XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica
SENDI 2008 - 06 a 10 de outubro
Olinda - Pernambuco - Brasil

Técnicas Simples de Prevenção de Falhas Prematuras em Cabos Elétricos e Acessórios Para Distribuição de Energia Elétrica.

Márcio Antônio Sens	Mauro Zanini Sebrão
CEPEL	**CEPEL**
sens@cepel.br	zanini@cepel.br

Palavras-chave: Aterramento; cabo elétrico; corrosão; distribuição; fadiga; vento.

Abstract

A technical investigation was made in the facilities of a distribution line in the coast of Rio Grande do Norte, where the operators told the occurrence of premature faults in the high voltage power cables of the electric network. According the reports, the electric insulators of the aerial net and the external terminals of the cables present visible luminous signs at night, characteristic of intense surface electric discharges, due saline surface contamination. Also, according to the reports and confirmed during the technical inspection, a strong smell of "rotten egg" exists in the proximities of the Operations Center, typical of the sulphide gas, H_2S. During the inspections, it was also verified a strong and constant wind to the electrical post of interconnection of the electric power distribution. The sulphide gas and the wind promoted a corrosion processes and fatigue in the ground braided flexible cables of tinned copper of the power cables, causing the interruption of this system. It was conclude that the 15 kV class isolated power cables were damaged by faults in the ground powers cable system. This technical article presents some simple techniques, of easy implementation and of quite reduced cost for prevention of premature faults in electric cables and accessory to electric power distribution.

Resumo

Um uma análise pericial foi realizada em uma instalação de distribuição de energia elétrica no litoral do Rio Grande do Norte, onde os operadores relataram a ocorrência de falhas prematuras nos cabos elétricos das instalações elétricas em alta tensão. Conforme relatos, os isoladores elétricos da rede aérea e os terminais externos dos cabos costumam ficar com sinais luminosos visíveis à noite, características de descargas elétricas superficiais intensas, decorrentes de elevada contaminação salina superficial. Também, conforme relatos dos operadores, e constatado durante a visita técnica, percebe-se um forte cheiro de “ovo podre” nas adjacências do Centro de Operações, característico de gás sulfídrico, H_2S. Durante as inspeções, constatou-se também um vento forte e constante no sentido dos postes de interligação com a rede de distribuição de energia elétrica. O gás sulfídrico e o vento promoveram processos de corrosão e fadiga nas cordoalhas de cobre estanhado do sistema de aterramento dos cabos isolados, ocasionando assim a interrupção deste sistema. Concluiu-se que os cabos elétricos isolados para a classe de 15 kV da rede foram danificados por falhas no sistema de aterramento dos mesmos. Este trabalho apresenta algumas técnicas simples, de fácil implementação e de custo bastante reduzido para prevenção de falhas prematuras em cabos elétricos e acessórios de redes de distribuição de energia elétrica.

1 - Introdução

As estações de energia elétrica instaladas em Macau - RN fazem parte do sistema de produção e escoamento de petróleo. Junto ao Centro de Operações opera uma unidade coletora de petróleo dos poços de produção do local e uma pequena subestação de 13,8 kV. Após dois anos de operação os técnicos da empresa prestadora de serviço relataram a ocorrência de falhas prematuras, a níveis de provocar incêndios, nos cabos das instalações elétricas em alta tensão. Como as linhas de alta tensão encontram-se bastante próximas ao mar, levantaram-se as hipóteses de corrosão acentuada nos cabos devido à salinidade da região ou o emprego de materiais inadequados para aquela região.

Em vista disto, o CEPEL adotou uma metodologia de investigação para diagnosticar a provável ou prováveis causas das falhas prematuras ocorridas nos cabos elétricos isolados e blindados. Foram então realizados ensaios, em laboratório, de amostras de cabos elétricos retiradas da linha de alta tensão e realizada uma análise pericial *in loco*.

As observações e as análises em laboratório realizadas mostraram que o agente causador das falhas prematuras nos cabos elétricos era o gás sulfídrico, H_2S, proveniente dos tanques de armazenamento de petróleo localizados próximos ao Centro de Operações, em conjunto com o vento forte e constante da região, que promoveram o processo de corrosão e fadiga nas cordoalhas de cobre estanhado do sistema de aterramento dos cabos isolados, ocasionando assim a interrupção e, conseqüentemente, elevando a tensão da blindagem em relação ao terra, a níveis superiores à suportabilidade da capa externa dos cabos. Estas condições resultaram em trilhamentos e rupturas dielétricas, capazes de provocar incêndios.

