



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

FI/GMI/02
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO - XII

GRUPO ESTUDO DE ASPECTOS TÉCNICOS E GERÊNCIAS DE MANUTENÇÃO - GMI

NASCIMENTO E CRESCIMENTO DE WHISKERS EM PLACAS ELETRÔNICAS - UMA AMEAÇA AO SISTEMA DE SEGURANÇA DE USINAS NUCLEARES – TÉCNICA DE DETECÇÃO

Márcio Antônio Sens (*)
**CEPEL – CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA
ELÉTRICA**

Diogo D. O. Cunha
Eletrobras - Eletronuclear

RESUMO

Uma técnica de inspeção em circuitos eletrônicos antigos, com mais de 30 anos, permite a detecção de possíveis filamentos metálicos que crescem a partir de superfícies metálicas de estanho puro ou de níquel, denominados *whiskers*, ou bigodes de gato, que podem ser responsáveis por falhas inexplicáveis em sistemas de proteção de usinas nucleares. Os filamentos costumam ter espessuras micrométricas, mas comprimentos suficientes para provocarem curtos-circuitos entre componentes eletrônicos normalmente isolados ou entre ilhas de soldagem de componentes de placas de circuitos impressos. A técnica é não destrutiva e consiste na detecção da condutividade elétrica de filamentos visíveis ao microscópio óptico.

PALAVRAS-CHAVE

Manutenção; Whisker; Termonuclear; Falha; Detecção

1.0 - INTRODUÇÃO

O tema constitui novidade, ou está pouco explorado, sendo relacionado à segurança de usinas nucleares. Trata-se, especificamente, de usinas antigas, com mais de 30 anos de idade de construção, onde circuitos eletrônicos impressos, contendo trilhas eletrônicas cobertas por estanho eletrolítico podem conter um efeito de nascimento e de crescimentos de grãos microscópicos, retilíneos, capazes de provocar curtos-circuitos entre componentes eletrônicos e levar a transientes e atuações indevidos de sistemas da usina, inclusive sistemas de segurança. Este fenômeno foi denominado de *Whiskers*, pela semelhança com bigodes de gato.

Não se tem conhecimento da identificação ou da ocorrência do fenômeno, ou algo de natureza semelhante no Brasil, ou pelo menos não se tem notícias de falhas em sistemas eletrônicos que tenham sido atribuídas a tal fenômeno. Possivelmente, o mesmo possa ter ocorrido, mas por falta de conhecimentos, nada se encontrou na literatura nacional sobre o assunto. Ao nível internacional, os *whiskers* têm sido apontados como causadores de falhas em sistemas eletrônicos de usinas nucleares e, sobretudo, de sistemas eletrônicos alojados em espaçonaves e satélites artificiais antigos, conforme divulgação na NASA – Administração Nacional da Aeronáutica e do Espaço, agência do Governo dos Estados Unidos da América [1]. Fenômenos semelhantes foram relatados por equipes de manutenção e por fabricantes de usinas nucleares norte-americanas [2].

Ao nível internacional, o fenômeno *whiskers* não constitui novidade, conforme citado, entretanto, a identificação do mesmo ou a negação da hipótese de existência em cartões eletrônicos tem sido através de análise em microscópio eletrônico, em pequenas amostras. Ocorre que a retirada de placas eletrônicas de sistemas de supervisão e de segurança de usinas termonucleares, antigas, como as brasileiras, nem sempre permitem o corte e a destruição das mesmas para análise e detecção de *whiskers*. Estes cartões, embora pequenos em tamanho, quase sempre menores que uma página de papel tamanho A4, se constitui em verdadeiras joias em questões de valores, que

(*) Avenida Horácio Macedo, 354 – Sala 123 – Ilha do Fundão – 21941-911 – Rio de Janeiro – RJ - Brasil
Tel: (+55 21) 2598-2152 – Email: sens@cepel.br

giraram em torno de vinte e cinco mil dólares norte-americanos. Desta forma, para não destruir as amostras, de tamanhos incompatíveis com os espaços disponíveis no interior das câmaras de microscopia eletrônica do Cepel, foi desenvolvido técnica alternativa, baseada em microscopia óptica e de detecção de condutividade elétrica, capazes de identificar ou de negar a existência dos *whiskers* em tais placas. Esta técnica não tem sido encontrada na literatura e se constitui em uma inovação.

Os estudos foram originados em decorrência de uma falha ocorrida em usina termonuclear, justamente em cartões eletrônicos, aparentemente sem qualquer falha visível, levando ao levantamento da hipótese da existência dos *whiskers* para a justificativa da ocorrência que culminou com o desligamento da usina, implicando perdas de faturamentos da ordem de milhões de reais. O presente informe técnico mostrará os resultados de análises em duas placas eletrônicas retiradas de um sistema de segurança de uma usina nuclear brasileira, em operação por mais de vinte anos, onde foram identificadas as hipóteses de existência dos *whiskers*, através de imagens em microscopia óptica e por lupas de alta magnificação, por semelhanças com bigodes de gato entre componentes eletrônicos.

