

# Corrosão Interna em Cabos Condutores de Linhas de Transmissão de Energia Elétrica: Caracterização da Atmosfera e Técnica para Identificação de Falhas

José Felipe A. G. Wavrik, Célia Regina S. H. Lourenço, Mauro Zanini Sebrão, Plutarcho M. Lourenço, Pedro L. da Frota Moreira

**Resumo:** Esse artigo apresenta a caracterização da atmosfera em três subestações de energia elétrica da CHESF e algumas técnicas de identificação de pontos de falha em cabos condutores empregados em linhas de transmissão de energia elétrica, as quais foram estudadas no âmbito do projeto CEPEL/CHESF/ANEEL. A caracterização da atmosfera foi feita em conformidade às normas ISO 9223 e ISO 9224, com a instalação de cupons e determinação da sua perda de massa, além de dispositivos de captação de poluentes. No estudo das técnicas, procurou-se apontar aquelas com mais possibilidades de serem utilizadas em um equipamento de inspeção de linhas de transmissão.

1

**Palavras-chave:** linha de transmissão, cabo condutor, técnica de inspeção, magnetismo permanente, corrosão atmosférica.

## I. INTRODUÇÃO

A procura por serviços de energia melhores e mais eficientes está exigindo das empresas do setor elétrico investimentos em novos equipamentos, que permitam monitorar todo o sistema elétrico, de modo a prever possíveis eventos ou falhas que prejudiquem o funcionamento adequado do sistema e antecipar soluções visando eliminar ou reduzir os seus efeitos. Na parte de transmissão de energia, por exemplo, as linhas de transmissão ficam expostas a variações climáticas (vento, chuva etc.) e às condições do ambiente em que se encontram, durante vários anos. Um problema que ocorre nessas linhas é o desgaste gradual do cabo que, se não for detectado a tempo, pode ocasionar a sua ruptura e em consequência sérios prejuízos.

Para tentar minimizar os riscos de tal falha e suas consequências, normas e códigos de segurança recomendam a realização de inspeções periódicas para determinar as condições reais dos cabos.

---

<sup>1</sup> Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do V Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (V CITENEL), realizado em Belém/PA, no período de 22 a 24 de junho de 2009.

José Felipe A. G. Wavrik trabalha na Companhia Hidro Elétrica do São Francisco – CHESF/ELETOBRÁS (e-mail: [felipe@chesf.gov.br](mailto:felipe@chesf.gov.br)).

Célia Regina S. H. Lourenço, Mauro Zanini Sebrão e Plutarcho M. Lourenço trabalham no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL/ELETOBRÁS (e-mails: [celia@cepel.br](mailto:celia@cepel.br), [zanini@cepel.br](mailto:zanini@cepel.br), [taco@cepel.br](mailto:taco@cepel.br)).

Pedro L. da Frota Moreira é vinculado à Fundação Padre Leonel Franca (e-mail: [pedrom@cepel.br](mailto:pedrom@cepel.br)).

Quanto mais antigas as linhas de transmissão de energia elétrica, mais susceptíveis estão os seus cabos de apresentar problemas e embora a maioria dos cabos seja retirada prematuramente por precaução, muitos cabos em serviço podem estar severamente degradados e em condição perigosa. Isso significa que anualmente são desperdiçados recursos elevados com cabos em bom estado, sem garantir a segurança necessária dos mesmos. Torna-se importante, portanto, que procedimentos de inspeção sejam aplicados nos cabos para tentar identificar as condições em que estes se encontram e indicar com antecedência a necessidade de manutenção, se for o caso, de modo a evitar situações de risco.

## II. PROCEDIMENTO ATUAL

Os cabos condutores empregados nas linhas de transmissão de energia elétrica são formados por um arranjo de cabos de materiais diferentes, geralmente aço e alumínio. Os cabos de alumínio servem para conduzir a corrente elétrica e são enrolados em torno de um cabo núcleo central feito de aço, responsável por aumentar a resistência mecânica do cabo de transmissão.

Estes cabos sofrem desgastes com o tempo, devidos a ação de diversos fatores, que reduzem a sua resistência, podendo ocasionar o seu rompimento e conseqüentemente problemas graves na prestação do serviço a que se destinam e aos clientes.

Devido a isso, as companhias adotam uma inspeção de rotina para identificar possíveis falhas nos cabos e reduzir os riscos de acidentes. No entanto, atualmente, alguns métodos empregados nessa atividade são pouco precisos, podendo fornecer diagnósticos inadequados, o que leva a um custo alto de inspeção e manutenção.

Assim, caracterizar o ambiente onde os cabos estão instalados e estudar técnicas de identificação de pontos de falha nos mesmos torna-se importante para as companhias.