2 - Local de Inspeção

Além de praias paradisíacas o litoral do Nordeste brasileiro foi agraciado com um outro dom: muito vento em condições propícias para a geração de energia elétrica. Em janeiro de 2004 foram inaugurados três aerogeradores na praia de Soledade, município de Macau, Rio Grande do Norte. Juntos eles geram 1,8 MW – eletricidade suficiente para abastecer uma cidade de 10 mil habitantes. No entanto, a produção é focada para atender o consumo dos poços de petróleo de quatro campos explorados na região.

A entrada em operação desta usina eólica representou a economia anual de 33 milhões de metros cúbicos de água dos reservatórios da região Nordeste, além da redução da quantidade de emissão de CO_2 na atmosfera de 1.277 toneladas de metros cúbicos/ano[1].

Isto porque na região existem instalações de produção de petróleo *onshore* e *offshore*. As unidades de bombeio terrestre eram alimentadas pela rede elétrica com energia fornecida pela CONSERN - Companhia Energética do Rio Grande do Norte e a produção *offshore* possuía unidades de bombeio elétricas alimentadas por grupos de moto-geradores a diesel.

A **Figura 1** apresenta a vista geral da localidade onde estão instalados os aerogeradores, no município de Macau-RN. Como podem ser observados, os aerogeradores encontram-se bastante próximos ao mar.

FIGURA 1 – VISTA DOS GERADORES EÓLICOS.

As inspeções foram realizadas nas instalações de média tensão, em cabos isolados. Tais instalações fazem parte do sistema de produção e escoamento de petróleo. Junto ao Centro de Operações opera uma unidade de processamento de petróleo. Ao fundo do Centro de Operações está instalada uma pequena subestação de 13,8 kV, incorporando um compensador estático de energia reativa.

As **Figuras** 2, 3 e 4 mostram, respectivamente, o Centro de Operações, a estação coletora de petróleo e a subestação de 13,8 kV.

FIGURA 2 – CENTRO DE OPERAÇÕES.

FIGURA 3 – ESTAÇÃO COLETORA DE PETRÓLEO.

FIGURA 4 – SUBESTAÇÃO DE 13,8 kV

3 - Histórico das Ocorrências

Conforme relatos da equipe técnica de operação da usina eólica, por ocasião da solicitação das inspeções, ocorreram falhas prematuras nos cabos elétricos das unidades geradoras de modo repetitivo, após dois anos da entrada de operação da usina. Três segmentos de cabos elétricos foram encaminhados ao CEPEL e estes foram identificados como sendo cabos isolados para 8,7/15 kV, tipo Eprotenax Compactado, com condutores de cobre nu de 50 mm2 de seção. Tais cabos são de fabricação Pirelli, produzidos em 2003 conforme NBR 7286, com dielétrico de EPR e capa externa de PVC, previstos para operação em até 105 ºC. A blindagem condutora dos cabos é constituída por fios de cobre nu e as terminações originais dos cabos eram de fabricação Raychem, tipo termocontrátil, com quatro saias.

4 - Evidências de Falhas

As inspeções foram realizadas pelos técnicos do CEPEL e acompanhadas pelos técnicos de operação da usina eólica. Nas inspeções foram confirmadas as informações sobre as falhas e encontrados cabos com as terminações Raychem retiradas de operação por falha nos cabos. Nas amostras de cabos antigos, guardadas no almoxarifado do Centro de Operações, foram claramente evidenciadas as falhas nos cabos. Nas ocorrências de falhas, as terminações externas dos cabos foram refeitas em modelos de borracha de silicone. As **Figuras 5 e 6** mostram as amostras dos cabos retirados por falhas e armazenados no almoxarifado.

FIGURA 5 – CABOS COM TERMINAÇÕES EXTERNAS TERMOCONTRÁTEIS.

FIGURA 6 – DETALHE DAS TERMINAÇÕES EXTERNAS E DA CAPA DOS CABOS COM TRILHAMENTO ELÉTRICO.