O presente informe técnico pretende informar à comunidade do Setor Elétrico Nacional sobre a existência do fenômeno e das possibilidades do surgimento do mesmo entre componentes eletrônicos antigos, que podem ou poderão justificar falhas aparentemente sem outras justificativas. Além disto, detalhará as técnicas desenvolvidas para a comprovação ou negação da hipótese, sem destruição das amostras que, pelo elevado valor poderão retornar à operação em caso de serem consideradas aptas. Mesmo com a existência dos *whiskers*, as placas ainda podem estar funcionando adequadamente, se estes ainda não atingiram elevados comprimentos, capazes de curto-circuitarem componentes e trilhas eletrônicas. Mostrar-se-á que nestes casos, os porventura existentes *whiskers* poderão ser removidos, antes de provocarem danos às placas eletrônicas.

Assim, leva-se ao conhecimento do Setor Elétrico Nacional a existência desta ferramenta de análise pericial de sinistros e, sobretudo, de prevenção dos mesmos, pela possibilidade de identificação da existência do fenômeno *whiskers* e de combate aos mesmos, antes da ocorrência de novas falhas envolvendo o controle e a segurança de usinas elétricas.

2.0 - LEVANTAMENTO DA LITERATURA

Não foram encontradas literaturas nacionais sobre o assunto aqui denominado *whiskers*. Por outro lado, a nível internacional o assunto constitui-se em plena divulgação. Uma página disponibilizada pela NASA^[3] relata três publicações sobre o assunto em *Military Specifications Review for EEE Parts*, 36 publicações em *NASA Goddard Publications*, e 226 publicações em *Industry/Academia Publications*.

Somente em uma das literaturas encontram-se muitas outras referências^[4] aos riscos de falhas em circuitos eletrônicos pelos *whiskers*, onde em metais como estanho, zinco, cádmio, prata e outros foram observados o crescimento de filamentos metálicos chamados bigodes. Particularmente os filamentos de estanho em estruturas cristalinas poderiam crescer de forma aleatória a partir de qualquer componente de estanho ou de superfície de uma trilha eletrônica. Observou-se que os filamentos de estanho podem crescer em comprimentos de vários milímetros e, em casos raros, até 10 mm de comprimento. O chumbo tem sido adicionado ao estanho utilizado em galvanoplastia para inibir o crescimento de bigodes.

Segundo levantamento efetuado pela equipe técnica da Eletronuclear em Angra dos Reis - RJ, pesquisas internacionais demonstraram que existem, por parte da indústria nuclear, relevante preocupação com os chamados *Whiskers*, podendo causar interferências ou falhas em circuitos eletrônicos. Os *Whiskers* foram observados predominantemente em pontos de solda, mas também podem ser encontrados em terminais de diversos componentes eletrônicos.

Muitas falhas em sistemas eletrônicos têm sido atribuídas a curtos-circuitos pela formação de *Whiskers* e diversos eventos ocorreram em usinas nucleares devido à presença deste fenômeno nos cartões eletrônicos que compõem os diversos sistemas, entre eles os sistemas de proteção do reator.

A **Figura 1** mostra a presença marcante de *whiskers* em um capacitor metálico com suportes niquelados, retirado de uma espaçonave antiga^[5]. A citada figura mostra grande semelhança com um pelo de gato e não apenas com os bigodes. A visualização dos *whiskers* do capacitor foi obtida por microscopia óptica – NASA^[6].

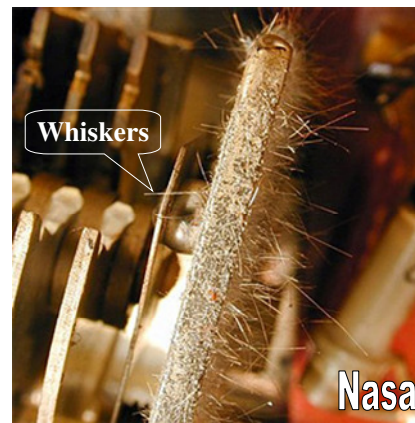


Figura 1 – Capacitor Retirado de Espaçonave com Whiskers ^[5]

Na **Figura 2** um componente conector eletrônico, niquelado, apresenta-se totalmente recoberto por filamentos, típicos de *whiskers*, numa divulgação também da Nasa ^[7].



Figura 2 – Whiskers em Terminais Niquelados de Placa Eletrônica ^[7]

Quando os filamentos são observados através de microscopia eletrônica, pode ser confirmada a natureza metálica dos mesmos e, nestes casos, observa-se também a característica bastante retilínea dos *whiskers*, conforme também divulgado pela NASA e apresentado na **Figura 3**.

