

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CÍCERO LEFORT BORGES

**UMA ABORDAGEM ALTERNATIVA PARA INSPEÇÃO PREDITIVA NÃO
INVASIVA EM LINHA AÉREA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO NA
ÁREA RURAL**

**Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica como parte dos
requisitos para obtenção do Título de Doutor em
Ciências em Engenharia Elétrica.**

Área de concentração: Sistemas de potência

Orientador: Manuel Luís Barreira Martinez

Dezembro de 2012

Itajubá

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –
Bibliotecária Margareth Ribeiro- CRB_6/1700

B732a

Borges, Cícero Lefort

Uma abordagem alternativa para inspeção preditiva não inva_ siva em linha aérea de distribuição de média tensão na área rural / Cícero Lefort Borges. -- Itajubá, (MG) : [s.n.], 2012.

114 p. : il.

Orientador: Prof. Dr. Manuel Luís Barreira Martinez.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Distribuição. 2. Inspeção. 3. Invasiva. 4. Isolador. 5. Linha. 6. Ruído. I. Martinez, Manuel Luís Barreira, orient. II. Universi_ dade Federal de Itajubá. III. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CÍCERO LEFORT BORGES

**UMA ABORDAGEM ALTERNATIVA PARA INSPEÇÃO PREDITIVA NÃO
INVASIVA EM LINHA AÉREA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO NA
ÁREA RURAL**

**Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica como parte dos
requisitos para obtenção do Título de Doutor em
Ciências em Engenharia Elétrica.**

Área de concentração: Sistemas de potência

Orientador: Manuel Luís Barreira Martinez

Dezembro de 2012

Itajubá

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CÍCERO LEFORT BORGES

**UMA ABORDAGEM ALTERNATIVA PARA INSPEÇÃO PREDITIVA NÃO
INVASIVA EM LINHA AÉREA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO NA
ÁREA RURAL**

Tese aprovada por banca examinadora em 14 de dezembro de 2012, conferindo ao autor o título de ***Doutor em Ciências em Engenharia Elétrica.***

Banca examinadora:

Prof. Manuel Luís Barreira Martinez (Orientador)

Prof. João Carlos de Oliveira (CEFET-MG)

Prof. Credson de Salles (FACECA)

Prof. Paulo Cesar Rosa

Prof. Estácio Tavares Wanderley Neto

Itajubá

2012

RESUMO

Essa abordagem propõe a utilização de instrumentos que captam os ruídos emitidos pelos componentes de uma linha aérea de distribuição de energia de média tensão na área rural. O componente investigado foi o isolador de porcelana do tipo pino, devido sua relevância no sistema de isolamento da linha. Os resultados foram obtidos a partir de inspeções realizadas na rede elétrica da AES Sul Distribuidora Gaúcha de Energia e de ensaios realizados no Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá. A duração inicial da pesquisa foi de dois anos, e prorrogada por igual período para investigação das influências das condições atmosféricas nos resultados obtidos na etapa inicial. Apresenta-se uma breve comparação com a consagrada técnica de inspeção não invasiva em instalações energizadas, que faz uso de instrumentos sensíveis às ondas de calor (termovisores). Afirma-se que as condições atmosféricas não tiveram influência nas medições de nível de ruídos. Por fim, recomenda-se a substituição de qualquer isolador que indique nível de ruídos maior que zero ao ser inspecionado a partir do solo, próximo à base da estrutura (poste).

•

ABSTRACT

This approach proposes the use of instruments that capture the noises emitted by the components of an overhead distribution line of medium voltage in rural areas. The component investigated was the porcelain insulator pin-type, due to their importance in the insulation system of the line. The results were obtained from inspections across the network of the electric utility AES Sul and test conducted in High-voltage Laboratory of the Federal University of Itajubá. The initial duration of the research has been two years and extended for the same period for the investigation of environmental influences on the results obtained in the initial stage. It presents a brief comparison with dedicated non-invasive inspection technique on energized facilities, which makes use of instruments sensitive to heat waves (thermal imagers). It is said that the weather conditions have not had influence on noise level measurements. Finally, recommended the replacement of any insulator indicating noise level greater than zero to be inspected from the ground near the base of the structure (post).

•

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Concessionária do Serviço Público de Energia Elétrica, AES Sul Distribuidora Gaúcha de Energia, pelo suporte financeiro. Agradeço também ao Coordenador do Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá, Professor Manuel Luís Barreira Martinez, pois ele acreditou neste colega: ex-aluno da Escola Federal de Engenharia de Itajubá (turma 1982), Engenheiro da Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia durante o período de 1984 até 2002, Pesquisador da Fundação de Pesquisa e Assessoramento à Indústria de 2003 até 2008 e Professor Efetivo do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, desde 2009.

Muito obrigado.

CÍCERO LEFORT BORGES¹

•

¹ Ao final desse trabalho, permita-me expor alguns valores pessoais. Eles muito me valeram em vários momentos do curso.

- Deus, o Criador: certeza que tudo conduz para o melhor.
- Jesus Cristo, o meu Senhor: vida, verdade, caminho. Que leva ao Criador, em paz.
- Família: melhor lugar do mundo.
- Amigos: valiosos presentes que a vida nos proporciona.
- Amor próprio: cimento que liga os homens em comunidades saudáveis.
- Respeito: fundamental para a boa convivência humana.
- Vaidades: não importa.
- Difamação, Inveja, Intriga: vícios perigosos, e perda de tempo.

SUMÁRIO

Nomenclatura e simbologia.....	11
Índice de Figuras	13
Índice de Tabelas	15
Capítulo 1 – INTRODUÇÃO.....	17
1.1 – Hipótese	17
1.2 – Revisão da literatura.....	22
1.3 – Contribuições	27
1.4 – Publicações	28
1.5 – Estrutura da tese	29
Capítulo 2 – TECNOLOGIAS.....	31
2.1 – Introdução	31
2.2 – Detecção de ruídos sonoros.....	34
2.3 – Detecção de ruídos eletromagnéticos	37
2.4 – A inspeção tradicional em linha aérea de distribuição	42
2.5 – Conclusão	45
Capítulo 3 – METODOLOGIAS E ENSAIOS.....	47
3.1 – Introdução	47
3.2 – Ensaio em campo	47
3.3 – Ensaio em laboratório.....	51
3.4 – A base de dados	58
Capítulo 4 – ANÁLISES E RESULTADOS.....	69
4.1 – Introdução	69
4.2 – As análises.....	69
4.3 – Os resultados	72
4.3.1 – Da primeira parte	72
4.3.2 – Da segunda parte	79
4.3.3 – Do projeto de pesquisa	88
4.4 – Os resultados de um Caso	90
4.5 – Priorização das intervenções.....	91
Capítulo 5 – CONCLUSÕES E CONTRIBUIÇÕES.....	99
5.1 – As conclusões	99
5.2 – As contribuições	103
5.3 – O procedimento recomendado	103
5.4 – Sugestões para pesquisas futuras.....	106

5.5 – Comentários finais.....	107
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	109
ANEXOS.....	111

•

Nomenclatura e simbologia

°C – graus Celsius.

Ω - ohm.

μC – micro Coulomb.

μs – micro Segundo.

μV – micro Volt.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

AM – Amplitude Modulada.

ANEEL – Agencia Nacional de Energia Elétrica.

BASIC – *Beginner's All-purpose Symbolic Instruction Code*.

CCON – Comitê Coordenador da Operação Norte-Nordeste.

CEFET-MG – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

cm – centímetro.

CODI – Comitê de Operação da Distribuição.

COELBA – Companhia de eletricidade do Estado da Bahia S.A.

dB – unidade Decibel. É igual a 10 vezes o Bel: um valor correspondente à grandeza física, obtido através da expressão: $Bel = \text{Log}(X/X_0)$. Os valores X e X_0 representam, respectivamente, a grandeza e a quantidade tomada como referencia.

dBA – unidade de medida da intensidade do som percebido pelo ouvido humano, quando a medição (instrumento) utiliza a curva de ponderação tipo A. O meio de propagação é o ar.

DBT – extensão criada para o arquivo gerado pelo instrumento PDA.

FM – Frequência Modulada.

GHz – Giga Hertz.

Hz – Hertz.

IFP-IS – Índice Falso Positivo para Isoladores Sãos (bons).

IFP-PF – Índice Falso Positivo para Isoladores em Pré-Falha.

IP-IS – Índice Positivo para Isoladores Sãos (bons).

IP-PF – Índice Positivo para Isoladores em Pré-Falha

kg – quilograma.

kHz – quilohertz.

km – quilometro.

km/h – quilometro por hora.

kV – quilovolt.

kW – quilowatt.

LADMT – Linha Aérea de Distribuição de Média Tensão.

LADMT-AR – Linha Aérea de Distribuição de Média Tensão, em Área Rural.

m – metro.

MHz – mega Hertz.

mm – milímetro.

min – minuto.

NO_x – Substancias derivadas da substancia Óxido de Nitrogênio.

O₃ – Gás ozônio (ou simplesmente ozônio).

ONS – Operador Nacional do Sistema elétrico brasileiro.

P&D – Pesquisa e Desenvolvimento.

PDA – *Personal Digital Assistant*.

RF – Radio Frequência.

RI – Radio Interferência.

RIV – Radio Interference Voltage.

SCI-1 – Sistema de Controle de Isoladores (referente à primeira parte da pesquisa).

SCI-2 – Sistema de Controle de Isoladores (referente à segunda parte da pesquisa).

SEP – Sistema Elétrico de Potência.

SCOM – Subcomitê de operação e manutenção.

TV – *TeleVision* (sinal de televisão).

TVI – *TeleVision Interference* (interferência de em sinal de televisão).

UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá.