Conforme relatos da equipe de operação da usina, os isoladores elétricos e terminais externos dos cabos costumam ficar com sinais luminosos visíveis à noite, características de descargas elétricas superficiais intensas, decorrentes de elevada contaminação salina superficial. Tais efeitos luminosos desaparecem por alguns dias após a limpeza das superfícies isolantes pela chuva.

Também, conforme relatos da equipe de operação da usina e constatado pelos técnicos do CEPEL durante a visita técnica, existe um forte cheiro de "ovo podre" nas cercanias do Centro de Operações, característico da emanação na atmosfera de gás sulfídrico, H_2 S, proveniente dos tanques de armazenamento de petróleo retirado dos poços de produção do local.

As **Figuras 7 e 8** mostram, respectivamente, os dutos de petróleo e um tanque de armazenamento de petróleo cru instalados próximos ao Centro de Operações.

Durante a inspeção constatou-se também um vento relativamente forte e constante nas cercanias do Centro de Operações. E este tinha sentido proveniente dos tanques de armazenamento de petróleo para o poste de interligação da geração eólica com a rede de distribuição da concessionária local – COSERN.

A **Figura 9** mostra o sentido do vento na região, mar-continente, que pode ser facilmente evidenciado na foto pela posição do fogo do *flair* e pela inclinação das árvores. Nota-se nesta foto também que os caules das arvores estão bastante inclinados na direção Leste-Oeste, demonstrando que o vento na região é bastante forte e tem predominância neste sentido.

FIGURA 7 – DUTOS DE PETRÓLEO.

FIGURA 8 – TANQUE DE ARMAZENAMENTO DE PETRÓLEO.

FIGURA 9 – DIREÇÃO E INTENSIDADE DO VENTO NA REGIÃO DA REDE ELÉTRICA

A **Figura 10** mostra o poste de interligação da usina eólica com a rede de distribuição.

A **Figura 11** mostra um conector de latão e cabos de cobre nu próximos ao Centro de Operações, corroídos, provavelmente, pela ação do H_2S.

FIGURA 10 – POSTE DE TRANSIÇÃO DA GERAÇÃO EÓLICA COM A REDE DE DISTRIBUIÇÃO.

FIGURA 11 – CONECTOR DE LATÃO E CABOS DE COBRE NU PRÓXIMOS DO CENTRO DE OPERAÇÕES.

5 - Gás Sulfídrico

O gás sulfídrico, H_2S, pode originar-se de várias fontes e muitas vezes são resultantes de processos de biodegradação, como por exemplo, a decomposição de matéria orgânica vegetal e animal [2]. Na indústria do petróleo o H_2S normalmente está presente nos reservatórios e nos campos onde há injeção de água do mar. Pode ser resultante de mecanismos de dissolução de sulfatos minerais, da decomposição de compostos orgânicos sulfurados etc. Outra fonte de H_2S tem sido atribuída a atividade da bactéria redutora de sulfato – BRS no interior dos reservatórios [3].

O H_2S é um gás altamente corrosivo ao cobre e, segundo a literatura[4], tem-se observado uma taxa de corrosão da ordem de 140 μm/ano para o cobre exposto em altas concentrações de gás sulfídrico. A reação química envolvida constitui no seguinte:

$$Cu + H_2S \rightarrow CuS + H_2,$$

resultando, portanto, em um produto de cor preta e pouco aderente, o sulfeto de cobre.

Ao contrário, em ambiente marinho, a presença de cloretos favorece a formação da pátina, $CuCl_2.3\ Cu(OH)_2$, que é de cor esverdeada e aderente.

Análises em laboratório do CEPEL, através do espectro de dispersão de energia e do método analítico de combustão direta (infravermelho), mostraram a presença de enxofre em quantidades significativas nas cordoalhas de aterramento. Este enxofre é proveniente do gás H_2S emanado dos reservatórios da estação coletora. A **Figura 12** mostra o espectro de dispersão de energia de uma cordoalha de aterramento retirada do poste de transição de geração eólica com a rede de distribuição, comprovando-se a presença de enxofre (S). O método analítico encontrou uma massa de 9,9105 mg de enxofre em uma amostra de cobre da cordoalha com massa de 1,1262 g. A **Figura 13** ilustra as condições de uma conexão elétrica entre um terminal de cobre e uma placa de alumínio das instalações da usina eólica.

