



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

BR/GLT/10  
13 a 16 de Outubro de 2013  
Brasília - DF

**GRUPO - III**

**GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO - GLT**

**SISTEMA PARA DETECÇÃO DE CORROSÃO EM CABOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO AÉREAS  
ENERGIZADAS**

**Célio F. Barbosa (\*)  
FUNDAÇÃO CPQD**

**Flávio E. Nallin  
FUNDAÇÃO CPQD**

**Gibran C. Vasconcelos  
FUNDAÇÃO CPQD**

**José Benedito C. Araújo  
LIGHT S.E.S.A.**

**RESUMO**

Este artigo apresenta um sistema para detecção de corrosão em condutores de linhas de transmissão aéreas energizadas. O sistema é baseado em um robô telecomandado que percorre a linha e avalia a espessura da galvanização remanescente nos tentos de aço de cabos para-raios ou do núcleo de cabos de alumínio com alma de aço (CAA). O princípio de medição baseia-se em correntes de Foucault e utiliza uma equação inovadora para quantificar a espessura da galvanização. O artigo apresenta as características do robô, os requisitos para a operação em linha viva e os testes realizados em laboratório de alta-tensão.

**PALAVRAS-CHAVE**

Linha de Transmissão, Cabo CAA, Corrosão, Correntes de Foucault, Linha Viva

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Linhas aéreas de transmissão de energia elétrica usualmente utilizam condutores de alumínio com alma de aço (CAA), onde os tentos internos de aço fornecem a necessária sustentação mecânica para o condutor e os tentos externos de alumínio conduzem a corrente elétrica. Um fator importante que limita a vida útil destes condutores é a corrosão interna, a qual é iniciada pela perda da camada de zinco que recobre os tentos de aço. Quando esta camada é consumida, o processo de corrosão entre os tentos de alumínio e de aço se desenvolve rapidamente, comprometendo a integridade do condutor. Como este processo corrosivo ocorre dentro do condutor, ele não é detectado pelos métodos tradicionais de inspeção.

Um trabalho pioneiro para detectar a corrosão de condutores CAA em seus estágios iniciais foi realizado pela National Grid Company (NGC), concessionária do Reino Unido (1). O sistema desenvolvido detecta a camada de zinco remanescente nos tentos de aço com base na impedância de um solenóide que tem o condutor como parte de seu núcleo. Este desenvolvimento da NGC foi licenciado para outras empresas para operação comercial e tem sido utilizado por várias concessionárias (2). Outros sistemas que utilizam o mesmo princípio são reportados na literatura (3, 4). No entanto, com base nas informações publicadas, aparentemente a interpretação dos resultados das inspeções é feita de forma empírica, onde o resultado de um dado vão de linha é comparado com resultados obtidos a partir de amostras de referência do mesmo condutor.

É interessante observar que há outras técnicas para detectar corrosão em condutores CAA, muitas das quais são descritas pelo EPRI (5). Uma destas técnicas, frequentemente aplicada na avaliação de cabos de aço, utiliza um ímã permanente para magnetizar os tentos de aço e sensores de campo magnético para detectar as perturbações provocadas no campo magnético pela corrosão (6, 7). Esta técnica também se baseia em referências empíricas e detecta a corrosão apenas em seus estágios mais avançados, onde uma substancial parte da seção transversal do aço já foi perdida.

(\*) Rua Dr Ricardo Benetton Martins, s/n - Prédio 13 – CEP 13.086-902, Campinas, SP, – Brasil  
Tel: (+55 19) 3705-6258 – Fax: (+55 19) 3705-6120 – Email: grcelio@cpqd.com.br

Este artigo apresenta um sistema projetado para detectar a corrosão de cabos CAA nos seus estágios iniciais. Este trabalho inclui o modelamento do problema, onde as características dos tentos de aço são determinadas a partir dos sinais elétricos medidos pelo sensor e não pela comparação com a resposta de condutores de referência. Este modelo permitiu projetar e construir um sensor que foi embarcado em um robô telecomandado que percorre a linha e transmite os dados necessários para avaliar o condutor. O histórico do desenvolvimento deste sistema foi apresentado na referência (8), enquanto os seus principais aspectos tecnológicos são apresentados neste artigo, com ênfase naqueles relativos à capacitação do robô para operar em linhas energizadas.