## III. CORROSÃO ATMOSFÉRICA

Contaminantes corrosivos na atmosfera são originados tanto artificialmente como naturalmente e, tendem a afetar a vida útil das estruturas metálicas e bens de consumo.

A corrosão atmosférica manifesta-se em ambientes abrigados e/ou ao ar livre. A tendência inicial da superfície de um metal ser atacado vai depender da presença de umidade, de constituintes corrosivos e da localização geográfica.

A importância da atmosfera, como meio corrosivo, pode ser confirmada pelo grande número de publicações científicas.

cas relacionadas com ensaios de corrosão utilizando diferentes materiais metálicos e prolongados períodos de exposição, nos mais diferentes países.

A ação corrosiva da atmosfera depende fundamentalmente dos fatores:

- Umidade relativa;
- Substâncias poluentes – partículas e gases;
- Temperatura;
- Tempo de permanência do filme de eletrólito na superfície metálica.

Além destes fatores devem ser considerados os fatores climáticos como: intensidade e direção dos ventos, variações cíclicas de temperatura e umidade, chuvas e insolação (radiação ultravioleta).

#### A. Características das Atmosferas

Os ambientes são normalmente classificados quanto à sua agressividade em função do tipo e da quantidade de poluentes presentes na atmosfera. Desta forma, as atmosferas podem ser classificadas como:

- Atmosfera rural – quando o ambiente é isento de poluentes e a degradação dos materiais é função somente de fatores tais como: umidade relativa, temperatura, índice de precipitação pluviométrica e radiação solar.
- Atmosfera urbana – neste caso a agressividade do ambiente, além dos fatores climáticos, é caracterizada pela presença de poluentes provenientes de indústrias leves e pelos motores de combustão interna.
- Atmosfera industrial – o ambiente é fortemente influenciado pela presença de poluentes originados da exaustão de complexos industriais de grande porte.
- Atmosfera marinha – neste ambiente os poluentes de maior importância são os sais transportados pelos ventos no sentido do mar para a terra.

Além disso, pode eventualmente haver combinação de dois ou mais tipos de atmosferas como o caso da reunião da atmosfera marítima com a urbana e a industrial.

Sob os aspectos da corrosão metálica os poluentes que exercem maior influência no processo são: SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, NH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub>, NaCl e as partículas sólidas.

Existem várias tentativas de se classificar as atmosferas em termos de presença dos dois principais poluentes atmosféricos: íons cloreto e compostos de enxofre. A tabela [1] é um exemplo deste tipo de classificação.

Tabela I – Classificação das atmosferas

Tipo de ambiente corrosivo	Poluentes da atmosfera	
	SO <sub>2</sub> (mg.dm <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup> )	Cl <sup>-</sup> (mg.m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup> )
Rural	< 0,25	< 0,3
Urbano	0,25 – 1,25	< 0,3
Industrial	> 1,25	< 0,3
Marinho	< 0,25	> 30
Costeiro	< 0,25	0,3 - 30

Os problemas de corrosão atmosférica em linhas de transmissão podem ser divididos em dois grupos: corrosão das estruturas e ferragens galvanizadas e corrosão dos cabos condutores.

Nesse trabalho, o enfoque principal foi na corrosão de cabos condutores.

#### B. Metodologia

Foram instaladas estações de ensaio de corrosão atmosférica em três subestações da CHESF, com o intuito de classificar o grau de corrosividade das atmosferas e, por consequência, adquirirem dados que permitissem avaliar e classificar o micro-clima das regiões estudadas.

Para isso, foram instalados nas estações de ensaio de corrosão atmosférica:

- corpos-de-prova de aço-carbono, de cobre, de alumínio e de zinco,
- dispositivos de captação de cloretos e de compostos de enxofre e
- sensores de temperatura (T) e umidade relativa (UR).

O tempo de exposição dos corpos-de-prova variou de 06 meses a 24 meses para cada sistema em estudo. O método de análise dos corpos-de-prova metálicos foi o de perda de massa, conforme procedimento interno do CEPTEL, “Limpeza e avaliação da taxa de corrosão de corpos-de-prova metálicos” N°. 3300-3023-010.

O acompanhamento dos poluentes foi mensal e teve a duração de 12 meses. O método de análise de determinação de cloretos na atmosfera ficou em conformidade com a norma NBR 6211 [2] e o método de análise de determinação de compostos de enxofre na atmosfera ficou em conformidade com a norma NBR 6921 [3].

Os resultados de grau de corrosividade e classificação das atmosferas ficaram em conformidade com a norma NBR 14643 [4].