•

Índice de Figuras

Figura 1.1 – Intensidades ultrassônicas de descargas parciais.....	23
Figura 1.2 – Utilização de instrumento de ultrassom.....	24
Figura 1.3 – Utilização de instrumento de RF	26
Figura 2.1 – Utilização em campo do detector de ultrassom	35
Figura 2.2 – Representação gráfica de ruídos em alta e baixa frequência [11]	38
Figura 2.3 – Utilização em campo do detector de RF.....	39
Figura 2.4 – Representação gráfica de ruídos de RF [11].....	40
Figura 3.1 – Isoladores removidos da linha.....	51
Figura 3.2 – Isoladores com anomalias	55
Figura 3.3 – Dispositivo para medição dos componentes da chuva artificial	56
Figura 3.4 – Três fichas completas de isoladores no sistema SCI-1	60
Figura 3.5 – Interface semelhante à tela de entrada no PDA.....	62
Figura 3.6 – Interface principal do sistema SCI-2.....	63
Figura 3.7 – Fichas de isoladores geradas pelo sistema SCI-2.....	63
Figura 3.8 – Interface para o cadastramento inicial no sistema SCI-2.....	65
Figura 3.9 – Formulário para anotação dos resultados dos ensaios	67
Figura 3.10 – Todas as informações do isolador número 30.....	68
Figura 4.1 – Curva de permanência para os níveis de ruídos – Parte 1	73
Figura 4.2 – Curva de permanência para os níveis de ruídos – Parte 2.....	80
Figura 4.3 – Curva de permanência do fator temperatura ambiente	81
Figura 4.4 – Curva de permanência do fator umidade relativa do ar	82
Figura 4.5 – Curva de permanência do fator velocidade do vento.....	83
Figura 4.6 – Comparação do desempenho operacional de um trecho específico da rede aérea em média tensão da AES Sul	90
Figura 4.7 – Modelo estatístico para tensão disruptiva em frequência industrial sob chuva isoladores 15 kV que não suportaram o ensaio – níveis de ruídos superiores a 0 dB(1µV)	93
Figura 4.8 – Valores médios mais prováveis para a tensão disruptiva em frequência industrial sob chuva isoladores 15 kV– níveis de ruídos superiores ao da abscissa ...	94
Figura 4.9 – Valores médios mais prováveis para a tensão disruptiva em frequência industrial sob chuva isoladores 15 kV– níveis de ruídos iguais ao da abscissa.....	95
Figura 4.10 – Valores médios mais prováveis para a tensão disruptiva em frequência industrial sob chuva isoladores 25 kV– níveis de ruídos superiores ao da abscissa ...	96
Figura 4.11 – Valores médios mais prováveis para a tensão disruptiva em frequência industrial sob chuva isoladores 25 kV– níveis de ruídos igual ao da abscissa	97

•

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 – Classificação dos ensaios em isoladores cerâmicos	53
Tabela 3.2 – Características da chuva artificial utilizada no ensaio.....	56
Tabela 4.1 – Eficiência da antena de ultrassons versus nível de ruídos – 15 kV.....	74
Tabela 4.2 – Eficiência da antena de ultrassons versus nível de ruídos – 25 kV.....	75
Tabela 4.3 – Eficiência da antena de ultrassons versus nível de ruídos – 15 kV e 25 kV	76
Tabela 4.4 – Índices parciais, por nível limite de ruídos – 15 kV e 25 kV	77
Tabela 4.5 – Eficiência do detector de ultrassons utilizado nessa pesquisa – Parte 1	78
Tabela 4.6 – Eficiência do detector de ultrassons utilizado nessa pesquisa – Parte 2	84
Tabela 4.7 – Erro na eficiência do detector de ultrassons utilizado – Partes 1 e 2	84
Tabela 4.8 – Eficiência do detector de ultrassons. Isoladores reprovados em laboratório. Fatores atmosféricos desconsiderados.	86
Tabela 4.9 – Eficiência do detector de ultrassons. Isoladores reprovados em laboratório. Fatores atmosféricos considerados.	87
Tabela 4.10 – Diferenças de resultados da eficiência. Isoladores reprovados em laboratório.....	87

•

Capítulo 1 – INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta o objetivo desta tese, expõe os fundamentos e as observações que formam a base conceitual para o desenvolvimento do trabalho, faz uma breve revisão das tecnologias associadas, relaciona as publicações feitas e apresenta a organização geral dos capítulos e anexos.

1.1 – Hipótese

Muitas Linhas Aéreas de Distribuição de Média Tensão (até 36,2 kV) na Área Rural – LADMT-AR – foram construídas utilizando-se isoladores de porcelana. Para diminuir o número de interrupções nessas linhas há, por parte das concessionárias do serviço público de energia elétrica, uma grande tendência: efetuar as substituições dos isoladores de porcelana por poliméricos, e de redes convencionais por compactas.

Até certo ponto, essas trocas são feitas de forma indiscriminada, pois o número de isoladores de porcelana no estado de pré-falha² e em operação nessas linhas é desconhecido pelas concessionárias brasileiras. Diante disso, para prevenir interrupções no fornecimento da energia, frequentemente essas empresas adotam procedimentos de substituição tecnológica de forma indiscriminada.

Tais procedimentos são considerados antieconômicos, já que unidades ainda em bom estado operacional podem estar sendo descartadas sem a real necessidade. Por outro lado, sabe-se que existe um elevado número de isoladores de porcelana em operação no sistema elétrico brasileiro. Diante desse cenário, observou-se a oportunidade para desenvolver procedimentos econômicos de inspeção em campo nessas linhas.

Um procedimento com nível de confiabilidade aceitável, capaz de permitir a identificação dos isoladores em estado de pré-falha, seria de grande interesse. Tal procedimento poderia reduzir expressivamente os custos

² Para um componente elétrico, o estado de pré-falha é aquele intermediário entre o estado normal e o estado de falha. Algumas causas que levam o componente do estado normal para o estado de pré-falha são: o envelhecimento do material (perda natural das características iniciais), os esforços (mecânicos e/ou elétricos) temporários além dos limites do projeto do componente.

operacionais dessas linhas. Isso porque, além de indicar as substituições apenas dos isoladores necessários, também evitaria gastos com as substituições desnecessárias.

Por outro lado, dentre os procedimentos conhecidos, a utilização de instrumentos termovisores tem sido a prática adotada para realização de inspeções não invasivas em instalações elétricas de alta tensão. Entretanto, tais instrumentos baseiam-se na elevação da temperatura do ponto inspecionado. Ou seja, é necessário que exista um processo, em andamento, que cause a elevação da temperatura no ponto inspecionado de pelo menos 5 °C para que o instrumento detecte o problema.

Porém, se por um lado esses instrumentos representam uma solução para inspeção em componentes elétricos energizados, por outro é também considerada uma solução de elevado custo, devido à tecnologia empregada pelo instrumento (detecção e seleção das ondas de calor).

Esse último aspecto, em muitos casos, inviabiliza a utilização dessa técnica. Outra característica relevante desses procedimentos é que sua eficácia para identificação de pontos críticos aumenta com a elevação do nível de tensão da instalação elétrica e do grau de degradação do isolamento. Isso porque os processos causadores da elevação da temperatura são mais vigorosos nas classes de tensão superiores.

Assim, continuando na busca por uma técnica alternativa, existem fenômenos que ocorrem nos componentes de uma LADMT energizada, que não causam a elevação da temperatura imediatamente. Entretanto, representam o início de processos que podem culminar na ocorrência da falha do componente. Ou seja, o surgimento do fenômeno muda o estado normal do componente para o estado de pré-falha. A partir desse estado, poderá evoluir ou não, para o estado de falha.

Dentre as possíveis formas de descargas elétricas [1] [2] [3] [4] [5], citam-se: a descarga corona e o trilhamento elétrico [6]. Nesses casos, o instrumento termovisor não detecta o problema, porque, embora tais fenômenos não causem a elevação da temperatura, seu surgimento

corresponde imediatamente a uma alteração na frequência da fonte de ruídos que o componente representa.

Os instrumentos utilizados para detecção e análise de ondas sonoras e eletromagnéticas possuem custos expressivamente menores que os custos de instrumentos termovisores, uma vez que as tecnologias com base em ondas eletromagnéticas e sônicas já são amplamente utilizadas com elevado sucesso em outras áreas, especialmente na de saúde e na militar.

Alguns exemplos nessas áreas são: as aplicações em ultrassonografias (ou de imagens em RF), as técnicas ativas (pelas quais os sinais são gerados, emitidos e captados) e as técnicas passivas (pelas quais os sinais são captados, decodificados e convertidos).

As técnicas ativas e passivas possuem pelo menos 70 anos de aplicação e exigiram pesados investimentos em engenharia, o que amortizou em grande parte o volume de investimentos. Outros exemplos, na área de engenharia, são: a identificação de fissuras em tubulações pressurizadas de sistemas nucleares e a atuação de chaves (ou disjuntores) em painéis blindados.

Assim, os instrumentos detectores de ruídos passaram a representar uma alternativa atraente na busca por um procedimento (econômico) de campo para inspeção de componentes do sistema de isolamento da linha. A principal hipótese desta tese refere-se à falta de conhecimento da eficácia³ do uso de tais instrumentos para avaliação do estado da isolação de componentes, assim foi proposta a realização desta pesquisa.

O componente investigado foi o isolador de porcelana do tipo pino. Isso porque ele é fundamental para o sistema de isolamento da LADMT e o componente encontrado em grande quantidade no sistema elétrico brasileiro.

Outra questão importante foi definir a localização geográfica da LADMT a ser investigada. Se na área urbana ou na área rural.

³ O termo se refere à correlação entre o nível de ruído e a suportabilidade elétrica, do isolador.

Sabe-se que na área urbana há maior concentração de fontes de ruídos adicionais, principalmente os originados a partir de máquinas e veículos. Esse fato foi comprovado por meio de medições realizadas, preliminarmente, em várias cidades no eixo São Paulo – Rio Grande do Sul.

Nas áreas urbanas também existe a presença de edifícios, que se comportam como anteparos, refletindo e atenuando as ondas associadas com as fontes de ruídos. Entretanto, nas áreas rurais, não se verifica a presença de edifícios ou de grandes concentrações de máquinas e veículos, que poderiam dificultar ainda mais a investigação.

Assim, para mitigar as influências de fontes de ruídos adicionais sobre os resultados da pesquisa, optou-se pela investigação de linhas aéreas de distribuição de média tensão localizadas nas áreas rurais (LADMT-AR).

Então, com base na argumentação acima exposta, foi formulada a principal hipótese associada a esta tese, qual seja: existe real possibilidade de se utilizar equipamentos remotos, aptos a medir ruídos de ultrassons e radiofrequências, para detectar com confiança estatística, isoladores em estado de pré-falha.

Para isso, são apresentadas e discutidas as metodologias adotadas, os resultados obtidos com a utilização dessas tecnologias, bem como é discutida a influência das condições atmosféricas sobre as medições dos níveis de ruídos dos isoladores. A partir dos resultados obtidos, também se recomenda um procedimento para inspeção dessas LADMT-AR utilizando as tecnologias de ultrassons e de RF.

Especificamente, outras hipóteses associadas são investigadas. São elas:

- 1- Existe uma correlação entre níveis de ruídos e suportabilidade frente a solicitações elétricas em frequência industrial;
- 2- Essa correlação pode ser utilizada de forma positiva para a definição de uma técnica de inspeção de campo para determinar a condição física de isoladores tipo pino, em operação;

- 3- A existência de ruídos não significa somente possíveis interferências nas telecomunicações, mas também problemas de suportabilidade e falhas dielétricas no isolador.

Deste modo, foram avaliadas ferramentas complementares de baixo custo, que poderiam ser aplicadas na inspeção de isoladores tipo pino, das LADMT-AR. Pois, uma vez comprovada suas eficácias, pretende-se que seja uma alternativa técnica viável aos tradicionais sistemas de termovisão e aos modernos sistemas para detecção de corona.

As tecnologias concorrentes (termovisão e corona) e o método proposto nesta tese não são capazes de fornecer uma definição instantânea do ponto defeito. As que fazem uso de imagens térmicas não conseguem definição no campo (logo após sua aplicação). Para uma correta análise (sem dúvidas sobre a existência ou não de defeitos), é necessário que as imagens térmicas sejam tratadas individualmente no escritório, via *software*.