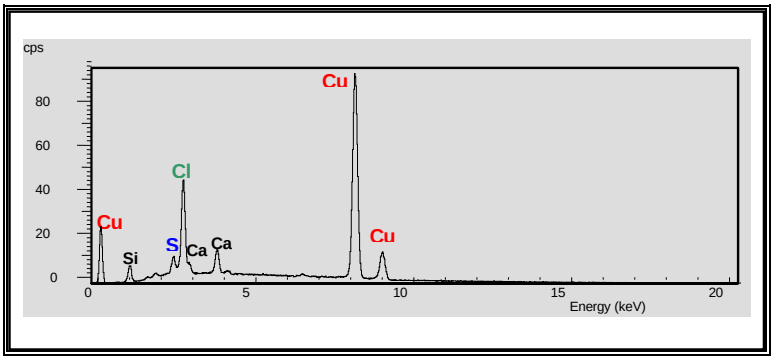

FIGURA 12 – ESPECTRO DE DISPERSÃO DE ENERGIA DA CORDOALHA DE COBRE ESTANHADA.

FIGURA 13 – CORROSÃO ACENTUADA DAS CONEXÕES ELÉTRICAS

6 - Cordoalhas de Cobre

Os cabos isolados e blindados para redes subterrâneas de energia em alta tensão são constituídos por um condutor central, geralmente de cobre, recobertos por uma camada semicondutiva para melhorar a formação cilíndrica e reduzir os campos elétricos. Sobre esta camada aloja-se o isolamento elétrico, geralmente de borracha de etileno propileno ou de polietileno, que novamente recebe uma camada semicondutiva como blindagem, para confinar o campo elétrico ao interior do cabo.

Esta última camada geralmente é constituída com base no mesmo material do isolamento, com adição de carga semicondutiva, e recebe como reforço condutor uma malha externa de fios de cobre, para a drenagem das correntes de fuga para a terra.

Como proteção contra agentes externos, o cabo conta com uma capa externa, geralmente de PVC, que não tem finalidades isolantes, já que em condições normais não será submetida a qualquer campo elétrico, considerando que a blindagem deve necessariamente ser aterrada, para segurança da instalação e dos operadores.

O aterramento da blindagem dos cabos é efetuado por cordoalhas de cobre estanhado, na forma de cinta, eletricamente conectadas com a malha condutora dos mesmos. A necessidade de tais condutores serem em malhas deve-se à necessidade da flexibilidade e das possibilidades de acomodação com o formato cilíndrico dos cabos, para permitir a bandagem com fitas isolantes e bloqueio da entrada de água para o interior do cabo.

A necessidade do estanhamento de tais cordoalhas justifica-se pelo uso externo, para a proteção contra a corrosão ambiental, para facilidade de conexão elétrica. Entretanto, a camada de estanho nem sempre resiste às condições atmosféricas severamente agressivas, pois geralmente é aplicada por eletrodeposição seguida por trefilação dos fios de cobre.

O processo de trefilação deforma a área transversal dos fios de cobre e pode promover irregularidades de espessura na camada de estanho eletrodepositada. Esta não uniformidade pode gerar falhas prematuras no revestimento de estanho, e permitir o início de corrosão do cobre, quando submetido a uma atmosfera contaminada pelo H_2S, gás sulfídrico.

A **Figura 14** apresenta as metalografias realizadas em uma cordoalha de cobre estanhado nova, não utilizada, onde se observa a deformação da seção transversal de dois fios de cobre e a não uniformidade da camada eletrodepositada de estanho.