Este trabalho foi financiado pela LIGHT Serviços de Eletricidade S.A., dentro de um programa de pesquisa e desenvolvimento estruturado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

## 2.0 - O PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO SENSOR

Esta seção apresenta de forma sucinta o princípio de funcionamento do sensor utilizado na inspeção de condutores. Considere-se um solenóide que abraça um condutor de aço galvanizado, conforme mostrado na Figura 1. A aplicação de uma corrente alternada  $I$  no solenóide gera um campo magnético alternado ao longo do eixo do condutor, o qual induz correntes de Foucault (eddy currents) tanto no aço quanto na camada de zinco ( $I_F$ ). O campo magnético gerado pelas correntes de Foucault tende a se opor ao campo incidente, dando origem a um fluxo magnético resultante que determina a impedância do solenóide.

A solução rigorosa deste problema foi obtida por Förster e Stambke (9), sendo posteriormente revisada e aprimorada por Wait (10). Posteriormente, em conjunto com Gardner, Wait estendeu o estudo para condutores cilíndricos contendo camadas simétricas com diferentes propriedades eletromagnéticas (11). No entanto, esta solução rigorosa apresenta algumas dificuldades para ser aplicada, pois ela é expressa por equações transcendentais envolvendo funções de Bessel de argumento complexo. Uma forma simplificada destas equações foi obtida por Halleux (12), através da expansão assintótica das funções de Bessel. O resultado obtido tem a forma de equações transcendentais expressas por funções elementares, que são resolvidas numericamente pelo método de Newton-Raphson. Embora apresente uma simplificação significativa em relação às equações de Wait, a solução de Halleux comporta a necessidade de um software dedicado para a sua solução. Além disso, a expansão assintótica das funções de Bessel é obtida para valores elevados de seus argumentos, o que requer a utilização de frequências elevadas (e.g., 1 MHz). Esta característica impõe uma série de limitações na implementação do sensor e de seu circuito associado, como a necessidade de compensação das indutâncias e capacitâncias parasitas.

O método utilizado neste trabalho adota algumas premissas que possibilitam simplificar o problema em questão, como a fixação da frequência e a representação do aço por sua permeabilidade efetiva. Esta abordagem permite que a impedância do solenóide seja deduzida a partir das equações de Maxwell, resultando em uma expressão fechada baseada em operações algébricas e que reproduz muito bem os resultados exatos calculados pela formulação de Wait e Gardner (11). Para parâmetros representativos de condutores de linhas de transmissão, a diferença entre os dois métodos situa-se abaixo de 0,1% para camadas de zinco até cerca de 35  $\mu\text{m}$  e abaixo de 1% para camadas de zinco até 80  $\mu\text{m}$ . A simplicidade da solução analítica obtida permite que a espessura da camada de zinco ( $d$ ) seja expressa em termos dos parâmetros de entrada do problema:

$$d = \frac{j}{\pi f a \mu_0 \sigma_1} \left[ \frac{1}{\bar{\mu}_e} - \left( \frac{\bar{Z}_s}{\bar{Z}_0} - 1 + k \right) \right] \quad (1)$$

onde  $Z_s$  é a impedância do solenóide contendo o condutor,  $Z_0$  é impedância do solenóide vazio,  $f$  é a frequência,  $a$  é o raio do condutor de aço,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m é a permeabilidade do espaço livre,  $\mu_e$  é a permeabilidade efetiva do aço,  $\sigma_1$  é a condutividade do zinco,  $k = (a/b)^2$  é o fator de enchimento do solenóide e  $b$  é o raio do solenóide. Cabe observar que, embora a Equação 1 comporte algumas variáveis complexas, o resultado obtido para  $d$  é real.