Tais procedimentos, que consomem tempo e trabalho de engenharia de manutenção, apresentam custos elevados. O custo de aquisição de um termovisor de porte adequado para as inspeções de LADMT-AR é da ordem de R\$ 200.000,00 (duzentos mil reais) e de um detector de imagens corona é superior a R\$ 350.000,00 (trezentos e cinquenta mil reais)

O custo de aquisição de apenas um conjunto de detectores (ultrassom e RF), proposto nesta tese, é da ordem de R\$ 20.000,00 (vinte mil reais). É um valor extremamente atrativo, pois permitiu ao patrocinador da pesquisa (AES Sul) equipar cinco equipes para cobrir toda sua área de concessão. (torno de 90.000 km²).

Este trabalho é original porque correlaciona os ruídos detectados com a suportabilidade dos isoladores tipo pino, o que não é de conhecimento geral, pois ruídos em componentes de rede sempre têm como preocupação interferências em sistemas de comunicação. Assim, a detecção de um isolador fonte de ruído capaz de gerar interferências, também implica em detectar um isolador com baixa suportabilidade dielétrica.

1.2 – Revisão da literatura

As tecnologias relacionadas às hipóteses desta tese são aquelas utilizadas nos instrumentos de detecção de ruídos ultrassônicos e de radiofrequências. São raras as fontes de informações específicas sobre a utilização dessas tecnologias aplicadas em LADMT-AR. Encontra-se uma infinidade de catálogos de equipamentos, porém com raríssimas discussões sobre sua aplicação.

Em geral, a maioria dos catálogos descreve as especificações técnicas de instrumentos comumente aplicados na detecção de problemas de RIV e TVI nas redes de média e alta tensão. Assim, possuem por fim específico (ditado por seu projeto e construção), localizar equipamentos e partes responsáveis pela emissão de ruídos que dificultam os processos de sintonia de som e formação de imagens.

Até então, como se observou, esses instrumentos (tecnologias) nunca foram aplicados, de forma indiscriminada, para detectar isoladores em condição de pré-falha. O que significa de modo simplificado que: a relação entre nível de ruído e a suportabilidade em frequência industrial dos isoladores tipo pino nunca foi investigada de forma científica.

Segundo Lundgaard [7], a principal dificuldade de detecção de descargas elétricas pelos métodos acústicos à distância ocorre em função do excesso de interferência ambiente. O método é eficiente, porém não permite uma localização precisa da fonte de descargas parciais. Sua principal vantagem é que o trabalhador que realiza a inspeção instrumental se encontra à distância do equipamento inspecionado, não invadindo áreas não seguras e regiões de concentração de altos campos eletromagnéticos. O artigo apresenta uma base teórica física bastante detalhada sobre os processos acústicos e conclui que a melhora na forma de se detectar defeitos é através da combinação da técnica acústica com outra técnica de detecção de descargas elétricas.

Jermendy e Simon [8] discutem resultados experimentais obtidos sobre isoladores tipo pino (vidro e porcelana), em escala de laboratório. A técnica de

ultrassom é considerada eficiente. O resultado mais interessante produzido com a utilização da técnica do ultrassom identificou que: a maior intensidade na detecção das descargas parciais ocorre a uma distância de 1,5 m da fonte da descarga. Numa faixa de frequências de 35 kHz até 45 kHz, além de se detectar descargas elétricas superficiais e internas, se consegue detectar descargas corona na ordem de 5 μC .

Outro resultado interessante é uma correlação entre a intensidade do ultrassom em função da tensão aplicada e da distância do sensor de ultrassom da fonte de descargas parciais. Esse resultado pode ser visualizado no gráfico da Figura 1.1.

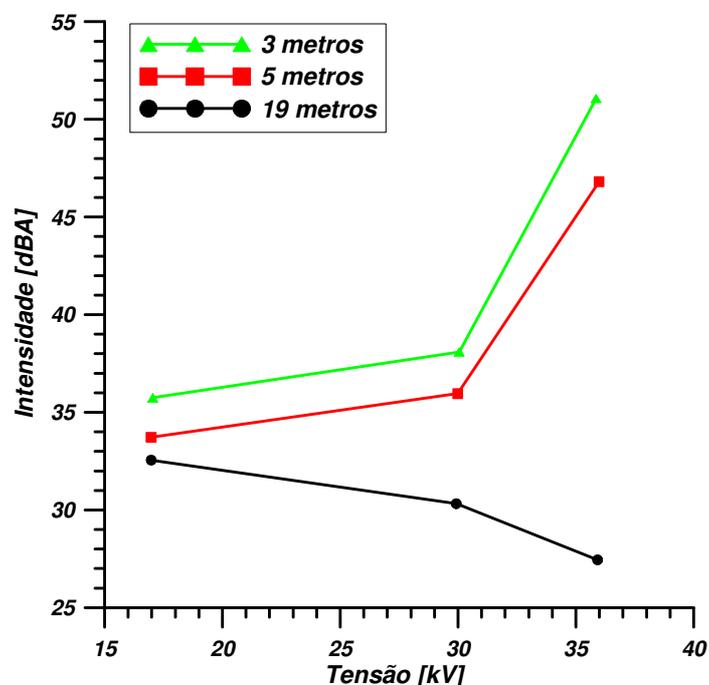


Figura 1.1 – Intensidades ultrassônicas de descargas parciais

Pode-se observar no gráfico acima, obtido em laboratório, que o processo de atenuação dos níveis de ruídos ultrassônicos depende da distância entre fonte e objeto. Isso implica que, a partir de determinada distância, a eficiência na detecção de ruídos (dos atuais equipamentos), cai para limites que podem ser associados aos ruídos brancos do ambiente. Portanto, com pouco ou nenhum significado estatístico.

A Figura 1.2 mostra um modelo de instrumento ultrassônico [9], durante a realização dos trabalhos em campo.



Figura 1.2 – Utilização de instrumento de ultrassom

Outra tecnologia é aquela associada com a detecção de ruídos eletromagnéticos de radiofrequências. A RF é uma taxa de oscilação da onda no intervalo das frequências entre 3 kHz e 300 GHz.

A energia em uma corrente de RF pode radiar de um condutor para o espaço como ondas eletromagnéticas (ondas de rádio); essa é a base da tecnologia de rádio. O alcance e a capacidade de transportar a energia dependem da frequência do campo eletromagnético, da sua potência e da eficiência do acoplamento entre o emissor e receptor [10].

Nas redes de distribuição, a principal fonte de RF são pequenos vãos (*gap's*) nas ferragens das estruturas não aterradas, porque permitem a ocorrência de fenômenos tais como: centelhamentos, descargas de corona e descargas internas. Dentre esses, os centelhamentos são predominantes (95%). Eles podem ser detectados na faixa de frequências de 1 MHz até 1 GHz e serem observados nos ciclos positivo e negativo no sinal da tensão.

As descargas de corona podem gerar ruídos audíveis e de RF, especialmente nas imediações de uma LADMT. Elas também representam perdas de energia e sua ação resulta na produção de O_3 e de NO_x (que é prejudicial à saúde humana).

Os eflúvios de corona, de interesse, nas LADMT-AR ocorrem em componentes tais como: ferragens e isoladores. A intensidade dos ruídos gerados é bastante inferior àqueles gerados pelos condutores. Entretanto, podem ser determinísticos para a avaliação das condições do isolamento.

As ferragens defeituosas, pinos e contra pinos mal ajustados ou soltos podem igualmente gerar pulsos eletromagnéticos associados ao efeito corona. Estes ocorrem nas faixas das frequências de FM e TV, provocando interferência ou ruídos, afetando a qualidade da recepção. Isso, por sua vez, determina as faixas de projeto de alguns dos detectores de ruídos eletromagnéticos existentes no mercado [11].

Descargas individuais de corona também provocam pulsos de tensão e corrente de curta duração que se propagam ao longo das linhas. Esses pulsos fazem com que a linha atue como antena, emitindo campos eletromagnéticos em suas imediações. Tais descargas ocorrem durante ambos os semiciclos da tensão aplicada. Porém, aquelas que ocorrem durante os semiciclos positivos irradiam ruídos capazes de interferir na rádio – recepção AM.

A geração desses ruídos fere os direitos individuais dos moradores das vizinhanças da linha de transmissão, uma vez que os ruídos podem se propagar além da faixa de servidão⁴ da linha. O estudo do comportamento das linhas no que se refere às interferências nas transmissões de rádio (RI) e televisão (TVI) é complexo em virtude dos inúmeros fatores que afetam seu comportamento. Alguns desses fatores não foram ainda completamente entendidos e novos fatores poderão ainda ser identificados, de forma que os efeitos cumulativos são considerados em bases estatísticas.

No entanto, em termos de ruídos, as descargas de corona são responsáveis por menos que 5% de RF gerada nas redes de distribuição de energia elétrica. São fenômenos normalmente associados a níveis de tensão superiores à classe de isolamento de 145 kV, muito maiores que os existentes nas linhas de distribuição, projetadas para classes de isolamento inferiores a 36,2 kV [12].

Dutta e Duttagupta [13] apresentam detalhes iniciais da aplicação da técnica de detecção e localização de falhas em isoladores por meio das componentes de alta frequência coletadas da rede de distribuição ou

⁴ Faixa de servidão é a gleba de terra reservada para a passagem da linha de transmissão de energia elétrica. Possui largura igual a duas vezes a distância até o eixo longitudinal da linha e comprimento igual ao da linha.

transmissão. Os resultados obtidos indicam uma técnica potencial para detecção e localização de falha em isoladores.

Em trabalho realizado por Kannus [14] são apresentados resultados referentes a rádio interferência gerada por isoladores tipo pino em linhas de distribuição de 24 kV, em que se avalia a influência da umidade na geração de RF. Discute-se que a presença de umidade acima de 80% reduz a geração de RF superficial, pois, segundo o autor, as moléculas de água aumentam a eletronegatividade do ar. Quando o isolador possui descargas internas, a umidade não tem influência sobre os valores medidos de RF. Kannus também apresenta como frequência ótima para detecção de RF a faixa entre 40 MHz e 300 MHz, sendo que em diferentes frequências podem se detectar os mesmos sinais com intensidades diferentes.

As avaliações realizadas em campo, ao longo deste trabalho indicaram que inspeções na faixa de frequências de 40 MHz são potencialmente mais promissoras aos propósitos desta pesquisa. Por isso essa frequência é recomendada para a utilização em antenas sintonizáveis. As inspeções com frequências mais elevadas (da ordem de 300 MHz) não foram eficazes.

A Figura 1.3 mostra um modelo de instrumento de RF sintonizável que foi utilizado durante a execução dos trabalhos em campo [15]. Os dispositivos sintonizáveis apresentam um conjunto de vantagens na detecção fina de ruídos, uma vez que permitem ajustes de varredura.



Figura 1.3 – Utilização de instrumento de RF

No entanto, são de difícil aplicação em procedimentos para inspeção de grandes extensões de LADMT-AR. Também possuem maior custo e têm como falha crônica a indefinição de direcionalidade, fato muito criticado pelas equipes de manutenção.