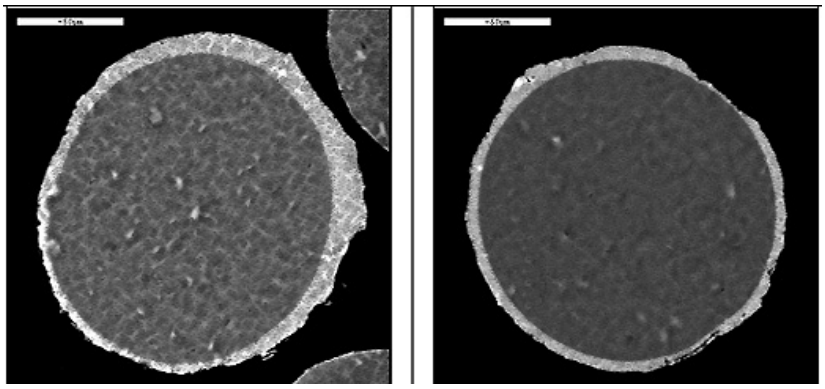

FIGURA 14 - SEÇÃO TRANSVERSAL DE DOIS FIOS DE COBRE ESTANHADOS E TREFILADOS DE UMA CORDOALHA NOVA. 500 X

O diâmetro médio encontrado do fio de cobre da cordoalha foi de 130 μm e as espessuras do revestimento de estanho variaram entre 5,0 e 16 μm.

7 - Ventos

A presença de ventos fortes e constantes na região da usina de geração eólica favorece a movimentação oscilatória e a fadiga das cordoalhas de aterramento, provocando pequenos rompimentos da camada de revestimento de estanho dos fios das mesmas. A presença de H_2S na atmosfera promove o processo corrosivo do cobre da cordoalha nas regiões não revestidas de

estanho, conduzindo os fios à ruptura, até o total rompimento da cordoalha, ocasionando assim a interrupção do aterramento elétrico nos cabos. Esta situação acarreta a flutuação dos cabos, isto é, eles perdem a referência da terra. Este fato certamente foi a principal causa responsável pelas falhas prematuras dos cabos elétricos, uma vez que sem o aterramento da blindagem dos cabos a tensão da mesma se eleva em relação ao terra a níveis superiores à suportabilidade da capa externa, ocasionando trilhamentos e rupturas dielétricas, podendo provocar incêndio.

8 - Considerações [5]

Para evitar novos rompimentos das cordoalhas de cobre pelo vento e pela corrosão, recomenda-se a eliminação ou redução das causas, ou seja, reduzir a ação do vento sobre as vibrações e evitar as ações dos compostos corrosivos;

Para eliminar os compostos corrosivos sobre as cordoalhas de cobre estanhado do aterramento dos cabos, estas devem ser substituídas por cabos de cobre isolados;

Para eliminar os efeitos vibratórios do vento, os condutores de aterramento devem ser rígidos nos cabos, nos isoladores e nas cruzetas dos postes elétricos;

Como medida de segurança contra eventuais rupturas dos aterramentos elétricos externos, todos os terminais de cabos localizados no interior dos equipamentos devem ser aterrados.

Como tais terminais já estão protegidos do vento e da maresia, o aterramento pode continuar a ser em malhas de cobre estanhado, que já demonstrou resistência ao ambiente fechado dos transformadores, conforme **Figura 15**.