## IV. RESULTADOS

### A. Análise e Avaliação das Taxas de Corrosão nas Estações de Corrosão Atmosférica de Sobradinho, Camaçari e Fortaleza.

A tabela II mostra as médias das taxas de corrosão dos materiais metálicos determinadas nas três estações de ensaio.

Tabela II – Taxa de corrosão dos materiais nas três estações de corrosão atmosférica

Estação Material	Sobradinho (mdd)	Camaçari (mdd)	Fortaleza (mdd)
aço-carbono	1,01	14,26	11,30
zinco	0,11	0,66	0,67
cobre	0,12	0,53	0,56
alumínio	0,01	0,03	0,02

Com base na norma NBR 14643 [4], pode-se identificar a categoria de corrosividade da atmosfera em função da velocidade de corrosão de cada material metálico exposto nas estações de ensaio de Sobradinho, Camaçari e Fortaleza.

A tabela III mostra a categoria de corrosividade de cada material exposto nas estações de ensaio.

**Tabela III – Categoria de corrosividade em função da taxa de corrosão**

Estação Material	Sobradinho (mdd)	Camaçari (mdd)	Fortaleza (mdd)
aço-carbono	C2 - baixa	C4- alta	C4 - alta
zinco	C2 - baixa	C4 - alta	C4 - alta
cobre	C2 - baixa	C4 - alta	C4 -alta
alumínio	C1 - desprezível	C3 - média	C2 - baixa

*B. Análise e Avaliação dos Poluentes Captados nas Estações de Corrosão Atmosférica de Sobradinho, Camaçari e Fortaleza.*

As figuras 1 e 2 mostram, respectivamente, os valores de cloretos e sulfatos nas estações de corrosão atmosférica de Sobradinho, Camaçari e Fortaleza.

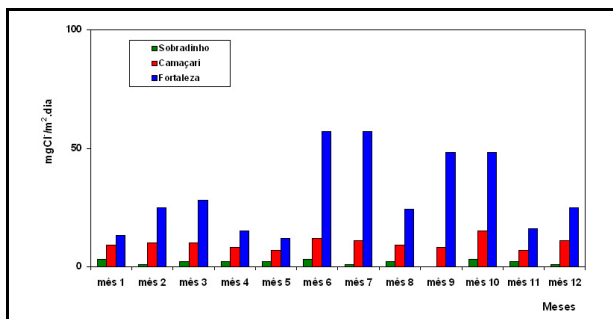


Figura 1 – Valores de cloreto encontrados em Sobradinho, Camaçari e Fortaleza.

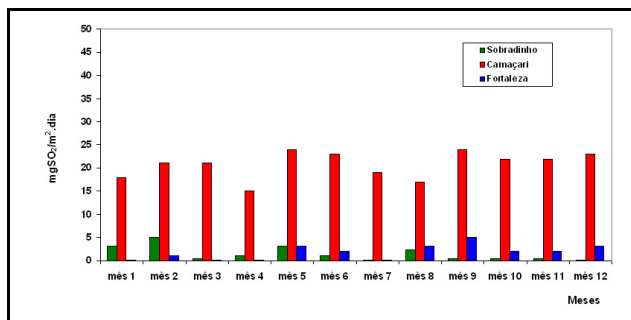


Figura 2 – Valores de sulfato encontrados em Sobradinho, Camaçari e Fortaleza.

*C. Análise e Avaliação do Tempo de Superfície Úmida nas Estações de Corrosão Atmosférica de Sobradinho, Camaçari e Fortaleza.*

Um dos fatores externos determinantes da intensidade do fenômeno de corrosão atmosférica é o tempo em que a superfície metálica permanece molhada (tempo de umectação – TDH). De acordo com a norma NBR 14643 [4] calcula-se o TDH a partir de termohigrogramas com registros contínuos da umidade relativa (UR) e da temperatura (°C). O TDH é o número de horas em que a UR se mantém igual ou superior a 80% e, simultaneamente, a temperatura é igual ou superior a 0°C em um período de 1 (hum) ano.

A figura 3 mostra os valores de tempo de superfície úmida mensal, encontrados nas estações de ensaio de Sobradinho, Camaçari e Fortaleza.

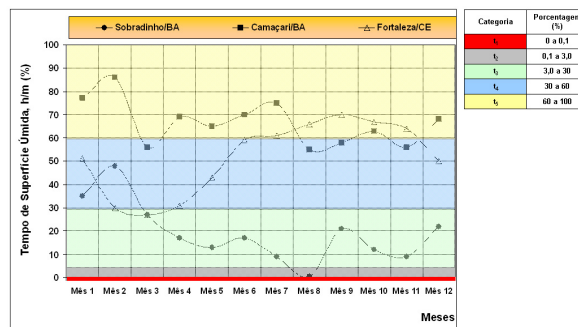


Figura 3 – Tempo de superfície úmida, em porcentagem, registrado em Sobradinho-BA, Camaçari-BA e Fortaleza-CE.