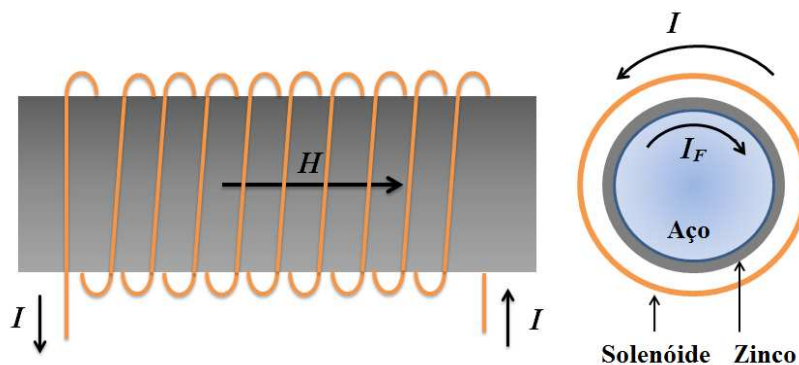


FIGURA 1 - Solenóide contendo um condutor de aço galvanizado (esquerda: vista lateral, direita: vista frontal).

A expansão deste modelo para o caso de vários tentos de aço é feita de forma relativamente simples, através da redefinição do fator de enchimento como  $k = n (a / b)^2$ , onde  $n$  é o número de tentos do condutor. Esta solução se aplica a um condutor contendo apenas tentos de aço, como é o caso do condutor utilizado como cabo para-raios em linhas de transmissão. Este modelo pode também ser expandido para a aplicação em condutores CAA, onde o modelamento dos tentos de alumínio é feito de maneira análoga ao realizado para os tentos de aço.

Para exemplificar em termos práticos a aplicação do método desenvolvido, pode-se descrever o experimento realizado com um trecho de condutor CAA 266,8 MCM (Partridge) de 9 m de comprimento e suportado a 1,5 m de altura em uma área externa. Um tecido de algodão embebido em salmoura foi aplicado na parte média deste condutor e mantido por cerca de quatro meses. O robô telecomandado percorreu o condutor, coletando leituras da impedância do solenóide de inspeção. As leituras foram feitas a cada 0,1 m, acionadas pelo odômetro acoplado à polia do robô. Os resultados são mostrados na Figura 2, onde a impedância do solenóide foi convertida em espessura da camada de zinco utilizando a Equação 1. Pode-se observar que a espessura média da camada de zinco apresenta um valor em torno de 50  $\mu\text{m}$  e cai abruptamente na região onde o tecido úmido foi aplicado. É interessante observar que uma inspeção visual do cabo não permite identificar nenhuma alteração em sua aparência, mesmo quando observado de perto.

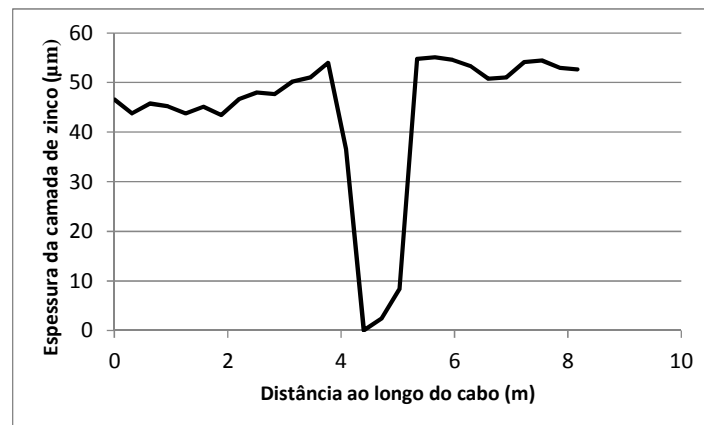


FIGURA 2 - Espessura de camada de zinco medida ao longo de um condutor CAA 266,8 MCM com uma falha produzida no seu ponto médio.

### 3.0 - O ROBÔ

Uma vez desenvolvida a técnica de inspeção, o grande desafio foi embarcá-la em um robô telecomandado que pudesse ser içado até o condutor de uma linha de transmissão e se deslocar autonomamente ao longo deste condutor. Esta seção apresenta as principais características do robô desenvolvido, o qual pode ser visto na Figura 3. Observa-se nesta figura uma abertura na parte inferior do robô para a passar o condutor da linha. O robô deve ser içado pelo olhal superior e os olhais laterais servem para alinhá-lo com o condutor através de bastão. Ao tracionar o olhal central, um mecanismo abre o sensor para a passagem do condutor e, ao ser retirada a tração do olhal, o sensor automaticamente se fecha sobre o condutor. Dessa forma, o robô pode ser instalado no condutor sem a necessidade do eletricista ir ao potencial da linha.