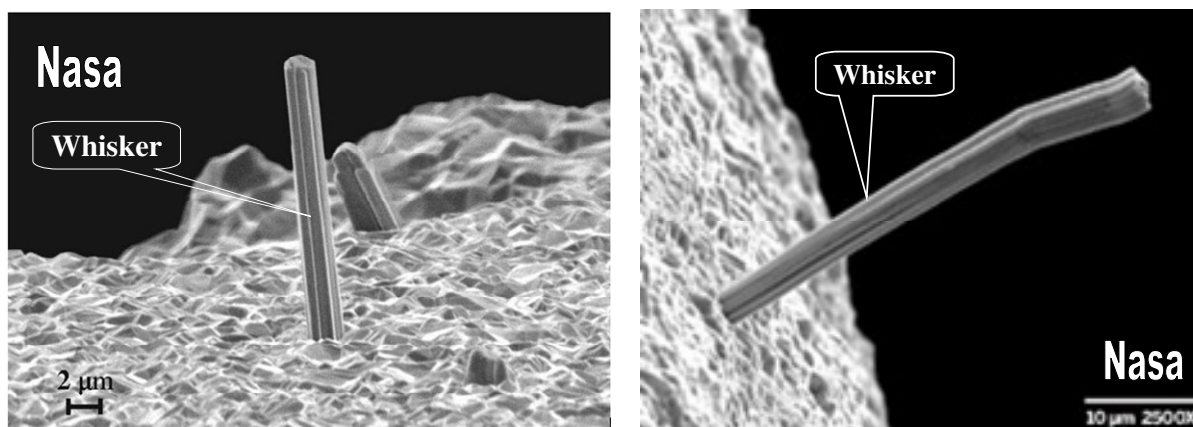


Figura 3 – Identificação de Whiskers por Microscopia Eletrônica [8]

3.0 - PROCEDIMENTOS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Duas amostras de placas eletrônicas antigas, pertencentes à Usina Termonuclear de Angra 1 foram avaliadas para a detecção de whiskers. A primeira providência tomada com as placas eletrônicas foi a localização dos chamados bigodes de gato por meio de microscopia óptica. Após esta localização nas placas, tentou-se uma comprovação se os aparentes bigodes seriam mesmo metálicos, através de microscopia eletrônica. Entretanto, pelas dimensões das placas, não foi possível o alojamento destas no interior da câmara de análise disponível no Cepel. Também não havia possibilidades de corte das placas, pois estas deveriam retornar à Usina de Angra para possível utilização.

Desta forma, foi montado um sistema de ensaios, com a utilização de uma microsonda, constituída por agulha metálica utilizada em acupuntura, um eletrômetro analógico e um posicionador micrométrico, triaxial, de um antigo microscópio eletrônico.

O sistema precisava ser suficientemente sensível para identificar a condutividade elétrica metálica, mesmo com óxidos superficiais, e suficientemente seguro para não danificar os componentes eletrônicos pela corrente elétrica de ensaio. Desta forma, a tensão escolhida foi de 100 V, para vencer possíveis camadas metálicas oxidadas e a corrente foi limitada em 10 nA, para não danificar os componentes eletrônicos tocados pela microsonda.

A **Figura 4** mostra a montagem experimental real, no interior do laboratório de Propriedades Elétricas e Magnéticas do Cepel na Ilha do Fundão, e a **Figura 5** mostra um croqui do sistema montado para os propósitos descritos, incluindo a instrumentação principal.

Na **Figura 4** destacou-se o nanoamperímetro e o posicionador micrométrico do eletrodo, ou da microsonda, destinada ao contato com os filamentos, cuja condutividade elétrica se pretende detectar.