*D. Avaliação e Análise das Estações de Corrosão Atmosférica Situadas em Sobradinho, Camaçari e Fortaleza.*

*D.1 Estação de Sobradinho-BA*

Segundo a norma NBR 14643 [4], pode-se classificar a estação de ensaio de Sobradinho com a denominação B0A0, uma atmosfera tipicamente rural não contaminada por cloretos e por sulfatos.

Segundo a norma NBR 14643 [4], a estação de ensaio de Sobradinho possui categoria t<sub>3</sub>, que é típica de climas secos, frios ou temperados, com períodos de condensação e precipitação, onde a probabilidade de formação de eletrólito sobre a superfície metálica é baixa.

Portanto, a estação de ensaio de corrosão atmosférica situada em Sobradinho-BA é pouca agressiva aos metais ensaiados, como o aço-carbono, o alumínio, o cobre e o zinco.

Qualquer instalação de estrutura metálica, como exemplo, torres de linhas de transmissão na região de Sobradinho, não necessitará de sistemas de proteção anticorrosiva adicionais, além do aço-carbono revestido com zinco através do processo de zincagem a quente.

*D.2 Estação de Camaçari-BA*

Segundo a norma NBR 14643 [4], pode-se classificar a estação de ensaio de Camaçari com a denominação B1A1, uma atmosfera tipicamente mista contaminada fracamente por cloretos e por sulfatos.

Segundo a norma NBR 14643 [4], a estação de ensaio de Camaçari possui categoria t<sub>5</sub>, que é típica de climas muito úmidos, quentes ou temperados, com períodos de condensação e precipitação, onde a probabilidade de formação de eletrólito sobre a superfície metálica é muito alta.

Portanto, a estação de ensaio de corrosão atmosférica situada em Camaçari-BA é muito agressiva ao aço-carbono, agressiva ao cobre e ao zinco e pouco agressiva ao alumínio.

Qualquer instalação de estrutura metálica, como exemplo, torres de linhas de transmissão na região de Camaçari, necessitará de aplicação de sistemas de proteção anticorrosiva adicionais. Qualquer estrutura ou equipamento fabricado em aço-carbono deverá ser revestido com zinco através do processo de zincagem a quente recoberto com um revestimento orgânico, sistemas de proteção anticorrosiva denominados duplex.

### D.3 Estação de Fortaleza-CE

Segundo a norma NBR 14643 [4], pode-se classificar a estação de ensaio de Fortaleza com a denominação B1A0, uma atmosfera tipicamente marinha contaminada fracamente por cloretos e não contaminada por sulfatos.

Segundo a norma NBR 14643 [4], a estação de ensaio de Fortaleza possui categoria  $t_4$ , que é típica de climas úmidos, quentes ou temperados, com períodos de condensação e precipitação, onde a probabilidade de formação de eletrólito sobre a superfície metálica é alta.

Portanto, a estação de ensaio de corrosão atmosférica situada em Fortaleza-CE é agressiva ao cobre, aço-carbono e ao zinco e pouco agressiva ao alumínio.

Qualquer instalação de estrutura metálica, como exemplo, torres de linhas de transmissão na região de Fortaleza, necessitará de aplicação de sistemas de proteção anticorrosiva adicionais. Qualquer estrutura ou equipamento fabricado em aço-carbono deverá ser revestido com zinco através do processo de zincagem a quente recoberto com um revestimento orgânico, sistemas de proteção anticorrosiva denominados duplex.

## V. TÉCNICA DE INSPEÇÃO DE CABOS

Os desgastes que os cabos sofrem com o tempo, ocasionados pela ação de diversos fatores e que reduzem a sua resistência mecânica podem ocasionar o seu rompimento. Consequentemente podem ocorrer problemas graves para as empresas de energia elétrica na prestação dos serviços oferecidos aos seus clientes. Em função disso, essas empresas adotam procedimentos de inspeção para identificar possíveis falhas nos cabos e reduzir os riscos de acidentes.

Assim, além da caracterização e classificação da corrosividade atmosférica a que estão expostos os cabos condutores de LT, conforme seções anteriores, o estudo de técnicas de inspeção de cabos é, também, necessário. Esse foi o outro enfoque desse projeto CEP/CHESF/ANEEL.

### A. Mecanismos de Falha

Os mecanismos de falha mais comuns em cabos são a fadiga, deformação por sobrecarga, desgaste e corrosão [5]. A deformação ocorre quando o cabo é severamente sobrecarregado, ou em condições de carga normal devido à corrosão e ao desgaste mecânico.