As leituras referentes ao estado do núcleo do condutor são feitas a intervalos regulares determinados pelo odômetro do robô e enviadas para o operador. O arquivo gerado permite avaliar a espessura da camada de zinco do núcleo de cabos CAA, assim como detectar irregularidades no condutor. O robô conta também com câmeras de vídeo nas suas duas faces, as quais fornecem imagens do condutor inspecionado em tempo real. Caso desejado, pode ser feita uma fotografia de alguma irregularidade encontrada (e.g., tento rompido). Estas imagens podem ser correlacionadas com a posição do robô na linha, o que permite a sua localização futura para manutenção corretiva.

A comunicação entre o robô e a unidade de solo é feita através de um enlace rádio operando em 2,4 GHz, o que possibilita um alcance de vários quilômetros em visada direta. O requisito de visada direta não chega a ser um limitante nesta aplicação, pois é sempre recomendável ter contato visual com o robô durante uma inspeção. O robô porta uma antena dipolo projetada acima de seu teto, visando obter uma cobertura omnidirecional.

Caso o robô encontre um obstáculo, detectores instalados no robô interrompem o seu deslocamento. Neste caso, o operador deve recolher o robô ou fazê-lo retroceder. Obstáculos pequenos podem ser transpostos, desde que o seu diâmetro não ultrapasse 40 mm. Desta forma, o robô pode transpor obstáculos formados por torção de cabo, tentos partidos e mesmo pequenas emendas de compressão. No entanto, o robô não transpõe emendas pré-formadas, atenuadores de vibração, festões e grampos de isoladores.



FIGURA 3 - Robô para inspeção de linhas de transmissão.

O robô possui um par de baterias de 12 V - 7 Ah que permite 6 horas contínuas de trabalho. Desativar as câmeras permite estender esta autonomia em cerca de 20%. O estado da carga das baterias é continuamente monitorado pelo software de controle, o que permite ao operador planejar a recarga da bateria ou sua substituição. A recarga da bateria é feita sem que a mesma tenha de ser retirada do robô, bastando para tal acoplar o seu carregador ao robô e a uma tomada de força (100 a 240 V<sub>ca</sub>). Alternativamente, um acessório permite que o carregador seja conectado ao plugue de 12 V<sub>cc</sub> existente nos veículos, permitindo que a bateria do robô seja carregada durante as pausas do trabalho de campo. Um aspecto interessante do projeto é que, nos declives, o motor atua como freio e parte da energia potencial do robô é utilizada para carregar a bateria.

O acionamento do robô é feito por modulação de largura de pulso (PWM) controlado pelo software residente (firmware). Desta forma, as partidas e frenagens são feitas de modo progressivo, evitando o deslizamento da polia de tração. O controle de velocidade é feito pelo software de controle, o que permite ao operador fazer a inspeção de um trecho crítico em baixa velocidade. A velocidade máxima em um trecho horizontal é de 30 m/min e o máximo aclone recomendado é de 20° graus. Vãos que contenham aclone maiores deverão ser inspecionados da torre mais alta para a torre mais baixa. A TABELA 1 resume as principais características do robô.

Tabela 1 – Características do robô

Altura	353 mm
Largura	448 mm
Profundidade	270 mm
Peso	16 kg
Velocidade horizontal	0 a 30 m/min
Máximo aclone	20°
Autonomia	6 horas (≈ 3,6 km)
Alcance do rádio	> 1 km
Diâmetro do sensor	40 mm
Frequência do sensor	45 kHz

