secagem da umidade superficial do solo com o advento do sol. O valor médio do potencial nessa torre é de -925mV . De acordo com a RP0169/83, com a RP0169/92 (revisão) e com a NORMA DIN 30676, a torre em questão está protegida, pois o valor mínimo pela RP0169/92 é de -850mV . No entanto a NORMA DIN 30676, assegura que o potencial mínimo para a torre estar protegida pode ser de -750mV caso a resistividade local estiver entre 100 a $1000\Omega\text{m}$. Esta norma também assegura que o potencial mínimo possa ser de -650mV , caso a resistividade local seja maior que $1000\Omega\text{m}$.

3.4 - RESULTADOS ELETROQUÍMICOS NO PERFIL DE AÇO ENTERRADO PRÓXIMO AO LABORATÓRIO

Um comportamento similar ao obtido nos estudos relacionados com os ítems acima foi verificado quando se fez polarização catódica no perfil de aço enterrado nas proximidades do laboratório.

3.4.1 Efeito da remanência metal-solo

A Fig.1 apresenta a variação do potencial com o tempo, para um experimento realizado após injeção de corrente constante de 60mA em uma cantoneira de aço galvanizado com $0,26\text{m}^2$ (230mA/m^2) durante 10 minutos.

A cantoneira de aço galvanizado em estudo, foi enterrada nas imediações do laboratório onde o solo apresenta uma resistividade elétrica de 80 Ohm.m. O potencial de corrosão dessa cantoneira

é de -570mV com relação ao eletrodo de cobre/sulfato de cobre saturado.

Ao introduzir uma corrente contínua de (230mA/m²), observa-se um potencial próximo de -2300mV e valor constante durante os 10 minutos de injeção de tal corrente. No momento da interrupção da corrente, verifica-se uma queda acentuada do potencial até próximo de -1000mV, seguido por uma evolução dos potenciais a valores mais positivos. Após 10 minutos a evolução dos potenciais atingiu um valor próximo de -660mV. Este valor é mais negativo que o potencial de corrosão da cantoneira (-570mV), porém mais positivo que o potencial de proteção do metal ferro (-850mV em condições de circuito fechado), conforme mostra a curva tracejada da Fig.1.

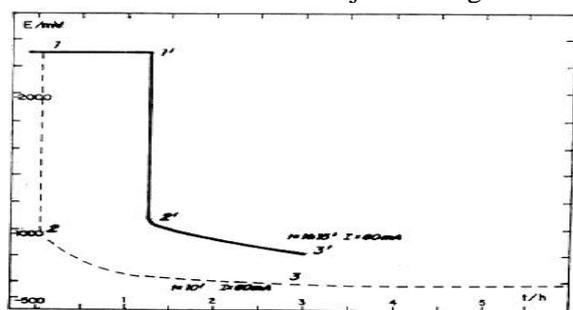


Figura 1- Variação do potencial com o tempo, para um experimento realizado após injeção de corrente constante de 60mA em uma cantoneira de aço galvanizado com 0,26m² (230mA/m²).

A curva contínua mostra uma evolução de potenciais a valores positivos bastante lenta quando comparado com a curva tracejada.

A diferença de potencial verificada nessa figura para o tempo de 3 minutos está relacionado com o fenômeno de polarização existente na estrutura enterrada, com maior intensidade durante a injeção da corrente em um maior tempo.

Com o aumento da polarização, há uma dificuldade no acontecimento das reações químicas envolvidas, e quanto mais polarizadas forem as reações, menor será a velocidade da corrosão na estrutura enterrada.

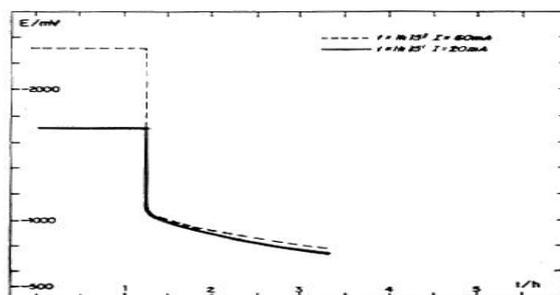


Figura 2- Variação do potencial com o tempo, para um experimento realizado após injeção de correntes constantes.