Fazer curvas ou dobras em um cabo aumenta o esforço nos fios devido à distribuição não uniforme de carga e forças de compressão e tração entre os feixes, tornando algumas de suas partes propensas à fadiga. Rupturas por fadiga se propagam gradualmente por alguns fios, resultando em falhas sucessivas de fios e aumento do esforço nos fios restantes. Esse aumento de esforço atinge o ponto em que os fios sofrem deformação.

A corrosão é um risco sério para um cabo. Pontos de corrosão causam concentrações de esforço e inibem o movimento livre dos fios e feixes o que produz esforço adicional nos fios. A combinação desses dois efeitos pode acelerar drasticamente o desenvolvimento de rupturas por fadiga. Os fios podem também corroer uniformemente sobre a sua superfície inteira o que pode reduzir a sua seção transversal e causar uma diminuição de suas propriedades mecânicas.

A severidade da corrosão varia ao longo do comprimento de um cabo. Ambientes corrosivos existem em certas regiões e a corrosão ocorre, geralmente, nas seções do cabo que estão nessas regiões por períodos de tempo longos [6]. Áreas corrosivas estão localizadas usualmente onde mudanças abruptas de temperatura e/ou umidade ocorrem e/ou regiões de alta poluição.

O desgaste resulta de contaminação por partículas abrasivas e de atrito com outros objetos, como por exemplo, passadores gastos, imprópriamente dimensionados ou alinhados. Produtos corrosivos podem ser abrasivos ou alterar o esforço no contato entre fios. O desgaste afeta tanto fios externos quanto internos, resultando em redução de sua seção transversal. O desgaste externo ocorre na superfície do cabo e quando é muito severo pode indicar que os fios internos também estejam desgastados e algumas vezes ocasionar ruptura abrupta de fios. A fricção entre fios de um feixe pode causar desgaste interno.

Em cabos condutores de LT, uma das principais causas de deterioração é a corrosão [7].

### B. Inspeção em Cabos

A maioria dos cabos sofre uma deterioração gradual e falhas podem ocorrer com o tempo, causando inevitavelmente sérios prejuízos. Para tentar minimizar os riscos de tais falhas e suas conseqüências, normas e códigos de segurança recomendam a realização de inspeções periódicas para determinar as condições reais dos cabos [5] [8]. Essas regulamentações apresentam métodos de inspeção, as maiores causas de falha, critérios de substituição e procedimentos de manutenção de cabos.

Uma análise estatística realizada com uma amostra significativa de cabos relatada em [8] revelou os seguintes fatos sobre a condição de cabos em serviço:

Aproximadamente 10% de todos os cabos considerados mostraram perda de robustez acima de 15%; mais de 2% dos cabos tinham perda acima de 30% de sua robustez nominal. Em outras palavras, embora ainda em serviço, 10% de todos os cabos estavam em uma condição inaceitável e potencialmente perigosa e 2% estavam em uma condição extremamente perigosa.

Inversamente, mais de 70% de todos os cabos na amostra foram retirados de serviço com pouca ou nenhuma perda de robustez.

Os valores acima sugerem que somente uma percentagem muito pequena de cabos foi substituída no tempo adequado.

Essas observações ilustram que: embora a maioria dos cabos seja retirada prematuramente por precaução, muitos cabos em serviço podem estar severamente degradados e em condição perigosa. Isso significa que recursos elevados gastos com cabos em estado perfeitamente bom são desperdiçados anualmente, sem garantir a segurança necessária dos cabos.

As técnicas de inspeção em cabos devem, portanto, identificar com precisão os trechos dos cabos em condições de risco e que devam ser removidos e aqueles que ainda possuem condições de continuar em serviço, procurando otimizar aspectos de segurança e de economia.

Assim, procedimentos de testes devem ser capazes de determinar quando, ou não, os critérios de substituição descritos em normas se aplicam.

Os testes do tipo não destrutivo (NDT – “non-destructive testing”) são os mais indicados para essa finalidade.

### *C. Testes Não-Destrutivos*

As técnicas de testes não destrutivos (NDT – “non-destructive testing”) pertencem a um ramo da ciência de materiais que está relacionado com os aspectos de uniformidade, qualidade e utilidade de materiais e estruturas. Essencialmente, referem-se a todos os métodos de testes que permitem testar e inspecionar materiais sem danificá-los [9].

#### *C.1 Métodos NDT*

Vários procedimentos de teste não-destrutivo (NDT) têm sido propostos para detectar defeitos em materiais, empregando métodos diversos: visual, acústico, mecânico, líquido penetrante, magnético, indução eletromagnética etc. [8] [10] [11].