1.3 – Contribuições

Este trabalho de tese permitiu as comprovações das seguintes afirmativas:

- A) Existe correlação entre nível de ruídos e suportabilidade frente a solicitações em frequência industrial, em isoladores tipo pino.
- B) A correlação ruídos-suportabilidade pode ser utilizada de forma positiva para definição de técnica de inspeção em campo, a fim de determinar a condição física de isoladores tipo pino.
- C) Os procedimentos recomendados são de baixo custo, quando comparados com a aplicação de técnicas concorrentes (de termovisão e corona).
- D) Apesar de existir nítida correlação ruídos-suportabilidade para isoladores em estado de pré-falha, o mesmo não foi verificado para isoladores são (bons).
- E) Ruídos não significam somente possíveis interferências nas operações de difusão de rádio e televisão, mas também problemas de suportabilidade dielétrica e falhas dielétricas em isoladores tipo pino.

Adicionalmente, esta tese contribuiu com o desenvolvimento de métodos para aplicação de instrumentos com tecnologia de ultrassons (combinados com técnicas de varredura por RF), para inspeção de isoladores tipo pino em LADMT-AR energizada.

Isso pode ser considerado uma contribuição inédita, pois, apesar de existirem técnicas, bem documentadas⁵, para a localização de ruídos associados às interferências nas transmissões de rádio e televisão, não se

⁵ O processo de remoção da anomalia se inicia com uma reclamação por parte de um grupo de consumidores. Estas reclamações são atendidas, pela concessionária, com os mesmos equipamentos aplicados no desenvolvimento desta tese.

observa a aplicação dos detectores para a definição de um procedimento apto a fornecer indicações sobre a existência de isoladores em estado de pré-falha, na LADMT.

Pode-se notar neste trabalho de tese, o pequeno volume das referências bibliográficas. Isso se deve ao reduzido número de documentos relacionados ao tema específico: utilização de instrumentos detectores de ruídos sônicos e eletromagnéticos para inspeção de isoladores tipo pino em LADMT energizadas. Neste sentido, esta tese é uma contribuição importante para aumentar as referências bibliográficas, pois, sem dúvida alguma, atualmente há escassez de literatura sobre o assunto.

1.4 – Publicações

O projeto de pesquisa que originou esta tese foi desenvolvido pela concessionária AES Sul Distribuidora Gaúcha de Energia e o Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá. Durante o projeto foram produzidos vários documentos técnicos publicados conforme a seguir:

A – Publicações em congressos e seminários:

- 1) Oliveira, H. R. P.; Pelizan, F.; Campos, I. G.; **Lefort, C.**; de Salles, C.; Martinez, M. L. B.; Oliveira, R. G.; "The Evaluation of the Insulation of 15 kV – 25 kV Feeders and Procedures for Substitution of Damaged Units", ISEI 2006 – International Symposium on Electrical Insulation, Toronto; Canada.
- 2) Oliveira, H. R. P.; Pelizan, F.; Campos, I. G.; **Lefort, C.**; de Salles, C.; Martinez, M. L. B.; Oliveira, R. G.; "Avaliação do Isolamento de Alimentadores de Média Tensão", CIDEL 2006 - Buenos Aires; Argentina.
- 3) Oliveira, H. R. P.; Pelizan, F.; Campos, I.G.; **Lefort, C.**; de Salles, C.; Martinez, M. L. B.; Oliveira, R. G.; "Evaluation of the Insulation of 15 kV - 25 kV Feeders and Procedures for Substitution of Damaged Insulators", GROUND 2006 – International Conference on Grounding and Earth, Alagoas; Brasil.

- 4) Oliveira, H. R. P.; Pelizan, F.; Campos, I. G.; **Lefort, C.**; de Salles, C.; Martinez, M. L. B.; Oliveira, R. G.; “Técnicas de Inspeção de Isoladores Energizados e Reduções dos Desligamentos por Falhas de Isolação”, III CITENEL 2006 – Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, Florianópolis; Brasil.
- 5) Oliveira, H. R. P.; Pelizan, F.; Campos, I. G.; **Lefort, C.**; de Salles, C.; Martinez, M. L. B.; Oliveira, R. G.; “Inspeção de Campo de Isoladores para Circuitos de Média Tensão”, XVII SENDI 2006 – Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, Belo Horizonte; Brasil.
- 6) Oliveira, H. R. P.; Pelizan, F.; Campos, I. G.; **Lefort, C.**; de Salles, C.; Martinez, M. L. B.; Oliveira, R. G.; “Técnicas para Inspeção de Campo de Isoladores para Circuitos de Média Tensão”, XII ERIAC 2007 – Encontro Regional Ibero-Americano do CIGRE, Foz do Iguaçu; Brasil.
- 7) Oliveira, H. R. P.; Pelizan, F.; Campos, I. G.; **Lefort, C.**; de Salles, C.; Martinez, M. L. B.; Oliveira, R. G.; “Evaluation of the 15kV-25kV Feeders and Procedures for Substitution of Damage Insulators”, POWERTECH 2007 Lausanne; Suíça.
- 8) Oliveira, H. R. P.; Pelizan, F.; Campos, I. G.; **Lefort, C.**; de Salles, C.; Martinez, M. L. B.; Oliveira, R. G.; “Evaluation of the 15kV-25kV Feeders and Procedures for Substitution of Damage Units”, ICSD 2007 Winchester 2007, London; Inglaterra.
- 9) Oliveira, H. R. P.; Batista, E. L.; **Lefort, C.**; de Salles, C.; Martinez, M. L. B.; “Inspection of Pin Insulators in Distribution Medium Voltage Lines & Outage Reductions”, ISEI 2008 – International Symposium on Electrical Insulation, Vancouver; Canada.

1.5 – Estrutura da tese

Esta tese foi estruturada em cinco capítulos. A parte introdutória está no capítulo 1, onde se apresenta as premissas básicas que nortearam o desenvolvimento de todo o trabalho. Os demais capítulos abordam os fundamentos, as atividades, as análises e os resultados obtidos durante a pesquisa.

No capítulo 2 são apresentadas informações sobre as tecnologias associadas ao desenvolvimento da pesquisa. São discutidas as tecnologias para detecção de ruídos sônicos e eletromagnéticos. Encerra-se o capítulo com a apresentação de um procedimento para inspeção em LADMT.

O capítulo 3 apresenta as informações relativas às metodologias empregadas durante a pesquisa. Tanto as metodologias adotadas em campo, como as metodologias adotadas para as execuções dos ensaios em laboratório. Encerra-se o capítulo com a apresentação detalhada da base de dados obtida durante as atividades de campo e as atividades desenvolvidas no laboratório.

No capítulo 4 são expostas as análises feitas e os resultados obtidos durante a pesquisa. Apresentam-se e discutem-se as formas adotadas para o desenvolvimento das análises, os resultados obtidos na primeira parte e na segunda parte desta pesquisa, além dos resultados gerais do projeto de pesquisa. Encerra-se o capítulo com a apresentação dos resultados obtidos em um caso, a partir da aplicação das técnicas propostas.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões e contribuições. Apresentam-se as conclusões sobre: o tema-projeto de pesquisa, sobre a tese e sobre a pesquisa. Arrolam-se as contribuições deste trabalho de tese. Logo após, são oferecidas sugestões para pesquisas futuras. Encerra-se o capítulo com alguns comentários.

Além dos capítulos, acompanham esta tese dois anexos. Eles têm o propósito de oferecer informações adicionais. Também são utilizadas as notas de rodapé para oferecer ao leitor facilidades para esclarecer algumas expressões ou palavras usadas no texto principal.

•

Capítulo 2 – TECNOLOGIAS

Este capítulo apresenta as tecnologias utilizadas em campo, para inspeções não invasivas de um conjunto de LADMT-AR, na área da concessionária AES Sul Distribuidora Gaúcha de Energia. Primeiramente, será apresentada a tecnologia para a detecção de ruídos ultrassônicos, logo a seguir, a tecnologia para detecção de ruídos eletromagnéticos (RF). Também é apresentado um procedimento convencional de inspeção (termográficas), utilizado por outra concessionária.

2.1 – Introdução

Nesta pesquisa a unidade adotada para as medições de intensidades de nível de ruídos foi: dB(1 μ V)⁶, para indicar que o valor tomado por referência é igual a um microvolt. Os instrumentos detectores de ruídos que foram utilizados informam valores numéricos correspondentes a essa unidade.

Para ajustar a leitura indireta e o valor real, para utilização em campo do ruído em microvolts, foi levantado em laboratório um conjunto de correlações específicas. No entanto, essas não se mostraram adequadas para a aplicação em massa, durante os procedimentos de inspeção, sendo abandonadas sem que fosse perdida a denominação.

Assim, as leituras obtidas ao longo da pesquisa e apresentadas neste documento não possuem nenhuma correlação com os valores efetivos de ruídos como tradicionalmente obtidos em laboratório. São deste modo, somente referências para as equipes de manutenção, para compor análises rápidas em campo.

Existem três fenômenos elétricos básicos que podem ser detectados com equipamentos detectores de ruídos nas suas formas ultrassônica e de RF.

a) O arco elétrico:

⁶ Quando a intensidade de ruídos é causada por tensão ou corrente elétricas, calcula-se o valor da intensidade, em dB, através de: $X_{dB} = 20 \times \log_{10}(X/X_0)$. Nestes casos, é ainda usual adicionar uma letra ao final da unidade dB para indicar o valor e natureza da quantidade tomada por referência. Por exemplo: dBm, a referência é 1 miliwatt; dBu, a referência é 0,775 volt.

Esse fenômeno ocorre quando existe um fluxo de corrente elétrica através de espaçamentos em ar. Uma descarga atmosférica é um bom exemplo.

b) O efeito corona:

Esse fenômeno ocorre quando a gradiente de tensão na superfície de um condutor elétrico, como uma linha aérea de distribuição de alta tensão, excede o valor limite – conhecido por gradiente crítico. Deste modo, o ar ao redor dessa superfície se ioniza resultando em luz incandescente azul ou roxa.

c) O trilhamento:

Esse fenômeno ocorre quando existem descargas incompletas, de caráter repetitivo, sobre superfícies isolantes. Em materiais orgânicos, normalmente esse fenômeno resulta em caminhos condutores devido à degradação associada com descargas contínuas e erosão.

Portanto, uma linha aérea de distribuição de alta tensão na frequência de 60 Hz se torna uma geradora de ruídos em razão das presenças desses fenômenos em seus componentes. Nesses casos, os ruídos de RF e os ruídos ultrassônicos podem ser produzidos conforme a seguir.

A tensão através de um espaçamento aumenta até atingir o valor da tensão disruptiva no local – ruptura parcial do ar entre os eletrodos⁷. Quando isso acontece, a corrente flui através do espaçamento por um trajeto de plasma criado no processo de ruptura. Isto, por sua vez, causa uma baixa impedância temporária através do espaçamento, que permanece apenas até a extinção do arco. Uma vez que o arco é extinto, a tensão através do espaçamento começa a aumentar novamente, o que define a característica cíclica do processo.