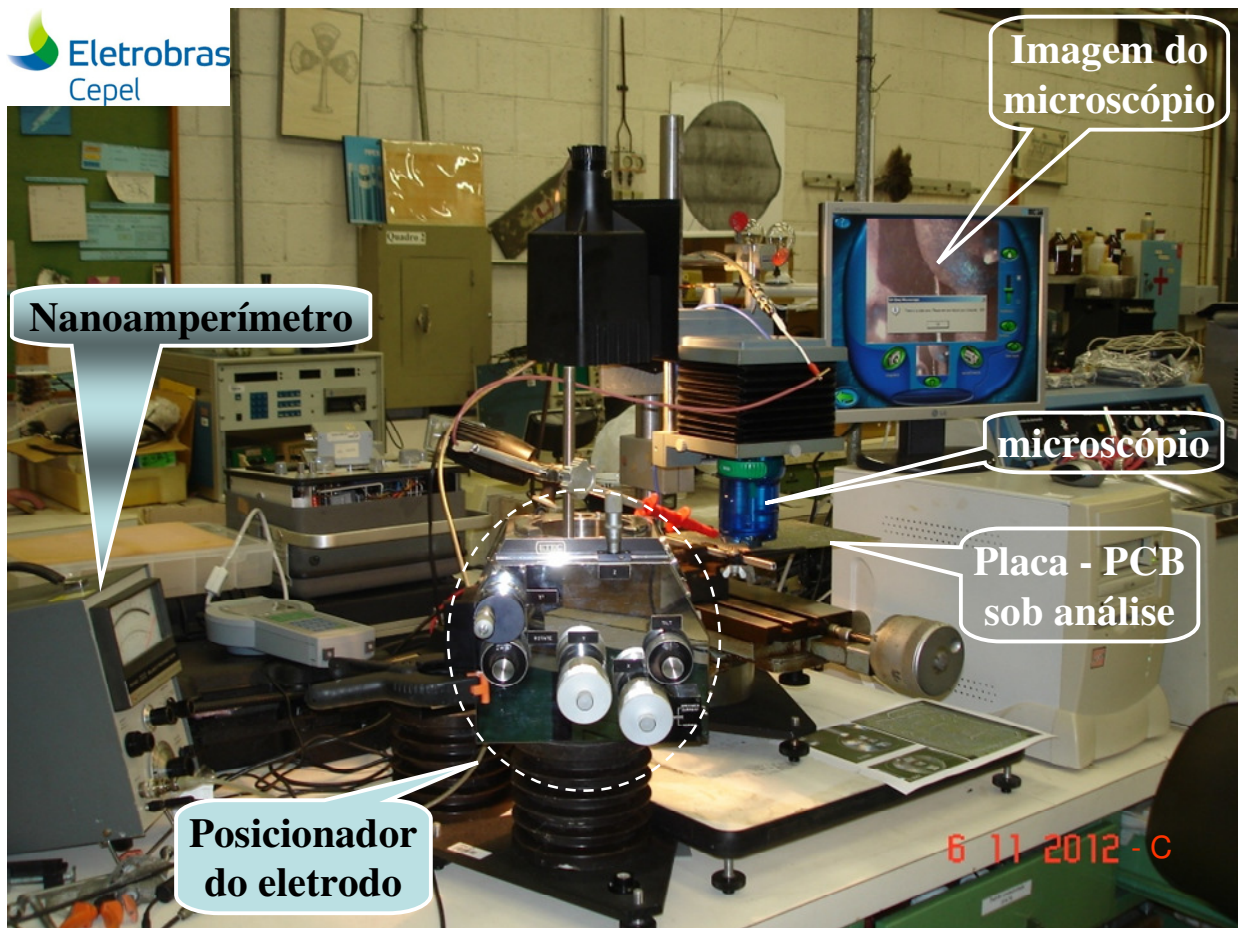


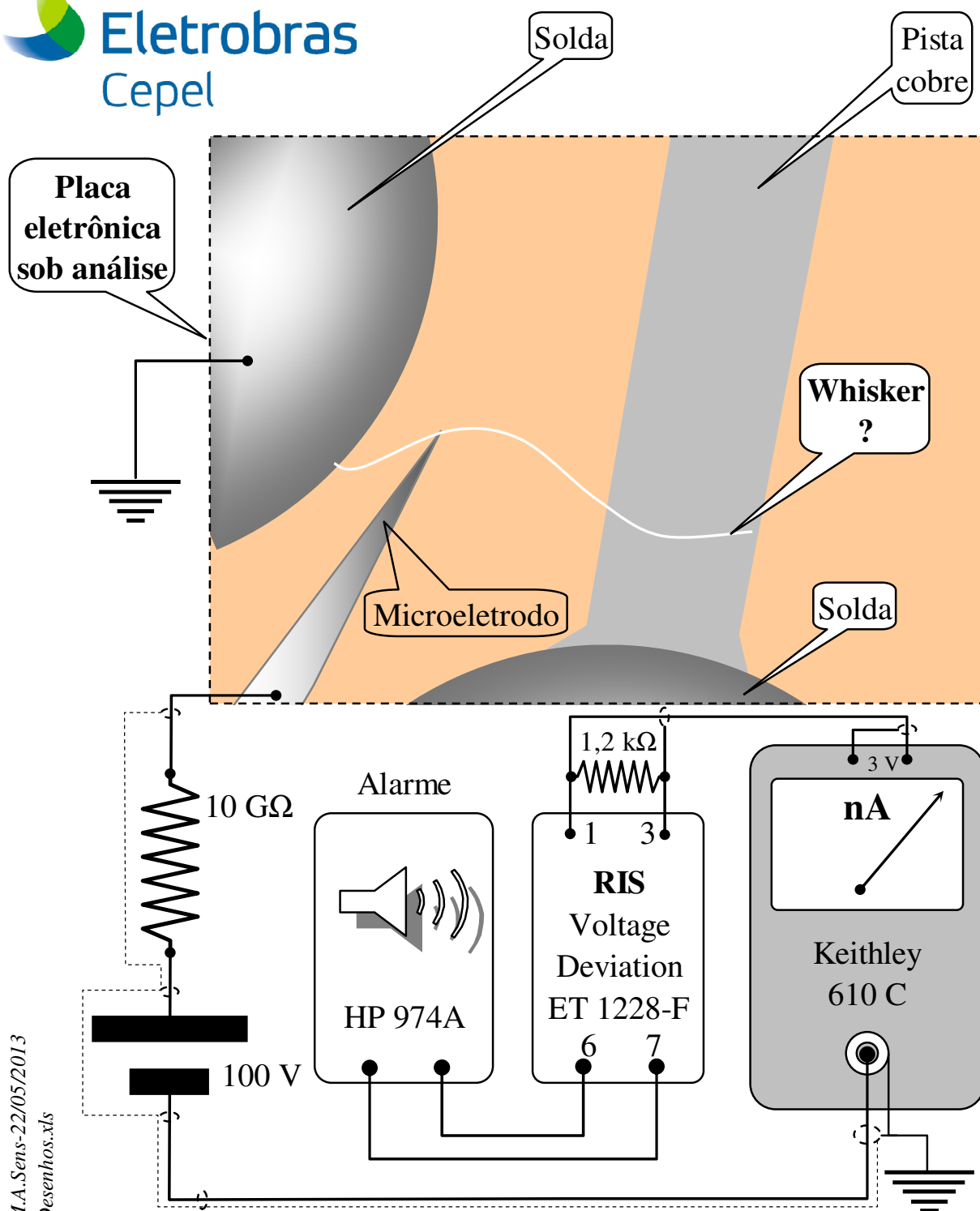
Figura 4 – Montagem do Sistema de Identificação de Whiskers pela Condutividade Elétrica