Os métodos de magnetização e de indução eletromagnética fornecem os melhores resultados na detecção de falhas em cabos de LT, apresentando boa sensibilidade e facilidade de manuseio, quando comparados com os outros métodos mencionados.

O método visual através da câmera fotográfica ou de filmagem torna-se muito lento e sujeito a erros em função do grau de definição da imagem, luminosidade etc. Nos demais métodos, os princípios de operação dificultam sua utilização em linhas de transmissão aéreas, além deles possuírem um grau de sensibilidade pequeno.

Por estes motivos e também pelo fato de existirem protótipos desenvolvidos no exterior [6] [10] [12], relatando resultados favoráveis na detecção de falhas em cabos, utilizando os dois métodos, o magnético e o de indução eletromagnética, optou-se por pesquisá-los neste trabalho, através de estudos e testes em laboratório.

#### *C.2 Resultados*

As duas técnicas escolhidas no projeto para detecção de falhas em cabos de aço carbono, indução eletromagnética (corrente parasita) e magnetismo, foram avaliadas em testes de laboratório e os resultados conseguidos são apresentados nessa seção. Fatores como, facilidade de construção do sensor ou de sua aquisição no mercado, sua sensibilidade, tipos de sinais fornecidos, entre outros, foram considerados.

Com base nesses resultados, foi indicada a técnica mais apropriada para a implementação de um protótipo de equipamento para inspeção de cabos de aço carbono, no escopo desse projeto.

##### *C.2.1 Indução eletromagnética*

A detecção da corrente parasita em um objeto é realizada, geralmente, por meio de uma ponta-de-prova excitada por um sinal alternado. Esse sinal induz uma corrente na superfície do objeto que é, então, detectada pela própria ponta-de-prova [13] [14].

A medição dessa corrente envolve vários aspectos, como:

- o tipo de material de que o objeto é formado (dielétrico, condutor, ...)
- se o objeto é formado por camadas de materiais diferentes superpostos
- o tipo de ponta-de-prova (simples, diferencial, ...)
- as características do sinal de excitação (amplitude, frequência, ...)
- que características medir dessa corrente (amplitude, fase etc.)?
- que circuito empregar para fazer a medição?

Geralmente, o comportamento da corrente parasita se modifica quando o objeto apresenta alguma falha (por exemplo, variação da sua seção reta devido a desgastes). A detecção dessa mudança na corrente pode, portanto, auxiliar na identificação de alterações das características mecânicas do objeto e contribuir na sinalização de situações de risco [13] [14].

No caso presente, como o interesse é por cabos condutores de energia elétrica, só foram considerados os materiais empregados nesse tipo de objeto.

Embora poucos trabalhos na literatura tratem da aplicação desta técnica em cabos utilizados em linhas de transmissão de energia elétrica [7] [10] [12], é interessante verificar o comportamento da corrente parasita nessa situação, quais os efeitos de uma carga capacitiva ou indutiva e que outros fatores poderiam influenciá-la.

O objetivo nessa parte foi investigar alguns testes aplicáveis no objeto em questão, para tentar especificar um módulo de medição que consiga determinar a corrente parasita e identificar falhas mecânicas na sua superfície, compreendendo:

- as características de falhas passíveis de serem detectadas – simples, múltipla, sua severidade (dimensões etc.)
- as características de pontas-de-prova – tamanho, diferencial, simples, ...
- o tipo de sinal de excitação e suas características – amplitude, frequência, duração, ...
- que características medir do sinal de interesse – amplitude, fase, ...?
- que circuito empregar para medir – modo comum, diferencial, ...?

##### *Comentários*

Embora alguns artigos encontrados na literatura mencionem resultados satisfatórios na detecção de falhas em cabos de aço [7] [10] [12], conseguidos com protótipos que utilizam a técnica de corrente parasita, e, ainda, que exista um produto comercial baseado nesse mesmo princípio, empregado em serviços de inspeção de cabos [7], não se conseguiu atingir resultados satisfatórios nas experiências realizadas na construção de sensores com essa técnica.

A alternativa seria utilizar sensores prontos que pudessem ser testados. Isso foi tentado, mas não se conseguiu nenhum para a aplicação desejada.

Por isso, a utilização dessa técnica para a aplicação desejada foi descartada, ficando como uma opção para pesquisas futuras em outros projetos sobre esse tema.

Iniciou-se, então, testes com a técnica de magnetização.

##### *C.2.2 Magnetismo*

Na técnica de magnetismo, a ponta de prova (ou sensor) é feita por um ímã permanente e bobinas sensoras que fornecem um sinal de tensão proporcional ao fluxo magnético induzido no cabo sob teste. Desde que o cabo esteja saturado magneticamente, o fluxo longitudinal será diretamente proporcional à área da seção reta transversal instantânea do cabo. Assim, uma variação da tensão é uma medida da variação dessa área.