Os fenômenos elétricos e sônicos ocorrem de forma simultânea. Em alguns casos, esses ruídos podem ser perceptíveis pelo ouvido humano, independentemente do tamanho do espaçamento ou da intensidade da corrente. Em outros casos, também podem ocorrer diferenças significativas entre os sons de diferentes fontes de ruídos.

⁷ Em um circuito elétrico, é o ponto de transição entre dois materiais diferentes sendo um deles, um metal.

Isso é possível se for observado com o auxílio de um aparelho de rádio AM, sintonizado em uma frequência não utilizada comercialmente. Esse fato caracteriza a possibilidade de se definir assinaturas de espectro de frequência para as diferentes fontes de ruídos existentes.

Os seguintes fatores afetam a intensidade da geração de ruídos nas linhas de média e alta tensão:

1) A chuva e a umidade:

A presença de chuva e umidade elevada afeta a geração de ruídos de duas formas distintas. Primeiro a presença de umidade permite o curto-circuito em alguns espaçamentos. Originalmente os que envolvem pequenas distâncias e deste modo aumentam a geração de descargas de baixa amplitude. Segundo, após o início das chuvas é necessária uma hora (ou um pouco mais) para que este processo se apresente como efetivo.

Deste modo, os ruídos associados a esse tipo de fenômeno podem permanecer durante períodos de tempo definidos, mesmo em condições de mau tempo. Por conseguinte, essas descargas reaparecem até que a umidade seja evaporada.

No entanto, à medida que alguns ruídos são praticamente eliminados pela presença de umidade, o mesmo não ocorre quando da presença de isoladores trincados ou perfurados. Enquanto secos, os isoladores podem ser considerados, na maioria das vezes, como isolantes, embora precários.

Após o início da chuva, ou ainda sob a influência de umidade elevada, a água penetra nas regiões danificadas e cria caminhos que passam a conduzir correntes de fuga elevadas, de forma cíclica, e pode gerar ruídos sônicos e de RF. Esse fenômeno permanece enquanto existir água sobre a superfície do isolador.

Conforme relatado por equipes de campo, após períodos de chuva, tem-se observado uma elevação do número de isoladores sob suspeita de falha.

2) O vento:

A pressão dos ventos nas cruzetas e condutores pode mudar a forma dos espaçamentos e influenciar os fenômenos de início e extinção de arcos. Estes fenômenos são secundários para o desenvolvimento dessa pesquisa, mas podem contribuir para a retirada de operação de isoladores em boas condições. Portanto devem ser objeto de avaliação cuidadosa quando das inspeções em campo.

3) A contaminação superficial:

A contaminação da superfície do isolador ocorre pela deposição de partículas suspensas no ar e trazidas pelo vento. Essas partículas podem ser o sal (maresia) ou outra substância originada de resíduos industriais e agrícolas. Essa contaminação poderá resultar na criação de caminhos condutores na superfície do isolador, com efeitos desastrosos para isoladores do tipo polimérico, que podem terminar em falhas com a presença de chamas.

O fenômeno é potencializado quando em presença de umidade e mitigado pelo próprio arco elétrico que aquece o material da contaminação, reduzindo a umidade. Tal processo poderá ser cíclico. Esses caminhos, por sua vez e de forma intermitente, resultarão em descargas de superfície, responsáveis por ruídos sônicos e de RF.

4) As fontes internas de ruídos:

As fontes internas de ruídos, como por exemplo, descargas internas em transformadores são, em princípio, eventos raros. No caso de transformadores, a atenuação pode dificultar o processo de detecção do defeito. O mesmo fenômeno pode ocorrer com para-raios. No entanto, a princípio, considera-se que esse fato possui impacto somente com relação às técnicas que trabalham com ultrassom.

2.2 – Detecção de ruídos sonoros

A tecnologia de detecção associadas aos ultrassons [16] está relacionada com as ondas sonoras que ocorrem acima da percepção do ouvido humano, conforme exposto no capítulo 1. A frequência máxima perceptível ao

ouvido humano, em média, é 16,5 kHz. Entretanto, há relatos de algumas pessoas que perceberam valores de até 21 kHz. A tecnologia de ultrassom trata de frequências acima de 20 kHz.

Uma vez que o ultrassom é um sinal de alta frequência, ele pode ser considerado como um sinal de ondas curtas. Desse modo suas propriedades são diferentes do som audível ou sons de baixa frequência. Também é necessário considerar que um som de baixa frequência demanda menos energia que um som de alta frequência, para se propagar por certa distância ao longo de uma linha aérea de distribuição. Esse fato implica que os instrumentos que trabalham com ultrassons devem ser usados em pequenas distâncias, da fonte de ruídos.

O sistema de inspeção ultrassônica utilizado nessa pesquisa converte as altas frequências recebidas pela antena (entre 20 kHz e 100 kHz), em uma faixa audível de frequência (entre 50 Hz e 3 kHz) e ainda amplifica o sinal. Nesse processo, a amplificação é importante dada às baixas amplitudes dos sinais de ultrassom. A Figura 2.1 mostra o modelo Ultra Probe 2000® em uso [9].



Figura 2.1 – Utilização em campo do detector de ultrassom

Fenômenos associados com as descargas elétricas – tais como, arcos elétricos e efeito corona – apresentam fortes componentes ultrassônicos o que permite que sejam detectados de maneira relativamente fácil. Assim, essas ocorrências podem ser localizadas por instrumentos detectores de ultrassom mesmo em ambientes com elevado nível de ruído de fundo e com bom grau de

direcionalidade. Este é um ponto importante no processo de localização de isoladores em estado de pré-falha.

No entanto, essa aplicação fica também condicionada ao modo de construção do equipamento (componente inspecionado). Por exemplo, quando aplicados em para-raios com centelhadores internos, existe o fenômeno de redução do nível de ruídos gerado internamente nos invólucros devido à presença das paredes de porcelana. Isso termina por impor dificuldades extras na utilização dos detectores de ultrassom para localizar para-raios em estado de pré-falha.

Embora teoricamente, os detectores de ultrassons possam ser utilizados em sistemas de baixa, média e alta tensão, a maioria das aplicações tende a ser em sistemas de média e alta tensão (em razão das energias envolvidas nestes sistemas). Quando ocorrem fugas de corrente através do isolamento das linhas de média e alta tensão, estes fenômenos causam distúrbios que resultam na geração de ondas sonoras ao redor dos pontos de atividade elétrica.

Tal ocorrência termina por gerar ruídos ultrassônicos no componente. Conexões elétricas ruins e isoladores em estado de pré-falha permitem o surgimento de fugas de corrente. Alguns exemplos são: isolador com perfuração e ocorrência de descargas nas superfícies condutora em conexões elétricas.

Em razão da frequência das linhas de potência ser de 60 Hz, a tensão passa por dois picos para cada ciclo (um positivo e um negativo) e cruza o valor zero duas vezes para cada ciclo. Isso resulta em 120 picos e 120 cruzamentos de zero, por segundo. Logo, os ruídos nas linhas seguem este padrão, geralmente ocorrendo em uma taxa de 120 surtos por segundo. Deste modo, ruídos audíveis, quando perceptíveis, são usualmente descritos como zumbidos ásperos ou “som de fritura”.

As fontes de ruídos elétricos que podem gerar ruídos ultrassônicos nas linhas aéreas de distribuição de energia elétrica são as mais diversas possíveis. Logo, é necessário definir, através da comparação de resultados de

ensaios de campo e de laboratório, a eficiência dos equipamentos e dos métodos de inspeção de campo.

Cada tipo de equipamento de ultrassom trabalha com faixas típicas de frequência. Desse modo, podem existir diferenças substanciais em termos de resultados de ensaios de campo. Esse fato deve ser objeto de cuidadosa análise quando da troca de sistemas de detecção de ruídos, em campo.

2.3 – Detecção de ruídos eletromagnéticos

As descargas elétricas geram ondas eletromagnéticas que causam interferências em RF no espectro de frequências de 1 MHz até 1 GHz, [12]. Alguns instrumentos detectores de RF são ajustáveis. Atualmente a prática de campo tem demonstrado que o ajuste de 40 MHz resulta em melhor detecção dessas interferências. É um valor discutível [14], mas é a melhor prática obtida depois de muitos experimentos realizados pelas principais concessionárias nacionais. De modo geral, diverge de algumas especificações técnicas de equipamentos para detecção, que recomendam frequências mais elevadas para a detecção deste fenômeno.

O uso do instrumento detector de RF pode ser bastante traiçoeiro, porque geralmente detecta qualquer tipo de interferência eletromagnética (ruído). Desde ruídos emitidos pelo pequeno motor de um eletrodoméstico até ruídos emitidos durante a operação do comutador sob carga de um regulador de tensão na subestação. Além disso, eles não são direcionais, principalmente na faixa de frequência de 40 MHz.

Entretanto, isso pode ser melhorado aumentando-se a frequência para o intervalo de 300 até 350 MHz [11]. Porém, nossa experiência de campo mostrou que isso não resulta em um aumento da eficiência de detecção de ruído em comparação com o instrumento detector de ruídos de ultrassom. Devido a isso foi evitado o ajuste em frequências acima de 330 MHz, ou mesmo a utilização de detectores projetados para operar de modo fixo (acima desta frequência). Os detectores com frequência fixa têm a vantagem de não exigirem atuações adicionais dos operadores em campo.

Por outro lado, os ruídos de baixas frequências podem se propagar através das linhas aéreas de distribuição de média e alta tensão por grandes distâncias, a partir da estrutura fonte [11]. Em alguns casos, por algumas dezenas de quilômetros, sendo este o problema apontado pelos fabricantes dos detectores, porém não verificado na prática desenvolvida em campo conforme reportado pelas equipes que avaliaram as LADMT-AR.

As frequências mais elevadas sofrem um rápido processo de atenuação durante sua propagação na linha aérea de distribuição. Portanto, os ruídos associados às frequências mais elevadas são detectados em estruturas mais próximas à estrutura que contém a fonte de ruídos.

Nas linhas aéreas de distribuição, a detecção de ruídos de RF associadas às descargas elétricas, com frequências entre 320 MHz e 340 MHz, indica que a fonte se encontra em uma região em torno de 3 ou 4 postes, conforme mostrado na Figura 2.2. A comparação dos níveis de ruídos – RF – entre os postes dessa região conduz o operador do instrumento detector até o poste fonte de ruídos.