Destaca-se, na figura acima, uma placa de circuito impresso sob análise, uma imagem de microscópio óptico em um monitor, com o microeletrodo na direção de uma ilha de soldagem de componente eletrônico. A placa pode ser movida através da mesa de coordenadas e o microeletrodo pode ser movido micrometricamente através do posicionador, provido de uma série de ajustes em diferentes eixos, incluindo de rotação.

Destaca-se ainda, na mesma figura, o nanoamperímetro conectado à fonte de alimentação de 100 V em corrente contínua e ao microeletrodo, através de cabo ultraflexível, isolado em borracha de silicone.

O sistema de ensaios também inclui um alarme, mostrado no esquema da [Figura 5](#), que indica sonoramente a continuidade elétrica entre a microsonda e o ponto comum, aterrado, constituído pela barra de contatos elétricos de saída e entrada da placa eletrônica sob avaliação.

Como pode ser observado na [Figura 6](#), o sistema de identificação de *whiskers* pela condutividade elétrica inclui uma mesa de coordenadas, pesada e rígida o suficiente para não vibrar durante as análises, com um sistema de fixação e de movimentação da placa eletrônica sob análise, assim como inclui um posicionador vertical de ajuste grosso e fino para o microscópio óptico, com interface para um monitor por conexão USB.



M.A.Sens-22/05/2013
Desenhos.xls

Figura 5 – Sistema de Identificação de Whiskers pela Condutividade Elétrica – Circuito

O sistema de ensaios foi provido de um microscópio óptico com ampliações de 10, 20, 60 e 200 vezes, entretanto, somente até a ampliação de 60 vezes foi utilizada. Para a análise, inicialmente a placa se move com a mesa de coordenadas até a área onde se encontra um ou mais filamentos suspeitos. Isto pode ser efetuado, primeiramente, com a ampliação de 10 vezes e depois com as ampliações de 20 e 60 vezes. Para isto se faz necessário ajustar o foco do microscópio e o deslocamento vertical, pelos ajustes grosso e fino. A iluminação já está incorporada no microscópio, que pode ser acionada ou desligada pelo aplicativo visualizado no monitor, ou pode ser indireta, externa, por foco controlado de lâmpada incandescente.

Uma vez que o filamento sob avaliação foi centrado na tela do monitor, como mostrado na [Figura 4](#) e na [Figura 6](#), movimenta-se o microeletrodo, ou microsonda, pelo posicionador micrométrico triaxial, para esse tocar no filamento e verificar a condutividade elétrica. Em caso de continuidade elétrica do filamento, o alarme sonoro será acionado, pela deflexão do nanoamperímetro.