#### 4.0 - CAPACITAÇÃO PARA OPERAR EM LINHA VIVA

##### 4.1. Projeto do sensor

A possibilidade de instalar o robô no condutor sem que o eletricitista tenha de ir para o potencial da linha facilita a operação em linha viva. Para tal, é interessante que o sensor possa ser acoplado ao condutor naturalmente, sem a necessidade de um acionamento eletromecânico. A solução deste problema requer o projeto de um solenóide bipartido que possa ser reconstituído sem a necessidade de contatos elétricos. Em outras palavras, o sensor utilizado em projetos similares (1, 3, 4) é na forma de um solenóide bipartido que é reconstituído em torno do condutor pelo fechamento de vários contatos elétricos. Um solenóide deste tipo também foi usado na versão do robô para trabalhar em linha desligada, conforme mostrado na Figura 4.a. Além da dificuldade de instalação, esta solução é vulnerável a danos ou entrada de sujeira nas conexões. Por exemplo, o sensor da Figura 4.a apresenta 192 contatos e, se apenas um deles apresentar alta resistência, o sensor ficará fora de operação. O sensor desenvolvido para este projeto não necessita de nenhum contato para o fechamento do circuito elétrico, sendo o solenóide substituído por uma bobina de Helmholtz modificada (13). A Figura 4.b mostra este sensor, onde se observa que não há contatos elétricos. O pino visto no meio do sensor tem por função acionar uma chave óptica que informa ao software de supervisão que o sensor está fechado.

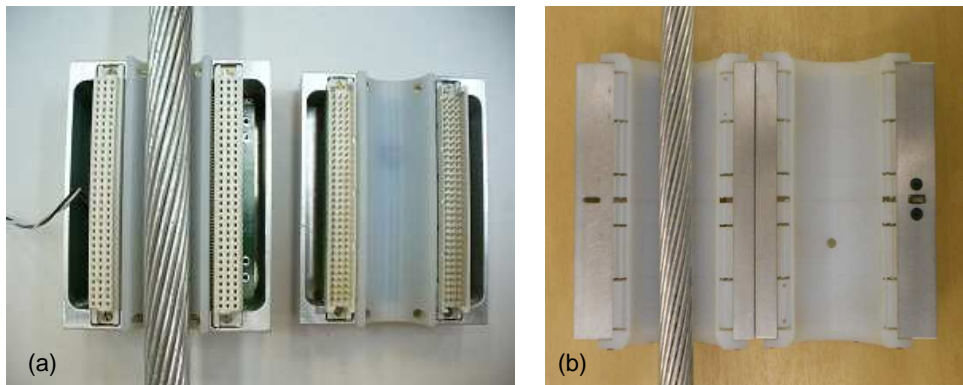


FIGURA 4 - (a) Sensor tradicional com contatos elétricos; (b) Novo sensor sem contatos elétricos.

#### 4.2. Efeito dos campos eletromagnéticos

O campo magnético produzido pela corrente de carga pode interferir tanto no sistema de medição quanto no funcionamento dos circuitos eletrônicos. Como o campo magnético em 60 Hz é muito difícil de ser blindado, há que se tomar outras medidas para mitigar os seus efeitos. Para tal, a placa de circuitos eletrônicos foi disposta em uma posição tangencial às linhas de força do campo magnético, minimizando o fluxo magnético concatenado com as trilhas de circuito. De maneira análoga, os enrolamentos do sensor foram dispostos de forma a cancelar o fluxo devido ao campo de 60 Hz, visando minimizar a tensão induzida pela corrente de carga no sensor. Além disto, foram instalados filtros visando deixar passar a alta frequência associada com o sinal de medição (45 kHz) e bloquear eventuais tensões induzidas em 60 Hz.

O campo elétrico produzido pela tensão de serviço da linha também pode interferir nos circuitos eletrônicos do robô. Uma das formas de interferência é a geração de descargas parciais na estrutura do robô, as quais produzem campos eletromagnéticos em largo espectro de frequências. A principal causa de geração de descargas parciais são as tensões induzidas entre diferentes partes metálicas pelo campo elétrico do condutor. Para se evitar este tipo de indução, todas as partes metálicas do robô foram vinculadas entre si. Por sua vez, a estrutura do robô foi vinculada com o condutor através da utilização de uma polia metálica. Dessa forma, todas as partes metálicas do robô ficam no mesmo potencial do condutor. O polo negativo da bateria foi vinculado à massa do robô, visando evitar diferenças de potencial entre a estrutura do robô e seus circuitos eletrônicos.