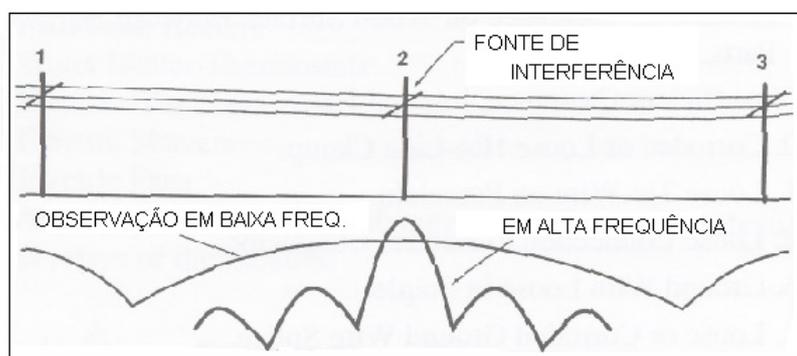


Figura 2.2 – Representação gráfica de ruídos em alta e baixa frequência [11]

Normalmente, a maior parte das ocorrências de RF nas LADMT está relacionada com a presença de fontes de descargas elétricas. Isso inclui isoladores de porcelana no estado de pré-falha e para-raios convencionais (de carboneto de silício) com descargas internas.

Existem vários tipos de instrumentos detectores de RF. Alguns possuem faixas de frequências fixas e espectro reduzido, e outros são aptos a trabalhar

em faixas de frequências mais amplas. Os primeiros são utilizados para detecção de distúrbios indicativos da existência de problemas de isolamento da linha. Esses modelos foram utilizados nesta pesquisa.

Os últimos são utilizados para definir a assinatura espectral do tipo do defeito. Entretanto, existe pouca literatura sobre o assunto. Logo, as técnicas associadas a esses detectores necessitam ainda serem desenvolvidas e comprovadas por ensaios em laboratório.

O mini localizador de RF consiste de um receptor sintonizável e de uma antena operando em uma faixa de frequência entre aproximadamente 320 MHz e 340 MHz. A Figura 2.3 mostra um detector de rádio frequência sintonizável utilizado nesta pesquisa. Trata-se de um mini localizador modelo M-330®, [15]. Esses equipamentos possuem poucos controles externos, o que facilita sua aplicação em campo.



Figura 2.3 – Utilização em campo do detector de RF

Virtualmente todos os ruídos observados nas linhas aéreas de distribuição, nas linhas de transmissão e em equipamentos – de média e alta tensão – são causados por descargas entre partes metálicas. Estando uma delas aterrada ou não. Essas descargas implicam na ruptura do ar na região entre dois eletrodos e no subsequente fluxo de corrente entre as partes condutoras envolvidas.

Os espaçamentos em ar podem estar associados à quebra ou perda de alguma parte da estrutura (sistema de isolamento), ou a um isolador em estado pré-falha por fratura ou perfuração, ou ainda, na região entre eletrodos

metálicos, como por exemplo, entre os eletrodos dos centelhadores de para-raios convencionais. Em alguns casos esses fenômenos também são relacionados com distâncias de isolamento insuficientes ou inadequadas nas estruturas.

Quando dois eletrodos metálicos não mantêm um bom contato elétrico, eles podem ficar submetidos a uma diferença de potencial. Dependendo da rigidez dielétrica do meio entre os eletrodos pode-se resultar em uma descarga elétrica, devido ao processo de ionização. A descarga tende a equalizar a diferença de potencial e o arco entra em extinção.

Uma vez que um trajeto ionizado é estabelecido na região entre os eletrodos, existirá um fluxo de corrente em todos os instantes do ciclo onde a tensão é superior à tensão disruptiva. Isso tipicamente ocorre para os picos positivo e negativo de tensão em uma onda senoidal pura, conforme mostra a Figura 2.4.

É conveniente ressaltar que não é necessário existir uma elevada diferença de potencial entre os eletrodos. No caso de pequenos espaçamentos em ar é possível gerar ruídos de RF quando ocorrer diferenças de potencial da ordem de 12 V. Nas linhas aéreas de distribuição é possível observar fontes de descargas elétricas e conseqüentemente fontes de ruídos em RF.

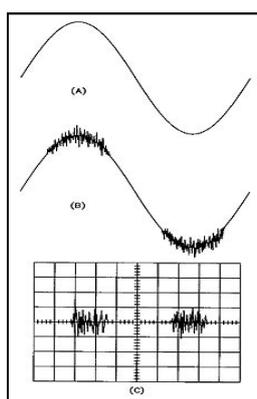


Figura 2.4 – Representação gráfica de ruídos de RF [11]

A seguir são listadas algumas fontes de descargas elétricas (ruídos):

- 1) Ferragens mal fixadas;

- 2) Amarrações ou conexões entre condutores inadequadas ou envelhecidas;
- 3) Amarração dos condutores nos isoladores inadequados ou envelhecidos;
- 4) Estais em contato com partes das mãos francesas;
- 5) Distâncias de isolamento insuficientes;
- 6) Anéis de fixação corroídos ou fixados de forma inadequada;
- 7) Isoladores de pino em estado de pré-falha;
- 8) Descargas nos centelhadores dos para-raios convencionais;
- 9) Presença de objetos estranhos na superfície dos condutores;
- 10) Conexão de neutro mal executada ou envelhecida.

Conforme foi possível observar, as fontes de ruídos nas linhas aéreas de distribuição são de natureza múltipla. Algumas, como por exemplo, conexões inadequadas entre condutores, podem ser também verificadas com a utilização de termovisores. Outras, como amarrações de condutores a isoladores inadequados, demandam uma técnica mais elaborada.

O sistema de detecção de RF (antena), baseado a partir do solo, detecta ruídos de uma forma genérica, ou seja, sinaliza que a estrutura apresenta um problema. Esse problema pode não estar associado à falha iminente, mas certamente a um estado de pré-falha em algum componente da estrutura, por exemplo, o isolador de porcelana do tipo pino.

A definição exata da fonte de ruídos necessita de técnicas e equipamentos complementares que fogem ao escopo desta tese, pois, de um modo geral, tais técnicas necessitam de equipamentos que trabalham com linha viva ou equipamentos mais sofisticados. Esse fato é considerado inadequado, pelo menos no presente momento de introdução da tecnologia. Essa ponderação se deve principalmente aos resultados otimistas obtidos com as inspeções de isoladores do tipo pino.

2.4 – A inspeção tradicional em linha aérea de distribuição

Para complementar este capítulo, apresentam-se os principais pontos de um procedimento para inspeção de linhas aéreas de distribuição de 15 kV e 34,5 kV, praticados em uma grande concessionária brasileira [17].

O procedimento consiste, basicamente, nas definições claras de critérios para as três etapas da inspeção. Os critérios gerais da inspeção, o planejamento da inspeção e a execução da inspeção.

No tocante aos critérios gerais da inspeção é relevante que:

- A inspeção objetiva identificar irregularidades e anomalias na linha de distribuição, que se não forem corrigidas a tempo, podem resultar em falha da linha e a consequente interrupção do transporte de energia elétrica;
- As inspeções se dividem em dois tipos: visual e instrumental. Sendo que na inspeção visual podem ser adotados três métodos: simples, minucioso e de emergência;
- Todas as inspeções devem ser realizadas por duas pessoas treinadas para esta atividade;
- Na avaliação das condições das linhas de distribuição, a inspeção conduz ao estabelecimento das prioridades para execução da manutenção, utilizando o método de hierarquização das linhas;
- A hierarquização é estabelecida através de indicadores relacionados com o desempenho das linhas de distribuição, suas condições elétricas e mecânicas e a importância perante o mercado consumidor;
- O programa de inspeção visual deve ser elaborado com base na hierarquização das linhas de distribuição;
- A periodicidade das inspeções nas linhas varia de seis a doze meses, conforme as características geográficas de sua localização;
- O programa de inspeção instrumental deve ser elaborado considerando-se a hierarquização das linhas e o grau de incidência de falhas em: linhas submetidas a sobrecargas constantes; entrada em operação de novas redes, e incidências de falhas em conexões e emendas;

- Todas as peças sujeitas a apertos constituem pontos críticos a serem verificados, durante a inspeção, tais como: emendas, grampos, conectores, luvas, amarrações, terminais de chaves, buchas e equipamentos. Os componentes susceptíveis a pontos quentes, devem ser verificados durante a inspeção termográfica.

No tocante ao planejamento da inspeção é relevante que:

- Antes de se executar a inspeção nos circuitos, deve-se planejar o trabalho. Analisar as características da linha para servir de base para observações durante a inspeção, conforme o seguinte:
 - ✓ Trechos problemáticos;
 - ✓ Linha exclusiva, industrial ou residencial;
 - ✓ Trechos com incidência de vandalismo;
 - ✓ Padrão da linha (compacta ou convencional);
 - ✓ Necessidade e coordenação da proteção;
 - ✓ Realocação de chaves fusíveis (de transformadores ou de derivações);
 - ✓ Divisão de circuitos;
 - ✓ Quantidade de dispositivos de manobra;
 - ✓ Se há disponibilidade de recursos humanos, financeiros, contratuais e materiais, para a inspeção; quais os acessos ao local a ser inspecionado.
- Na divisa entre trechos rurais e urbanos devem ser instalados equipamentos de manobra ou proteção, sempre que possível.

No tocante a execução da inspeção é relevante que:

- Inspeção visual simples:

Para esse método de inspeção, deve ser inspecionado apenas o trecho do alimentador indicado como prioritário pelo planejamento da inspeção; o inspetor deve parar e anotar no formulário de inspeção, somente no poste que tem algum defeito de prioridade 1, e seguir o procedimento específico para a execução dessa inspeção.
- Inspeção visual minuciosa:

Deve-se inspecionar todo o alimentador, indicado pelo planejamento de inspeção, parar em todos os postes e anotar no formulário de inspeção os dados físicos do poste, da linha e os defeitos com prioridade 1, 2 ou 3, se houver; seguir o procedimento específico para a execução dessa inspeção.

- Inspeção visual de emergência:

Essa inspeção deve ser feita pelos inspetores da prontidão, orientados pelos controladores do COD (Centro de Operação da Distribuição), percorrendo o trecho por eles indicado, através das aberturas dos equipamentos; seguir o procedimento específico para a execução dessa inspeção.

- Inspeção instrumental (ou termográfica):

Para esse tipo de inspeção deve-se usar o aparelho termo visor sob a linha de distribuição pré-determinada pelo plano de inspeção específico. Deve ser realizada por 2 pessoas sendo uma que dirige o veículo e outra que monitora o aparelho; seguir o procedimento específico para a execução dessa inspeção.

No tocante ao preenchimento do formulário “Inspeção em redes aéreas de distribuição” é relevante que:

- Esse formulário tem por objetivo auxiliar as equipes de inspeção dos tipos simples e minuciosa no preenchimento dos dados coletados na inspeção, que pode ser de toda a linha de distribuição ou parte dela, conforme orientação prévia do programador da inspeção.

O procedimento acima detalhado pode ser tomado como representativo das práticas das demais concessionárias do país, resguardadas suas particularidades geográficas, uma vez que as premissas do procedimento advêm de documentos de órgãos nacionais (pioneiros) de coordenação da operação e manutenção do sistema elétrico brasileiro. São eles: o CODI e o CCON/SCOM. Esses órgãos foram extintos em 1996 e atualmente algumas das suas funções foram alocadas para o ONS, com sede na cidade do Rio de Janeiro.

Pode-se também notar que o procedimento descrito é mais um guia de recomendações do que a técnica instrumental utilizada para inspeções preditivas não invasivas, no caso, a termovisão. Essa é a prática adotada pelas concessionárias brasileiras do serviço público de energia elétrica.