Verifica-se a boa sensibilidade do sistema de detecção pelo toque da microsonda com qualquer parte condutiva da placa eletrônica, como pontos de soldas, trilhas descobertas, ou terminais de componentes eletrônicos. O toque da microsonda com qualquer parte condutiva deve implicar no acionamento do alarme sonoro. Caso isto não ocorra, pode haver falta de contato elétrico de algum dos terminais de entrada e saída de sinais elétricos da placa sob análise.

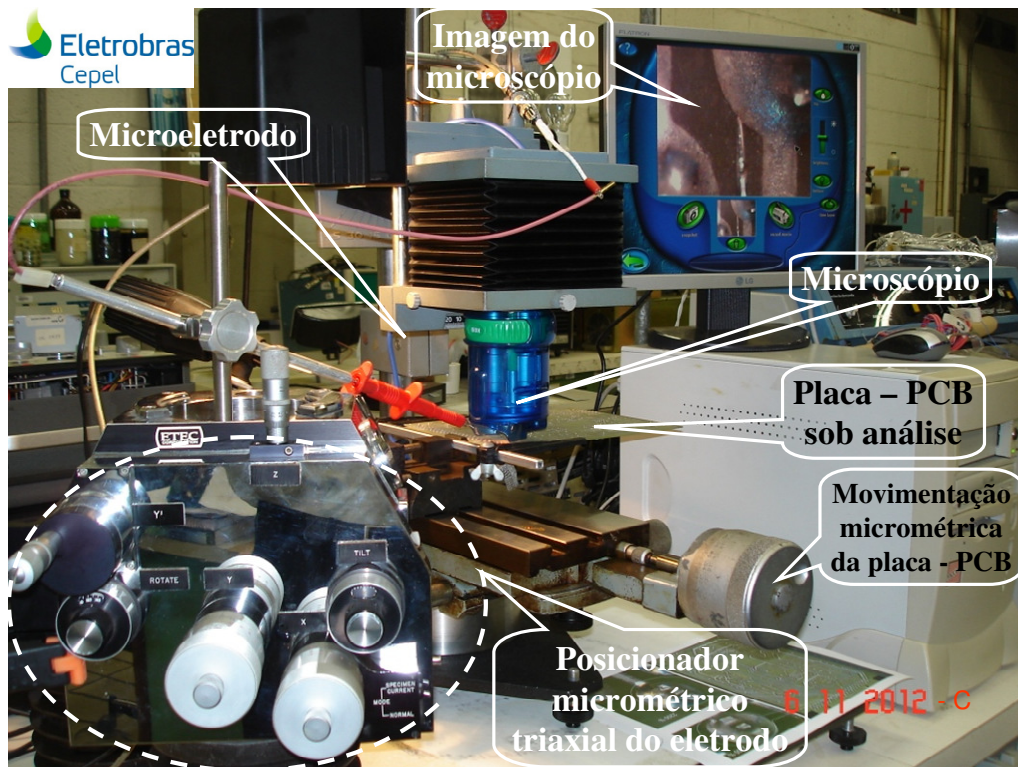


Figura 6 – Detalhe do Posicionador Micrométrico do Sistema de Identificação de Whiskers

O sistema de aterramento da placa sob avaliação foi efetuado por uma cordoalha de cobre estanhado, macia e facilmente encaixável entre os contatos da placa. O sistema de aterramento da placa sob avaliação é mostrado pela parte inferior da mesma, na [Figura 7](#).

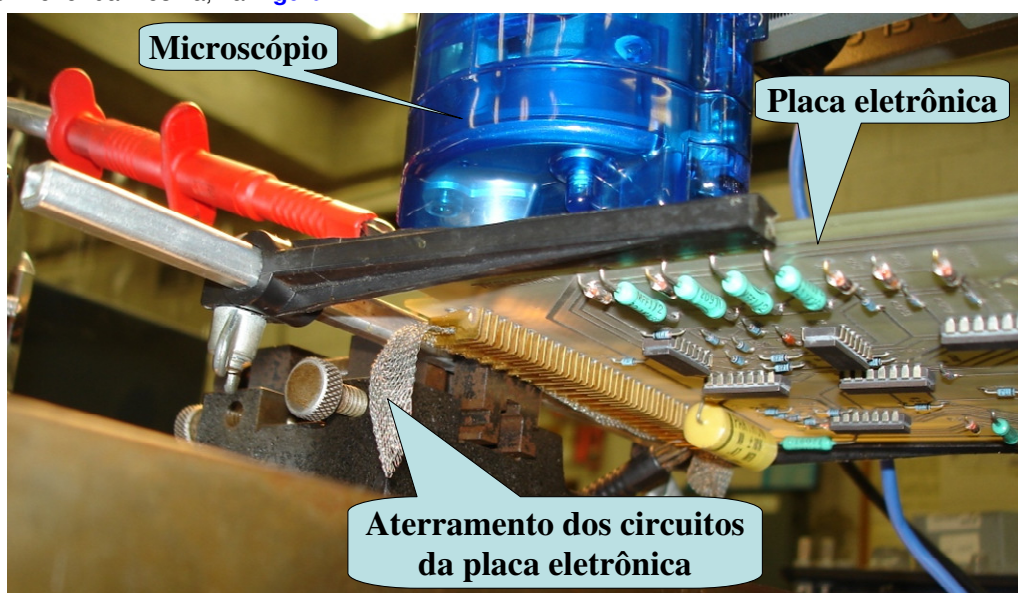


Figura 7 – Vista Inferior da Placa Eletrônica e do Aterramento do Sistema de Identificação de Whiskers