A blindagem do sensor requereu um tratamento específico, pois a existência de uma abertura na parte de baixo do robô possibilita que correntes de deslocamento fluam do sensor para a terra. Como estas correntes passam pelo circuito de medição, elas se superpõem ao sinal útil. A forma obtida para mitigar estas correntes foi dotar o sensor de uma blindagem metálica, de forma que as correntes de deslocamento passem a fluir da blindagem para a terra e não passem pelo sensor. Como esta blindagem não pode fechar completamente o circuito em torno do sensor, foi preservado um pequeno espaçamento de cerca de 1 mm entre as duas metades da blindagem.

O aprimoramento e validação destas medidas foi realizado no laboratório do CPqD, onde foi possível aplicar tensões de até 80 kV no robô, o que corresponde à tensão fase-terra de uma linha de 138 kV. Ensaios com tensões mais elevadas foram realizados no Laboratório de Extra Alta Tensão da UFMG (LEAT), conforme descrito na Seção 5. Nos testes realizados foram simuladas descargas parciais próximas do robô e não foram detectadas interferências. A Figura 5 mostra o robô durante o ensaio de tensão aplicada realizado no CPqD, onde a bucha à esquerda corresponde à saída do gerador de alta tensão.



FIGURA 5 - Robô submetido ao ensaio de tensão aplicada no laboratório do CPqD.

### 4.3. Efeitos da temperatura

Durante os ensaios realizados, verificou-se que a temperatura influenciava alguns parâmetros do robô. Este aspecto é importante para a operação em linha viva, pois o condutor pode atingir temperaturas bastante elevadas (14). Foram identificados dois mecanismos distintos através dos quais a temperatura afetava o sistema de medição. O primeiro deles consistia na flutuação da amplitude do sinal gerado, pois o ganho dos amplificadores utilizados se mostraram sensíveis à temperatura. Em princípio, esta flutuação não afeta a impedância medida, pois um aumento da tensão corresponde a um aumento proporcional da corrente. No entanto, medições realizadas mostraram que, quando o circuito eletrônico atingia 48°C, o gerador de sinais entrava em instabilidade. A solução deste problema foi obtida através de uma alteração no projeto do gerador, de forma a acrescentar uma compensação de temperatura no ganho do pré-amplificador. Como resultado, a flutuação do sinal com a temperatura foi significativamente reduzida e o gerador manteve-se operacional até 65 °C. Evitou-se testar temperaturas acima deste valor, pois esta é a temperatura limite dos componentes eletrônicos utilizados.

Cabe observar que existe uma significativa diferença entre as temperaturas do condutor e do circuito eletrônico, uma vez que a dissipação térmica realizada pela massa do robô é bem elevada e a transmissão de calor por condução do condutor para o robô é mínima. Uma estimativa teórica conservativa mostra que para uma temperatura ambiente de 40°C e um condutor operando a 100°C, a temperatura do circuito seria 52°C.

Outro efeito relevante da temperatura é a variação dos parâmetros elétricos do condutor, os quais são utilizados para o cálculo da espessura da camada de zinco. O efeito da temperatura na permeabilidade magnética foi investigado em laboratório considerando as variações esperadas de temperatura do condutor (14) e o mesmo mostrou-se pouco significativo. No entanto, o efeito da temperatura na condutividade elétrica não é desprezível, sendo observada experimentalmente uma variação da impedância de 5% para uma variação de temperatura de 23°C a 80°C. A adoção da correção da temperatura no modelo teórico torna desprezível o erro introduzido pela temperatura. Esta correção é feita a partir do coeficiente de variação da condutividade do zinco com a temperatura. Dessa forma, foi inserido no sensor um termômetro que permite estimar a temperatura do condutor e, com isto, corrigir o seu efeito no cálculo da espessura da galvanização.

### 5.0 - TESTES OPERACIONAIS

Diversos testes operacionais foram realizados no Laboratório de Extra Alta-Tensão (LEAT) da UFMG (15), onde se tinha o controle das diversas variáveis envolvidas. Para estes testes, um condutor CAA 556,5 MCM de cerca de 20 m foi tracionado dentro do laboratório, a cerca de 15 m de altura. Nas extremidades deste condutor foi conectado um condutor de cobre, o qual foi fixado por cordas de nylon formando uma espira retangular. A parte inferior desta espira passava dentro da janela de um transformador com isolamento seco, constituindo-se em seu circuito secundário. Uma extremidade do condutor CAA foi conectada a um transformador de alta-tensão. Dessa forma, a aplicação de tensão no primário do transformador de isolamento seco permitia controlar a corrente no condutor CAA, enquanto a aplicação de tensão no transformador de alta-tensão permitia controlar a sua tensão.