Enquanto a Fig.1 mostra o efeito do tempo de injeção de corrente no fenômeno de polarização, a Fig. 2 mostra o efeito da corrente na polarização das reações envolvidas. Assim na Fig.2, observa-se que, para um mesmo tempo de injeção de corrente (uma hora e quinze minutos), o fenômeno de polarização aumenta na medida em que se aumenta (de 20 mA na curva contínua para 60mA na curva tracejada) o valor da corrente. Com o aumento da polarização, as reações são dificultadas e consequentemente a velocidade de corrosão é inibida.

Na torre 79 foi feita injeção de corrente similar ao que está se discutindo neste ítem. A injeção de corrente foi feita através de um painel solar fabricado pela SIEMENS, modelo M55 21,7V/5A^o. O valor da corrente foi de 250mA em uma área de 100m² (2,5mA/m²) durante 6 horas.

Ainda na torre 79 foi feita injeção de corrente através de um temporizador de construção própria consorciado por 2 materiais juntamente com o "PC de Grelhas". O valor da corrente também foi de 250mA durante 15 minutos.

O efeito da remanência não foi verificado para a torre estudada (condição real), nem com ajuda do painel solar e nem com a ajuda do temporizador de construção própria, talvez pelo fato daquela torre receber uma pequena densidade (2,5mA/m²) de corrente quando comparada com a injetada no perfil de aço (230mA/m²). Para que as condições da torre seja as mesmas estabelecida no perfil de aço, a corrente a ser injetada na torre deveria ser de 23A. Esta corrente é muito alta e pode causar grande desprendimento de gás hidrogênio embaixo da pintura existente na região de afloramento da torre.

3.4.2 Utilização de gerador eólico

Podemos observar na figura 3 que o gerador eólico injeta potenciais próximos de -1600mV sobre a estrutura a ser protegida e, quando o vento cessa, o potencial decai rapidamente porém, a linha base mantém-se acima de -800mV em circuito aberto, ou seja, a estrutura mantém um potencial mais negativo ($>100\text{mV}$) que o potencial natural da estrutura, consequentemente protegendo a mesma. Também podemos observar que mesmo em períodos longos de ausência de vento (como no caso, 10 h), a linha base não decai para valores mais positivos que -800mV .

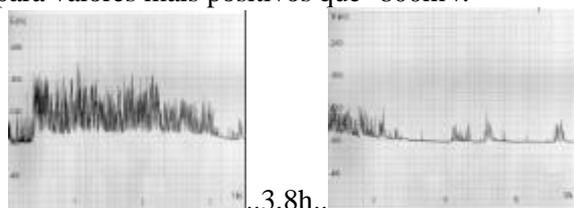


Figura 3. Variação do potencial com o tempo para o sistema com fonte de energia eólica.

3.4.3 Utilização de gerador eólico com choque de corrente

Após a aplicação, por 24 horas, de uma corrente contínua de 1900mA/m^2 , observa-se um potencial próximo de -3500mV . A figura 4 mostra que no momento da interrupção da corrente, o potencial decai rapidamente para valores próximos de -1100mV e continua com decaimento lento. Se, neste instante, tivermos condições de vento intenso, a linha base do potencial mantém-se próximo a -1000mV e caso isto não ocorra (vide fig 4.1), o potencial mantém-se próximo de -900mV , consequentemente a estrutura permanece protegida.

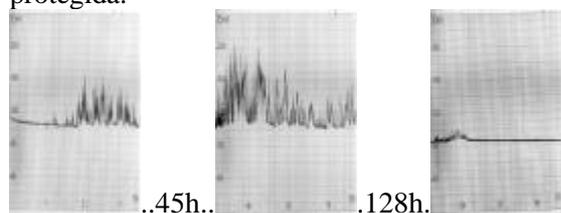


Figura 4. Variação do potencial com o tempo para o sistema com fonte de energia eólica (choque de corrente de 1900mA/m^2 durante 24h).