A **Figura 8** mostra uma vista geral do sistema de identificação de *whiskers* pela condutividade elétrica, destacando-se o projetor de iluminação externa.

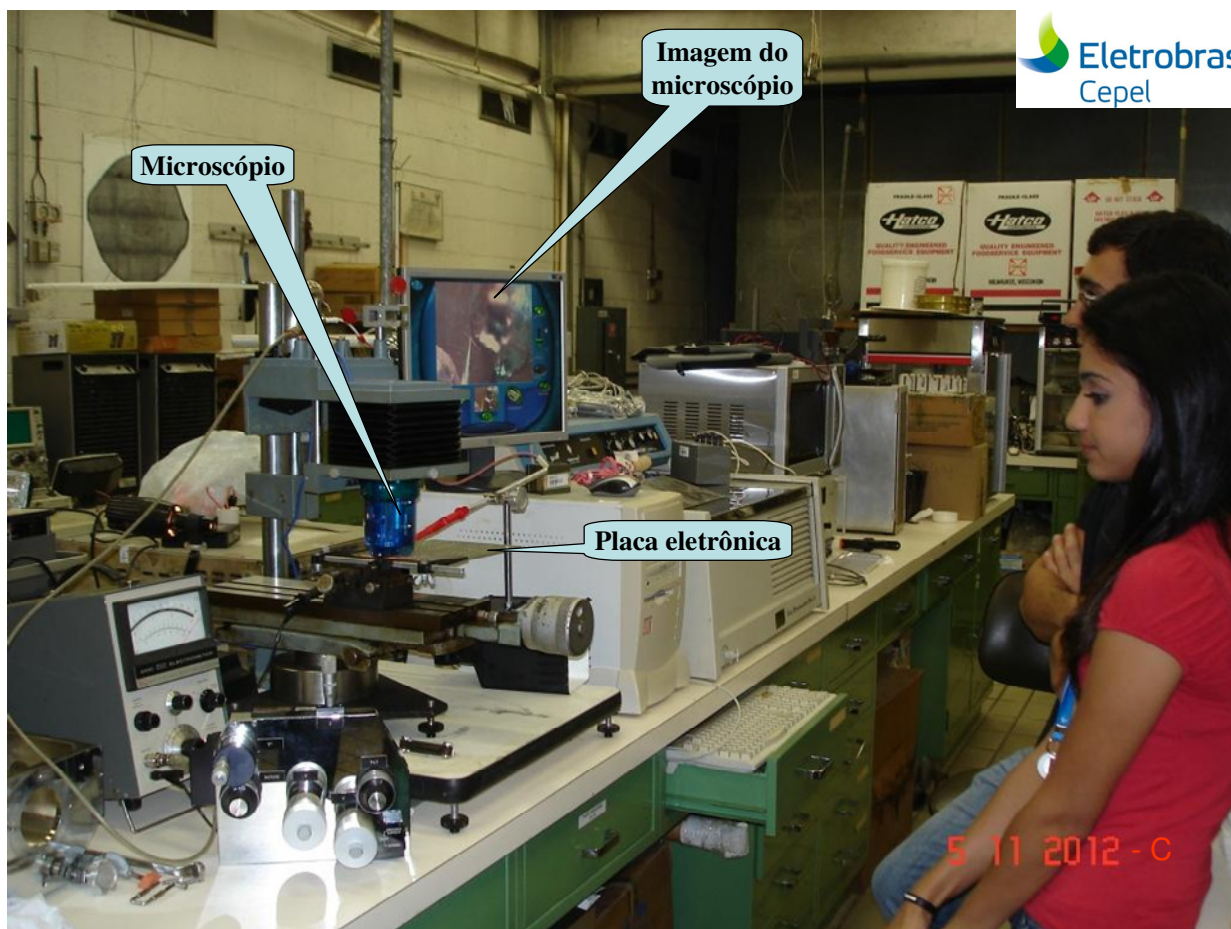


Figura 8 – Vista Geral do Sistema de Identificação de Whiskers pela Condutividade Elétrica

4.0 - CONCLUSÃO

Efetuuou-se uma investigação, através de microscopia e de condutividade elétrica por microsonda, ou microeletrodo, em duas placas eletrônicas da Usina de Angra 1, pertencentes ao sistema de segurança do reator de Angra 1 e não foram encontradas evidências de *whiskers*. Estas placas foram avaliadas no último procedimento de teste de rotina do sistema de proteção do reator da Usina de Angra 1, pela equipe técnica de Angra 1, em 31/08/2012, quando estava em andamento o teste PI-I 24 (Teste nos Canais de Pressão da Linha de Vapor Principal), e foram levantadas hipóteses de que estariam com *whiskers* (bigodes de gato) típicos de circuitos eletrônicos com superfícies de estanho puro ou de níquel puro.