O circuito de teste descrito permitiu simular as condições de operação de linha viva em condições controladas, ao se aplicar corrente e tensão no condutor CAA. Cabe ressaltar que, embora a aplicação de corrente e tensão tenha sido simultânea, a potência envolvida corresponde apenas às perdas no circuito. Este artifício permitiu realizar diversos testes operacionais com o robô, instalando-se o mesmo no condutor e acionando os seus circuitos. Foram aplicadas correntes até 200 A no condutor, com aplicação de tensão até 80 kV, que são valores representativos de uma linha de 138 kV. A avaliação do robô também foi realizada aplicando-se apenas tensão no condutor, alcançando-se o valor de 200 kV, representativo de uma linha de 345 kV. A Figura 6 mostra o robô durante os ensaios realizados, onde se observa a abertura para passar o condutor.

O desempenho do robô nos testes realizados foi satisfatório, não tendo sido observada nenhuma falha de comunicação nem de funcionamento dos circuitos eletrônicos. Os testes realizados incluíram também a geração de descargas parciais nas proximidades do robô, não se observando interferência no mesmo. No entanto, ao se deslocar no cabo, o robô pendia-se um pouco para um lado, o que foi associado com o dispositivo de alinhamento do condutor. A solução do problema foi obtida através da substituição deste dispositivo por outro mais rígido e pela melhoria no balanceamento do robô.

Ao se escurecer o laboratório, não foram identificados pontos de corona visual gerados a partir do robô, mesmo para a tensão aplicada de 200 kV. Nesta condição, os grampos de fixação do condutor já apresentavam nítido corona visual. A instalação e retirada do robô também foi realizada com facilidade, quando se observou que o sensor abria e fechava conforme projetado.





FIGURA 6 - Robô sendo ensaiado no LEAT-UFGM.

## 6.0 - CONCLUSÃO

O sistema de inspeção de condutores de linhas de transmissão apresentado neste trabalho baseia-se em uma tecnologia razoavelmente madura, a qual possibilita a implantação de uma manutenção preventiva das linhas de transmissão com base na avaliação objetiva do estado dos condutores. O sistema desenvolvido apresenta três grandes inovações relativas ao estado da técnica. A primeira consiste no desenvolvimento e utilização de uma expressão analítica fechada que fornece a espessura da galvanização remanescente nos tentos de aço a partir da impedância do solenóide, i.e., sem a necessidade de uma correlação empírica com amostras de referência. A segunda diz respeito ao desenvolvimento de um solenóide sem contatos elétricos, o que facilita significativamente a utilização do sistema em linha viva. Já a terceira inovação é um circuito híbrido que aumenta a sensibilidade da medição. Estes aspectos inovadores estão cobertos por um pedido de patente depositado e outro em fase de elaboração.

O desenvolvimento desta tecnologia e sua instalação em um robô telecomandado apresentaram inúmeras dificuldades técnicas, as quais não poderiam ser descritas em um único artigo. De qualquer modo, cabe ressaltar que este sistema representa o resultado de um longo processo de superação destas dificuldades e que incluiu o desenvolvimento de uma versão para operar em linhas desligadas. Os testes de campo do robô de linha viva estão previstos para começar em Maio de 2013 e em um futuro próximo este tipo de serviço poderá ser disponibilizado para as concessionárias interessadas.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) SUTTON, J.; LEWIS K. G. The detection of internal corrosion in steel-reinforced aluminum overhead transmission lines. Proc. UK Corrosion'86, vol.1, pp. 345-359, Birmingham, 1986. Reino Unido.
- (2) ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. Guide to help reduce deterioration & extend life of field aged ACSR conductors: Application of available technologies to assess condition of conductors. EPRI, Palo Alto - CA, 2002, 1001741. Estados Unidos.
- (3) FUJIKURA. Diagnosis of internal corrosion technology for ACSR conductor of overhead power lines. Fujikura News, n.372, Julho de 2012. Japão.
- (4) KIM, S. D.; MORCOS, M. M. An application of solenoid sensor for inspecting deterioration of ACSR conductors due to forest fires. IEEE Power Engineering Review, pp. 50-53, Out. 2001. Estados Unidos.
- (5) ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. New tools for conductor evaluation: State of the art review and promising technologies. EPRI, Palo Alto - CA, 2003, 1002002. Estados Unidos.
- (6) GELLER, L. B.; POPHENROTH, D.; UDD, J. E.; HUTCHINSON, D. Evaluation of electromagnetic rope testers: Joint Canadian-US work. Materials Evaluation, vol.. 50, no. 1, pp. 56-63, 1992. Estados Unidos.
- (7) PINTO, A. V.; SEBRAO, M. Z.; LOURENÇO, C. R. S. C.; ALMEIDA, I. S.; SAAD, J.; LOURENÇO, P. M. Remote detection of internal corrosion in conductor cables of power transmission lines. 1st Int. Conf. on Applied Robotics for the Power Industry, Montreal, Out. 2010. Canadá.