Para avaliar essa técnica na inspeção de cabos, foi utilizado um sensor magnético e um sistema de aquisição de sinais.

Nos equipamentos que empregam essa técnica, os sinais captados pelo sensor são processados e fornecem dois sinais, denominados LF e LMA, que são impressos em um registrador gráfico. Os sinais LF e LMA servem para indicar variações nas condições do cabo. Esses sinais, para algumas falhas típicas, estão ilustrados na figura 4 [8].

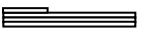
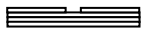
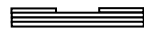


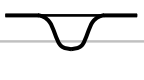
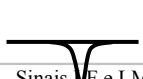


	Falha		
	1 fio	1 fio partido	
	removido	extensão curta	extensão longa
<b>cabo</b>			
<b>Sinal</b>	<b>Gráficos</b>		
<b>LMA</b>			
<b>LF</b>			

Figura 4 – Sinais LF e LMA para alguns tipos de falhas

De modo a verificar o sinal bruto do sensor (sem nenhum processamento), em diversas condições, ele foi acoplado em uma amostra de cabo com falhas, estendida em uma bancada de desenvolvimento [15], e o sistema de aquisição foi ativado. Os dados adquiridos ao longo de toda a extensão da amostra foram armazenados em um arquivo e posteriormente visualizados em forma gráfica, conforme mostrado na figura 5.

A análise do gráfico da figura 5 indica que só a obtenção dos sinais brutos por um sistema de aquisição, sem nenhum tipo de processamento posterior dos mesmos, possibilita apontar os trechos do cabo com alguma alteração na sua seção reta, mesmo em situações onde essa alteração é muito pequena.

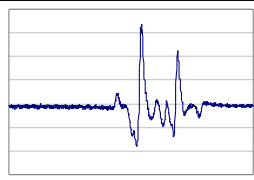
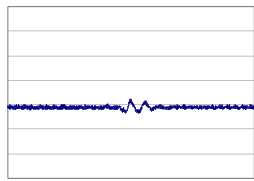
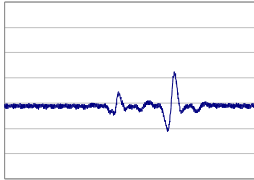
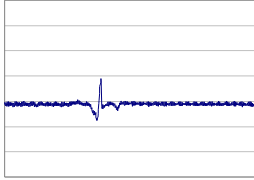
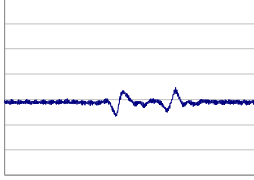
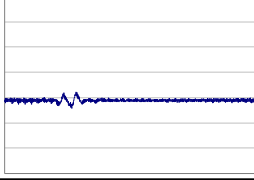
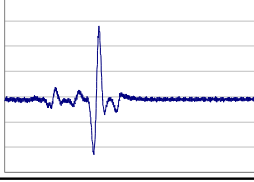
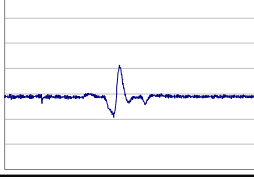
<b>4 fios rompidos</b> 2/seção reta afastamento 15cm	
<b>2 reduções de seção</b> 1/seção (sem corrosão) 5mm e 10mm afastamento 5cm	
<b>2 reduções de seção</b> 3/seção (sem corrosão) 5mm e 25mm afastamento 20cm	
<b>1 fio rompido e 1 redução</b> redução por corrosão 5mm fio rompido na redução	
<b>2 reduções de seção</b> 1/seção (com corrosão) 50mm e 35mm afastamento 15cm	
<b>2 reduções de seção</b> 1/seção (com corrosão) 5mm e 10mm afastamento 5cm	
<b>2 reduções de seção</b> 3/seção (com corrosão) 5mm e 25mm afastamento 20cm	
<b>2 fios rompidos e 2 reduções</b> redução sem corrosão 15mm fio rompido na redução	

Figura 5 – Gráfico do sinal bruto obtido pelo sistema de aquisição.

Falha	Sinal bruto
-------	-------------



Com base nos resultados obtidos nas três estações de ensaio de corrosão atmosférica, pode-se concluir:

A estação de ensaio de Sobradinho-BA não é agressiva aos metais, possui um índice de agressividade atmosférica baixo, e pode ser classificada como uma atmosfera tipicamente rural com clima seco e temperatura temperada.