Alguns indícios de ocorrências de *whiskers* foram encontrados, de fato, nas placas avaliadas, por visualização em microscópio óptico. Entretanto, nos testes de condutividade elétrica com microssondas não foram comprovadas as hipóteses. Alguns bigodes foram facilmente removidos com uso de aspirador de pó, sem uso de escovas ou pincéis. Outros foram persistentes e apenas foi possível removê-los com ação mecânica localizada, pela própria microsonda, quando manipulada com microposicionador e auxílio do microscópio.

Concluindo, os falsos *whiskers* encontrados nas placas examinadas no CEPEL não eram de materiais eletricamente condutivos. Os ensaios foram conduzidos com tensão máxima de 100 V em corrente contínua máxima de 10 nA e não foram detectados quaisquer filamentos estranhos aos circuitos que fossem eletricamente condutivos.

Pela análise da literatura, foi possível identificar que os filamentos denominados *whiskers* são constituídos por um ou mais segmentos metálicos retilíneos, com a aparência bem semelhante ao do bigode de gato, contendo uma

raiz de apoio, onde nasce, e uma ponta. Filamentos contendo curvas ou dobras não retas dificilmente podem ser de mesma origem. Além disso, a principal confirmação do potencial risco de tais filamentos, de qualquer aparência, está na confirmação da condutividade elétrica, seja por microscopia eletrônica ou pela técnica utilizada na presente análise e descrita neste Informe Técnico. Mesmo com a característica retilínea, o filamento não representa riscos de danos ao circuito eletrônico se for eletricamente isolante, como de um filamento oriundo de teia de aranha.

5.0 - REFERÊNCIAS

- [1] NASA, "Preliminary Guidance for Optical Inspection for Metal *Whiskers*", <http://nepp.nasa.gov/whisker/video/inspection/index.html>
- [2] Westinghouse Electric Company – Technical Bulletin – "Potential Tin Whiskers on Printed Circuit Board Components" – TB 05 4.
- [3] NASA, listagem de referências sobre *whiskers*, <http://nepp.nasa.gov/whisker/reference/reference.html>, acesso em 6/12/2014.
- [4] Potential Tin *Whiskers* on Printed Circuit Board Components http://nepp.nasa.gov/whisker/reference/tech_papers/2005-westinghouse-tb05004.pdf, acesso em 6/12/2014.
- [5] Nasa, "Tin whiskers growing on an electronic circuit" (NASA Electronic Parts and Packaging Program), publicado pela University of South Carolina – News, <http://www.sc.edu/news/newsarticle.php?nid=5371#.VIOqrdLF-AY>, acesso em 6/12/2014.
- [6] Nasa, Tin whiskers are seen on the tin-plated steel housing of a variable air capacitor used in a 1960's era Grundig radio in this photo provided by NASA Electronic Parts and Packaging Program - Mystery 'tin whiskers' ruin electronics, <http://www.komonews.com/news/tech/10318332.html>, acesso em 6/12/2014.
- [7] Nasa, Tin Whiskers: What's the Risk?, Needle-like whiskers connecting adjacent conductors. Courtesy of NASA's Electronic Parts & Packaging Program, <http://www.eedigest.com/rohs/Tin-Whiskers-What-s-the-Risk/>, acesso em 6/12/2014.
- [8] Zhangz and Schwager, "Tin whiskers growing on electrodeposited matte tin at ambient temperature, http://www.sigcon.com/Pubs/news/10_01.htm, acesso em 6/12/2014.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Márcio Antônio Sens, nascido em 07/07/1951, em de Ituporanga – SC, Técnico em Eletromecânica (ETFSC-1970), Engenheiro Eletricista e de Segurança (UFSC-1975) é pesquisador da Eletrobrás - Cepel, no Rio de Janeiro – RJ, onde atua desde fevereiro de 1976 em estudos relacionados aos materiais elétricos condutores, dielétricos e magnéticos e também em análise periciais destinadas à identificação de causas de falha em equipamentos e instalações ligadas ao Setor Elétrico Nacional. O Autor também é professor de Materiais Elétricos, Medidas Elétricas e Transformadores Elétricos no Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal Fluminense, em Niterói – RJ, onde atua desde março de 1984.