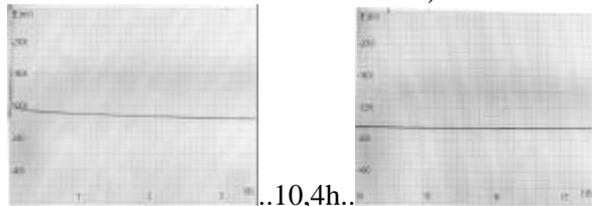


Figura 4.1. Variação do potencial com o tempo para o sistema com fonte de energia eólica (choque de corrente de 1900mA/m^2 durante 24h), em condições de pouco vento.

3.4.4 Utilização de gerador eólico com bateria recarregável

Quando introduzimos uma bateria recarregável ao sistema (figura 5), a amplitude do potencial mantém-se por algumas horas próximo de -1400mV (o tempo de permanência do potencial neste valor depende da carga inicial da bateria). Observa-se uma queda acentuada do potencial até próximo de -1000mV seguido de um decaimento lento. Em condições de vento intenso (fig. 5-b), observa-se uma pequena recarga na bateria, mas quando o vento cessa, o potencial decai novamente, mantendo a estrutura sempre protegida.

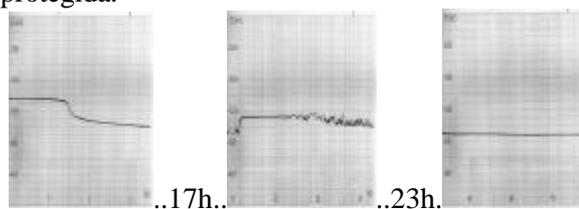


Figura 5. Variação do potencial com o tempo para o sistema com fonte de energia eólica e bateria recarregável.

3.4.5 Utilização de gerador solar

Na utilização de uma célula fotovoltaica (figura 6), observa-se que, em períodos de alta irradiação solar, o potencial mantém-se em torno de -1400mV porém, em períodos de baixa ou nenhuma irradiação solar, o potencial decai para valores próximos de -900mV . Neste sistema, com a remanência da polarização da estrutura, mantém-se a proteção mesmo em períodos de baixa irradiação solar.

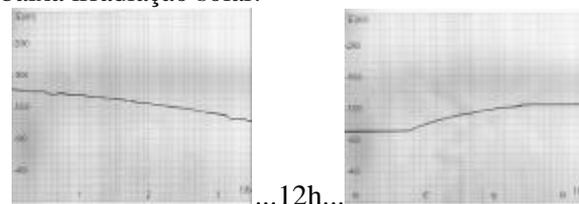


Figura 6. Variação do potencial com o tempo para o sistema com fonte de energia solar.

3.4.6 Utilização de gerador solar e bateria recarregável

Podemos observar na figura 7 que não houve diferenças significativas na utilização de uma bateria recarregável. Embora a célula fotovoltaica utilizada não suportasse a necessidade de corrente do sistema a ser protegido e mais a recarga da bateria, a estrutura manteve-se protegida.

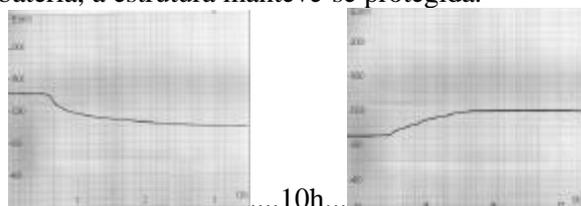


Figura 7- Variação do potencial com o tempo para o sistema com fonte de energia solar e bateria recarregável

3.4.7 Utilização de gerador solar e eólico

Quando utilizamos simultaneamente geradores solar e eólico mesmo em condições de pouco vento e baixa irradiação solar (figura 8), verifica-se um potencial em torno de -1100mV no período diurno e de -900mV durante o período noturno.