- (8) BARBOSA, C. F.; NALLIN, F. E.; SOUZA, R. N.; VASCONCELOS, G. C.; ARAUJO, J. B. Detecção de corrosão em cabos de linhas de transmissão de energia elétrica energizadas. Cad. CPqD Tecnologia, vol. 8, n. 2, pp. 73-80, Dez. 2012. Brasil.
- (9) FÖRSTER, F.; SATAMBKE, K. Theoretische und experimentelle Grundlagen der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung mit Wirbelstromverfahren. Zeits. Metallkde., Bd. 45, Heft. 4, pp. 166-179, 1954. Apud Wait (10). Alemanha.
- (10) WAIT, J. R. The electromagnetic basis for non-destructive testing of cylindrical conductors. IEEE Trans. on Instrum. Meas., vol. 27, n. 3, pp. 235-238, Set. 1978. Estados Unidos.
- (11) WAIT, J. R.; GARDNER, R. L. Electromagnetic nondestructive testing of cylindrically layered conductors. IEEE Trans. on Instrum. Meas., vol. 28, n. 2, pp. 159-161, Junho 1979. Estados Unidos.
- (12) HALLEUX, B.; PTHELINTSEV, A.; LIMBURG STIRUM, B. Thickness and conductivity determination of thin coatings on ferromagnetic substrates in the case of cylindrical symmetry. Review of Scientific Instruments, vol. 68, Issue 9, pp. 3533-3539, 1997. Estados Unidos.
- (13) HALLÉN, E. Electromagnetic Theory. John Wiley & Sons Inc., 1962. Suécia.
- (14) LIGHT. Carregamento de linhas aéreas CAA 138 kV em temperaturas elevadas. Procedimento Operacional Light POL 0014LT/97-RO, 1997. Brasil.
- (15) BOAVENTURA, W. C.; LIMA, J. L. C. Testes de injeção de corrente em condutor de alumínio suspenso, com aplicação simultânea de alta-tensão alternada (80 kVrms): Avaliação de equipamento para monitoramento de condutores. Rel. Técnico 032012 DEE.LEAT.FCO.CPqD, Depto. Eng. Elétrica UFMG, Dez. 2012. Brasil.

#### 8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Célio Fonseca Barbosa nasceu em de Nova Lima - M.G. em 1961. Possui os títulos de Engenheiro (1983), Mestre (1988) e Doutor (2009) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Trabalhou de 1984 a 1998 na Telecomunicações Brasileiras SA (Telebrás), onde exerceu diversas funções gerenciais. Trabalha desde 1998 como pesquisador da Fundação Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações (CPqD), onde desenvolve projetos de pesquisa para os setores elétrico e de telecomunicações. Atua também desde 2000 como relator para proteção contra descargas atmosféricas da União Internacional de Telecomunicações (UIT), sendo atualmente Chairman do Grupo de Trabalho 5.1 (Prevenção de Danos e Segurança). Seus interesses de pesquisa atuais incluem a proteção contra descargas atmosféricas, o monitoramento de linhas de energia elétrica e a propagação de sinais de comunicação nestas linhas. Maiores detalhes podem ser obtidos em <http://lattes.cnpq.br/0432330534636280>.