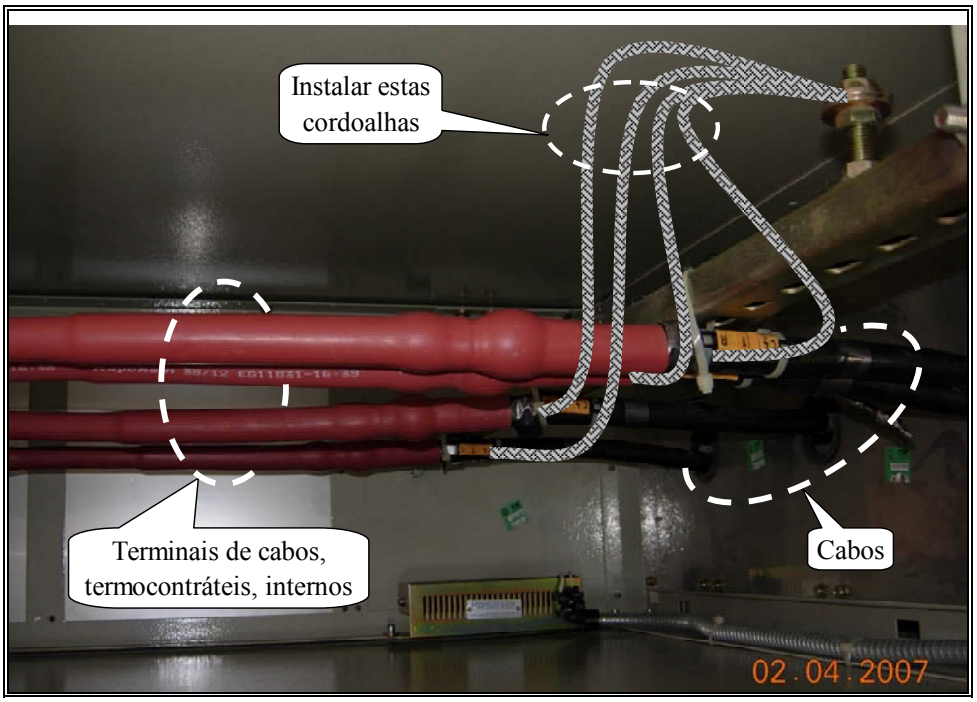

FIGURA 15 – ATERRAMENTO RECOMENDADO NOS TERMINAIS INTERNOS DOS CABOS

Considerando a alta possibilidade de descargas elétricas superficiais nos isoladores de porcelana das linhas aéreas, recomenda-se a substituição por isoladores de classe de isolamento superior àqueles que apresentam descargas elétricas luminosas visíveis;

No final das terminações dos cabos externos deve ser mantido um anel metálico aterrado para facilitar o escoamento das correntes de fuga para a terra, anel de guarda, conforme **Figura 16**. Este anel poderá ser constituído de cobre estanhado com espessura mínima de revestimento de estanho de 30 µm ou alumínio ou cobre com revestimento de níquel. A escolha de um ou de outro material dependerá da resistência mecânica requerida no local de serviço;

As demais partes metálicas da blindagem devem ser isoladas ou protegidas contra o contato com o ar ambiente e rígidos para impedir a movimentação pelo vento, conforme **Figura 16**.

Recomenda-se também atenção especial para as conexões elétricas entre metais distintos, como aquelas mostradas na **Figura 13**. Entretanto, o assunto foge ao escopo deste trabalho.

FIGURA 16 – RECOMENDAÇÕES PARA AS CONEXÕES DE ATERRAMENTO

9 - Conclusões [5]

9.1 Após as inspeções no local e coleta de informações com os operadores do Centro de Operações, concluiu-se que os cabos elétricos isolados para a classe de 15 kV da usina eólica de Macau – RN foram danificados por falha no sistema de aterramento dos mesmos;

9.2 A falha do sistema de aterramento dos cabos ocorreu por ruptura das cordoalhas de cobre estanhado dos terminais externos dos cabos;

9.3 A ruptura das cordoalhas de cobre estanhado ocorreu por fadiga mecânica e por corrosão;

9.4 A fadiga mecânica das cordoalhas ocorreu por constante movimentação das mesmas pelo vento da região e por falta de fixação adequada das cordoalhas;

9.5 A corrosão das cordoalhas de cobre ocorreu pela umidade ambiente e pela presença de gases contendo enxofre, principalmente o gás sulfídrico, H2 S, proveniente da estação coletora.

9.6 A presença do enxofre no ambiente é bem mais acentuada nas proximidades do Centro de Operações, sendo proveniente do processo de produção e escoamento do petróleo.

10 - Referências Bibliográficas

[1] - http://super.abril.com.br/pordentrodatecnologia/docs/info2004_3.pdf, acesso em 06/01/2008, "Entenda como e por que a Petrobras entrou pra valer no campo da exploração da energia eólica no Brasil";

[2] - http://www.proacaors.com.br/php/artigos.php?id=7, acesso em 06/01/2008, "Espaços Confinados - Gás Sulfídrico – H_2S, por Eng. Jones Favretto;

[3] - http://www.clickmacae.com.br/?sec=47&cod=559&pag=coluna, acesso em06/01/2008, "H_2S o gás da morte", por Mário Cesar;

[4] - ASM – AMERICAN SOCIETY FOR METALS. Metals Handbook: corrosion. 9 ed. Ohio: Metals Park. 1987. v 13. 1415 p.

[5] - Márcio Antônio Sens e Mauro Zanini Sebrão, Relatório Técnico CEPEL - Departamento de Tecnologias Especiais - DTE – 16712/2007 - "Análise Pericial em Instalação Elétrica de 15 kV da Usina Eólica da Petrobrás em Macau - RN".