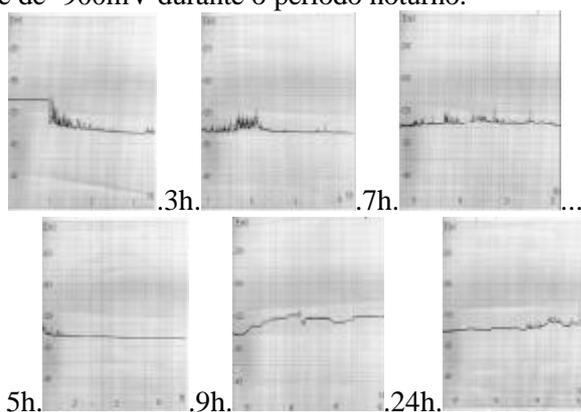


Figura 8- Variação do potencial com o tempo para o sistema com fonte de energia eólica e solar.

3.4.8 Utilização de gerador solar, eólico e bateria recarregável

Observa-se na figura 9, que em períodos de alta irradiação solar e vento intenso, o potencial oscila entre valores de -1600 e -1000mV para os períodos diurno e noturno respectivamente. O sistema híbrido formado por estes dois geradores apresenta um melhor desempenho para proteção da estrutura metálica mas, este sistema também não foi dimensionado para suportar também a recarga da bateria.

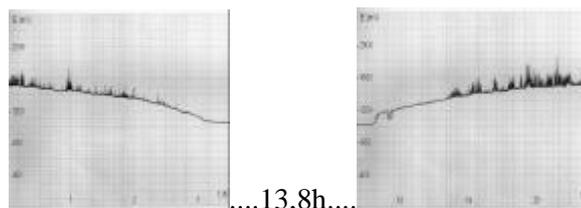


Figura 9- Variação do potencial com o tempo para o sistema com fonte de energia eólica, solar e bateria recarregável.

4.0 CONCLUSÃO

A partir ds resultados de laboratório, juntamente com as fotos acima citadas, nos leva a pensar que tudo se passa como se as reações catódicas fossem mais difíceis de acontecerem quando existe um filme de óxido aderente e possivelmente bastante defeituoso, onde o equilíbrio das reações catódicas fica dificultado devido a dificuldade da migração eletrônica e/ou iônica quando existe um filme superficial cheio de defeitos vacantes. Neste caso, fica fácil deslocar o equilíbrio catódico através de uma polarização catódica e como consequência fica mais fácil fazer a proteção catódica do material metálico quando este é o ferro ou aço comercial. A partir das inclinações de Tafel, obtém-se a densidade de corrente de proteção (valor médio). Para o estabelecimento de uma metodologia de avaliação da corrosão de grelhas metálicas, pode-se dizer que para $i_{p-m} < 2 \text{mA/m}^2$, a grelha pode ser considerada como nova ou de proteção facilitada. Para $2 \text{mA/m}^2 < i_{p-m} < 5 \text{mA/m}^2$, a grelha pode ser considerada como de proteção normal. Para $5 \text{mA/m}^2 < i_{p-m} < 20 \text{mA/m}^2$, a grelha pode ser considerada como proteção dificultada, implicando em reforço mecânica além da proteção catódica. Para $i_{p-m} > 20 \text{mA/m}^2$, a grelha necessita ser substituída. Para $\beta_{on} > 100 \text{mV/dec}$, a grelha pode ser considerada como nova ou de proteção facilitada. Para $20 \text{mV/dec} < \beta_{on} < 100 \text{mV/dec}$, a grelha pode ser considerada como de proteção normal. Para $\beta_{on} < 20 \text{mV/dec}$, a grelha pode ser considerada como proteção dificultada. Para $\beta_{off} > 50 \text{mV/dec}$, a grelha pode ser considerada como nova ou de proteção facilitada. Para $20 \text{mV/dec} < \beta_{off} < 50 \text{mV/dec}$, a grelha pode ser considerada como de proteção normal. Para $\beta_{off} < 20 \text{mV/dec}$, a grelha pode ser considerada como proteção dificultada.