A estação de ensaio de Camaçari-BA é agressiva aos metais, principalmente ao aço carbono, ao cobre e ao zinco e pode ser classificada como uma atmosfera mista com baixos índices de cloreto e sulfato, com clima muito úmido e temperatura temperada.

A estação de ensaio de Fortaleza-CE é agressiva aos metais, principalmente ao aço carbono, ao cobre e ao zinco, e pode ser classificada como uma atmosfera marinha com baixo índice de cloreto e não contaminada por sulfato, com clima úmido e temperatura temperada.

Na parte referente à inspeção, duas técnicas para detecção de falhas em cabos de aço, indução eletromagnética e magnetismo, foram avaliadas, em testes de laboratório, considerando fatores como: facilidade de construção de sensores, sua aquisição no mercado, sua sensibilidade, tipos de sinais fornecidos, entre outros.

Os trabalhos realizados com a técnica de corrente parasita não forneceram resultados satisfatórios. Os sensores construídos não se mostraram adequados, impossibilitando a obtenção de sinais representativos do fenômeno sob análise. A tentativa de se adquirir sensores desse tipo no mercado para a aplicação desejada foi infrutífera, não se conseguindo encontrar nenhum que atendessem os requisitos necessários.

Na técnica de magnetismo, empregando ímã permanente, a opção seguida foi a de utilizar um sensor existente. Um sistema de aquisição de sinais foi, então, conectado ao sensor e os sinais primários, relativos à amostra de cabo, foram obtidos, armazenados em arquivo e posteriormente visualizados em forma gráfica. A análise desse gráfico indicou que somente a aquisição desses sinais, sem nenhum processamento adicional, permitiu assinalar trechos onde estavam ocorrendo mudanças na seção reta do cabo, representando, também, o fenômeno pretendido.

Com base nesses resultados, a técnica baseada em magnetismo foi considerada a mais adequada para a implementação de um protótipo de equipamento para inspeção de cabos de aço carbono, no escopo desse projeto.

## VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Forrest, J.S. and Ward, J.S. Service experience of corrosion on steel-cored-aluminum overhead-line conductors, Proc. IEE 101, 271, 1954.
- [2] ABNT, NBR 6211 Corrosão Atmosférica – Determinação de cloretos na atmosfera pelo método da vela úmida, Nov/2001.
- [3] ABNT, NBR 6921 Corrosão Atmosférica – Taxa de sulfatação – Determinação pelo método da vela de dióxido de chumbo, Abr/2002.
- [4] ABNT, NBR 14643 Corrosão Atmosférica – Classificação da Corrosividade de Atmosferas, Jan/2001.
- [5] Meiley, Steve, “Wire Rope: Detecting Problems Before They Become Failures”, Reader’s Digest, Winter 2003
- [6] Weischedel, Herbert R., “The Magnetic Flux Leakage Inspection of Wire Ropes”, NDT Technologies, Inc.
- [7] Lewis, K.G., Sutton, J., “Detection of Corrosion in ACSR Overhead Line Conductors”, Distribution Developments, Jun/1985.
- [8] Weischedel, Herbert R., “The Inspection of Wire Ropes in Service: A Critical Review”, Materials Evaluation, Vol. 43, No. 13, pp 1592 – 1605, 1985, American Society for Nondestructive Testing, Inc.
- [9] Rao, B.P.C., “Introduction to Non-Destructive Testing (NDT)”.
- [10] Komoda, M., Kawashima, T., Mineruma, M., Mineyama, A., Aihara, M., Ebinuma, Y., Kanno, T., Kiuchi, M., “Electromagnetic Induction Method for Detecting and Locating Flaws on Overhead Transmission Lines”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 3, Jul/1990.
- [11] ABENDE – Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção – <http://www.abende.org.br>.
- [12] Havard, D.G., Bellamy, G., Buchan, P. G., Ewing, H. A., Horrocks, D. J., Krishnasamy, S. G., Motlis, J., Yoshiki-Gravelsins, K. S., “Aged ACSR Conductors Part I – Testing Procedures for Conductors and Line Items”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 2, Apr/1992.
- [13] Hansen, J., “The Eddy current inspection method, Part 1 – History and electrical theory”, Insight Vol. 46 No. 5, May/2004.
- [14] <http://www.geocities.com/raobpc/index.html>, Rao, B.P.C., “Eddy Current Non Destructive Testing”.
- [15] Lourenço, Celia R. S. H., Sebrão, Mauro Z., Caixão, Sergio de A., Souza, Sergio I., Lourenço, Plutarcho M., “Implementação de Bancada para Desenvolvimento de Técnicas de Detecção de Falhas em Cabos de LTs.”, Relatório Técnico, CEPTEL No. DTE 45723/2007.