O principal ponto em questão quando se aplicam tais procedimentos para a inspeção de isoladores é que resultados factíveis somente são obtidos quando os níveis de corrente de fuga são suficientemente elevados para produzir calor no componente, não obstante colocar em risco pessoal os transeuntes e equipes de manutenção, nas imediações do componente em pré-falha.

Assim a maioria dos problemas somente é detectada após alguma ocorrência ou falha dielétrica (desligamento). Ou seja, de forma quase sempre corretiva e não preditiva como se propõe neste trabalho.

2.5 – Conclusão

O presente capítulo procurou expor os fundamentos para a adoção de um procedimento alternativo para as inspeções preditivas não invasivas em LADMT-AR. Tal procedimento faz uso de instrumentos detectores de nível de ruídos de ultrassons e RF. Esses detectores são de baixo custo quando comparados com os instrumentos de termográficas.

•

Capítulo 3 – METODOLOGIAS E ENSAIOS

Este capítulo apresenta as metodologias aplicadas e ensaios realizados, tanto no tocante às atividades de campo, como também às atividades de laboratório. As atividades de laboratório foram realizadas no Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá. As atividades de campo foram executadas pela concessionária AES Sul Distribuidora Gaúcha de Energia, em sua rede de distribuição de média tensão.

3.1 – Introdução

Esta pesquisa teve por base a investigação e manipulação de cerca de 11.000 isoladores de porcelana do tipo pino, durante quatro anos. A primeira parte da pesquisa foi desenvolvida nos dois anos iniciais. A segunda parte foi desenvolvida, em seguida, nos dois anos finais.

Para se definir os locais da rede elétrica de onde os isoladores seriam removidos, foi necessário estabelecer critérios para seleção das LADMT-AR. Para a execução dos ensaios em laboratório, também foi preciso definir novos procedimentos, principalmente em razão do grande volume de isoladores. Além disso, foram necessárias algumas adaptações nas instalações do laboratório.

O grande volume de informações originadas em campo e produzidas em laboratório demandou a criação de dois programas (ferramentas) para bancos de dados. Tais ferramentas permitiram a criação de uma base de dados consistente para cadastramentos e análise dos dados.

Nos próximos itens serão detalhadas as atividades desenvolvidas em campo e as atividades desenvolvidas no laboratório de alta tensão. Finalizando-se com o detalhamento da base de dados.

3.2 – Ensaios em campo

As principais características da técnica de inspeção proposta nesta tese estão relacionadas a seguir:

- Não requer o desligamento da LADMT-AR;
- Baixo custo;
- Fácil manuseio dos instrumentos.

Para os ensaios de campo, inicialmente foram definidas as LADMT-AR, de onde os isoladores poderiam ser retirados. Os critérios para seleção e classificação do trecho⁸ foram definidos com base nas quantidades de ocorrências operacionais, em toda a rede elétrica da concessionária AES Sul, conforme se descreve abaixo:

- Ocorrências relacionadas às causas: isoladores, descargas atmosféricas, defeito transitório, causa desconhecida;
- Período de registro das ocorrências: anos 2003 e 2004;
- Trechos associados à chave com 10 aberturas anuais, pelo menos.

As quantidades de isoladores analisados na primeira parte da pesquisa (2004 e 2005) foram: 1.934 na classe 15 kV e 4.794 na classe 25 kV, totalizando 6.728 unidades. Esse número corresponde a um lote de um milhão de unidades, admitindo-se um erro de 5% nos resultados das análises, conforme tabela para determinação do tamanho da amostra [18].

Cabe ressaltar que o total de isoladores investigados durante a pesquisa foi de 11.482 unidades. Essa diferença de 4.754 unidades se deve à incorporação de mais 1.129 unidades de 15 kV e 3.625 unidades de 25 kV, correspondentes à segunda parte da pesquisa, ocorrida nos anos de 2006 e 2007.

Foram utilizadas técnicas de inspeções semelhantes nas duas partes da pesquisa. A principal diferença foi que na primeira parte não se considerou os fatores atmosféricos tais como: a temperatura ambiente, a umidade relativa do ar e a velocidade do vento.

A metodologia considerada para investigação dos locais onde deveria haver substituições de isoladores (na LADMT-AR energizada) partiu da

⁸ Termo utilizado para se referir a um segmento da LADMT. Existem dois tipos: aquele delimitado entre duas chaves seccionadoras ou aquele delimitado entre uma chave e o final da LADMT.

seguinte premissa: toda estrutura (poste) que indicar algum nível de ruído audível deve ser objeto de investigação mais detalhada.

A partir daí, os trechos de LADMT-AR foram inspecionados conforme os seguintes passos:

Primeiro: Inspeção do trecho com o instrumento M-240A®, de RF.

O instrumento foi fixado em um veículo – que se deslocou por estrada próxima ao trecho – e foi mantido direcionado para o trecho. Com isso, obteve-se um primeiro indicativo dos locais críticos, onde haveria estruturas com indícios de defeito.

Segundo: Inspeção de cada estrutura dos locais críticos, com o instrumento M-242® e/ou M-330®, ambos de RF.

Essas inspeções foram realizadas a partir do solo, em baixo da estrutura (poste), com a antena do instrumento direcionada para o topo da estrutura.

Terceiro: Inspeção de cada isolador com o instrumento M-250® ou UP-2000®, ambos de ultrassom.

As estruturas (postes) selecionadas no passo anterior foram confirmadas com o uso destes instrumentos, porque eles apresentaram a característica de detectar ruídos emitidos em uma determinada direção (direcionalidade). Feita a leitura final do nível de ruídos dos isoladores, os valores eram então anotados em formulário próprio. Também foram anotadas as informações referentes à localização do isolador na linha (o poste e a fase).

Na segunda parte da pesquisa, foram anotados também os valores dos fatores atmosféricos de temperatura ambiente, de umidade relativa do ar e de velocidade do vento, no local da estrutura. Posteriormente, todos os isoladores da estrutura foram substituídos por unidades novas.

Por ocasião das substituições dos isoladores em campo, foram observados os seguintes passos:

Quarto: Retiradas dos isoladores (do trecho).

As estruturas identificadas no passo anterior tiveram todos os seus isoladores substituídos por isoladores novos. Os isoladores retirados eram separados em dois grupos: o primeiro grupo contendo os isoladores que apresentaram ruídos durante a inspeção e o segundo grupo contendo os isoladores que não apresentaram ruídos.

Os isoladores retirados eram então identificados através de etiquetas presas no corpo da peça (unidade). Cada etiqueta continha as seguintes informações referentes ao isolador: nível de ruídos, localização da retirada (trecho, poste, fase, tipo da estrutura).

Na segunda parte da pesquisa, também foram informados os valores de: temperatura ambiente, umidade relativa do ar e velocidade do vento.

Quinto: Embalagem dos isoladores retirados.

Os isoladores retirados da rede elétrica conforme o quarto passo, foram embalados em papel-jornal e acondicionados em caixas de madeira. As etiquetas de identificação de cada isolador foram verificadas quanto à legibilidade dos valores bem como a integridade da etiqueta. Em caso de problemas, providências eram tomadas. As caixas foram identificadas conforme a região administrativa de origem, da concessionária AES Sul.

Sexto: Envio dos isoladores para o Laboratório de Alta Tensão.

As caixas contendo os isoladores embalados, conforme o quinto passo, foram enviadas ao Laboratório de Alta Tensão da Universidade de Federal de Itajubá. No laboratório os isoladores foram submetidos aos ensaios. A Figura 3.1 mostra alguns isoladores de 25 kV removidos da LADMT-AR.



Figura 3.1 – Isoladores removidos da linha

Os instrumentos utilizados para as medições em campo foram:

- 1) Sistema de monitoramento de temperatura, umidade e velocidade do vento: LM800® [19];
- 2) Sistema para detecção de ruídos em ultrassom: UP-2000® [9], M-250® e M-247B® [15];
- 3) Sistema para detecção de ruídos em RF: M-330®, M-240® e M-242A® [15].

3.3 – Ensaio em laboratório

Os detalhes mais específicos sobre a execução de ensaios em laboratório podem ser obtidos consultando-se as normas técnicas pertinentes [20] [21], padronizadas pela ABNT. O Anexo 3.1 mostra figuras normativas para os tipos de isoladores e ensaios.

O que se expõe neste item são as atividades que foram executadas em laboratório, bem como outras informações pertinentes. Algumas dessas informações foram obtidas a partir das normas, e as outras resultam de conhecimento próprio sobre o assunto.

Os ensaios elétricos têm por finalidade verificar quais os níveis de tensão que o isolador suporta, quando submetido a condições semelhantes àquelas que poderá funcionar, sem que se verifiquem descargas superficiais ou perfurações. No caso de descargas superficiais, avalia-se a resistência mecânica do isolador. No funcionamento normal (submetido à tensão de

serviço), podem surgir diferentes tensões de descargas superficial associadas às condições do ambiente (temperatura, umidade, depósitos salinos, etc.).

Entretanto, em princípio, importa conhecer o comportamento do isolador sob essas condições, uma vez que a capacidade de isolamento é afetada. Além desse ensaio é importante também conhecer o desempenho do isolador em face de outros tipos de sobretensão. Por exemplo, aquelas causadas por: chaveamento da LADMT e descargas atmosféricas.

A norma [21] estabelece três tipos de ensaio que devem ser aplicados aos isoladores cerâmicos. Esses ensaios devem ser realizados tendo em mente os propósitos dos mesmos. É incomum a necessidade de realização de todos os ensaios, para uma mesma finalidade. Os tipos de ensaios são:

- Ensaio tipo:

São destinados a conhecer as características elétricas do isolador em função da sua forma e dimensão. Esses ensaios são realizados apenas quando se cria ou altera um isolador. Destinam-se à verificação de características e sua correspondência com aquelas definidas no projeto do isolador.

- Ensaio de rotina:

São ensaios realizados individualmente e efetuados ainda na fábrica sobre a totalidade dos isoladores apresentados ao comprador. Destinam-se à eliminação das unidades defeituosas.

- Ensaio de recebimento:

São efetuados sobre alguns dos isoladores adquiridos, na presença do comprador. Com a implantação das atuais normas de qualidade, alguns desses ensaios tendem a desaparecer ou a ser realizados apenas em casos pontuais. Muitas empresas buscam serem empresas certificadas por institutos internacionais. Isso confere relativa credibilidade aos produtos fabricados.

No entanto, as empresas compradoras têm também mecanismos de controle sobre os produtos adquiridos. Mediante o fornecedor, o controle de recepção pode ser mais ou menos rigoroso.

A Tabela 3.1 mostra os tipos de ensaios, bem como os principais ensaios associados a cada grupo.

Tabela 3.1 – Classificação dos ensaios em isoladores cerâmicos

Classificação	Ensaio
Tipo	- Tensão suportável de impulso atmosférico, a seco.
	- Tensão suportável em frequência industrial, sob chuva.
	- Radio interferência
	- Perfuração sob impulso
	- Poluição artificial
	- Verificação das dimensões
Recebimento	- Ruptura mecânica
	- Verificação das dimensões
	- Inspeção visual
	- Ciclo térmico
	- Ruptura mecânica
	- Choque térmico
	- Perfuração sob impulso
	- Verificação da rosca
Rotina	- Porosidade
	- Zincagem
	- Inspeção visual
	- Ensaio elétrico

Durante a pesquisa os isoladores recebidos no Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá foram submetidos aos seguintes procedimentos e ensaios:

a) Inspeção visual:

Esses procedimentos consistiam de uma verificação cuidadosa de cada unidade, para identificar anomalias que pudessem causar falhas na operação do isolador quando em serviço. As anomalias (e classificação) mais comuns encontradas nos isoladores de porcelana foram:

- ✓ Fissura (anomalia leve): pequeno trecho de linha irregular, esbranquiçada e aleatória, na superfície do corpo do isolador, indicativo de início de uma futura trinca.
- ✓ Trinca (anomalia grave): pequena abertura na superfície do isolador, em forma de linha irregular, com profundidade indefinida, indicativa de perda de homogeneidade do material isolante da unidade. Entretanto, sua ocorrência ainda mantém as características mecânicas básicas da unidade (ela continua inteira). A ocorrência de trinca não impede que a unidade seja submetida aos ensaios elétricos.

- ✓ Lasca (anomalia grave): quando falta o material isolante em uma parte da unidade (isto é, falta um ou mais pedaço da peça). A extensão e a localização de uma lasca irão definir se o isolador poderá ser submetido aos ensaios elétricos. O principal critério adotado nesse caso foi: lascas iguais ou maiores que o correspondente a duas saias do isolador inviabilizam os ensaios elétricos, por isso a unidade deve ser descartada. A Figura 3.2 mostra isoladores com essa anomalia.
- ✓ Queima (anomalia grave): quando existe marca de carbonização severa na superfície da unidade, indicativa que a unidade suportou correntes de curto-circuito. A ocorrência de queima não impede que a unidade seja submetida aos ensaios elétricos.
- ✓ Poluição (anomalia leve): quando existem incrustações de materiais estranhos na superfície da unidade. A quantidade do material depositado e sua natureza (orgânica ou mineral) podem alterar significativamente as propriedades elétricas do isolador. Porém, não alteram suas propriedades mecânicas. A ocorrência de poluição não impede que a unidade seja submetida aos ensaios elétricos.
- ✓ Outras (anomalia leve): sob esse termo estão as anomalias que não comprometem o desempenho do isolador em serviço. Podem ocorrer mais de uma, simultaneamente. Todas estão localizadas na superfície da unidade. São exemplos: sujeira, alteração da cor (parcial ou total), pequenas áreas de rugosidade, pequenas deformidades entre saias e assimetria da peça. A ocorrência desse grupo não impede que a unidade seja submetida aos ensaios elétricos.

A unidade reprovada na inspeção visual não foi submetida aos ensaios elétricos. Ela foi descartada.



Figura 3.2 – Isoladores com anomalias

b) Tensão aplicada em frequência industrial, sob chuva:

Esse ensaio verifica a ocorrência de descargas disruptivas no isolador submetido ao ensaio. Ele está associado à falha na manufatura e/ou no material isolante utilizado no isolador, quando submetido a uma solicitação elétrica. Podem ocorrer descargas disruptivas não sustentadas, em que o objeto submetido ao ensaio é momentaneamente colocado em curto-circuito por um arco e a tensão entre os terminais é reduzida a zero ou próximo de zero.

Dependendo das características do circuito e do objeto submetido ao ensaio, pode ocorrer recuperação da rigidez dielétrica, permitindo que a tensão se restabeleça. A tensão deve ser aplicada e elevada continuamente até o limite estabelecido, mantida por um tempo ou até a ocorrência da descarga disruptiva no objeto submetido ao ensaio. O valor da tensão alcançado no instante que precede à ocorrência da descarga disruptiva e o tempo de aplicação da tensão deve ser registrado.

Os isoladores devem ser montados de modo a simular suas condições normais de uso. As recomendações de montagem estão indicadas na pagina 31 da norma [21]. O Anexo 3.2 contém os procedimentos e a montagem para execução desse ensaio.

O método de ensaio sob chuva tem por objetivo simular o efeito da chuva natural sobre a isolação externa. É um ensaio recomendado para todos os componentes do sistema elétrico, especialmente para aqueles que são expostos à chuva natural, em serviço.

O ensaio tem as seguintes características: o objeto submetido ao ensaio deve ser aspergido com água de resistividade e temperatura especificadas conforme Tabela 3.2, caindo na forma de gotículas dirigidas, de modo que as

componentes de precipitação horizontal e vertical sejam aproximadamente iguais.

Tabela 3.2 – Características da chuva artificial utilizada no ensaio

Característica	Unidades	Ensaio Padrão
1 - Precipitação média da componente vertical	mm/min	1.0 -2.0
2 - Precipitação média da componente horizontal	mm/ min	1.0 -2.0
3 - Limites para medições individuais	mm/min	±0.5
4- Temperatura da água coletada (ambiente)	°C	±15
5 - Resistividade da água coletada	Ω.m	100±15
6 - Tempo de aplicação da tensão de ensaio	S	60

As precipitações são medidas por um dispositivo de medição constituído por dois recipientes com coletores de abertura entre 100 cm² e 750 cm², um horizontal e outro vertical conforme mostra a Figura 3.3, a seguir:



Figura 3.3 – Dispositivo para medição dos componentes da chuva artificial

Feita a montagem para o ensaio aplica-se uma tensão em frequência industrial, recomendada nas normas para a classe de tensão do objeto sob ensaio (corrigida para as condições atmosféricas no local), da seguinte forma: começando com o valor da tensão igual à zero, vai-se aumentando gradualmente o valor da tensão até atingir o valor final estabelecido. Ao atingir o valor final, ele é mantido durante o tempo de um minuto.

Se durante o intervalo de tempo de ensaio, elevação e patamar de um minuto, não ocorrerem descargas elétricas sobre a superfície, o isolador é considerado aprovado no ensaio. Caso contrário, o isolador é considerado reprovado, sendo que o valor da tensão sob a qual ocorreu a ruptura deve ser anotado. Para efeito deste trabalho, após a aplicação do patamar de tensão no

caso de suportabilidade, a tensão foi elevada até ocorrer a disrupção, anotando-se o valor obtido, para fins de registro.

Esse ensaio tem por objetivo testar o isolador quando submetido aos esforços decorrentes das operações de manobra na rede elétrica. Essas operações são o fechamento ou a abertura da LADMT (através do acionamento de disjuntores, religadores ou chaves fusíveis). Tais manobras causam sobretensão na LADMT. A sobretensão, por sua vez, exerce esforço elétrico adicional nos isoladores, ao longo da linha.

Os valores típicos de tensão aplicada nesse ensaio são:

- Para a classe 15 kV: tensão de 34 kV;
- Para a classe 25 kV: tensão de 50 kV.

c) Tensão aplicada sob impulso íngreme, a seco.

Esse ensaio tem por objetivo submeter o isolador aos esforços causados por sobretensão muito elevada, como aquelas originadas por descargas atmosféricas.

O impulso íngreme de tensão se caracteriza por ter uma subida de tensão, definido em $1.000 \text{ kV}/\mu\text{s}$ [20]. Em laboratório se aplica tensão com forma de onda padronizada. A forma de onda produzida no laboratório consiste basicamente nos seguintes ajustes: o valor da tensão correspondente ao pico da onda, o valor do tempo de frente da onda e o valor do tempo de cauda.

A forma padronizada na normalização nacional para ensaios de impulso é $1,2/50 \mu\text{s}$. O valor da tensão associada ao tempo de frente (1,2) e o valor da tensão associada ao tempo de cauda (50) são monitorados.

Para a execução do ensaio, o isolador é colocado no ponto de aplicação do gerador de impulsos (equipamento capaz de produzir a forma de onda da tensão). No laboratório em questão, o ponto de aplicação é feito em uma cruzeta de madeira montada no topo de um poste de 2,2 m. A norma [20] fornece mais detalhes sobre a montagem desse ensaio.

Ficou constatado que quase a totalidade dos isoladores submetidos a esse ensaio foi aprovada. Por isso, após criteriosa avaliação, esse ensaio deixou de ser aplicado aos isoladores por se concluir que os valores de tensão

necessários para esse ensaio ultrapassam a limitação do gerador de impulsos e que seus resultados, se obtidos, seriam insignificantes para os propósitos da pesquisa (investigação de fontes de ruídos).

Esse ensaio simula a situação em que o isolador é submetido aos esforços decorrentes de descargas diretas incidindo nas linhas aéreas de distribuição, em trechos próximos aos isoladores. As descargas causadas por descargas atmosféricas incidentes nas proximidades (até 15 m do eixo da linha) são menos severas.

3.4 – A base de dados

A recepção e o acondicionamento dos isoladores recebidos no Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá – juntamente com suas informações de campo (etiquetas) – constituíram-se em desafios adicionais, em razão da grande quantidade de isoladores.

No início da pesquisa (primeiro ano), as informações foram cadastradas em planilhas tipo Excel[®]. Logo se notou o grande volume de informações a serem cadastradas e manipuladas posteriormente. Então, identificou-se a necessidade de reavaliar a forma do cadastramento.

O maior problema para a pesquisa seria a baixa qualidade dos dados cadastrados (de campo e de laboratório). A ocorrência de falhas na coleta e cadastro das informações pode significar em redução na qualidade das avaliações, com resultados indesejáveis ao final de todo o tempo decorrido nessa atividade.

O comprometimento das equipes de campo é outro ponto de suma importância. Observou-se que a utilização das unidades de manutenção próprias (embora positiva no sentido de prover treinamento para aplicação futura), acabou por criar resistências. Isso ofereceu impacto na qualidade das amostras enviadas ao laboratório para análises e ensaios.

A alternativa foi criar uma ferramenta mais adequada para a formação de base de dados padronizada, que permitisse os acessos também por rede de

computadores (e que também permitisse a migração das informações já cadastradas em Excel[®]).

O programa escolhido para o desenvolvimento de tal ferramenta foi o Access^{® 9}, devido a sua compatibilidade com o Excel[®] além de outras vantagens. Assim, para tornar mais eficiente o cadastramento das informações, foram observadas as técnicas próprias de banco de dados relacionais, que evitam duplicidades da informação bem como asseguram seu registro único por toda a base de dados.

No SCI-1 foram registrados os dados correspondentes às informações vindas de campo. Essas informações chegavam anotadas em etiqueta de papel, padronizada, presa ao corpo da unidade (isolador). Cada etiqueta continha as seguintes informações:

- Nome do time¹⁰: nome da regional;
- Código da chave do trecho do alimentador: composto por 3 letras e 4 números;
- Tipo da estrutura do poste: se linha trifásica ou bifásica horizontal/vertical ou monofásica;
- Posição da estrutura em relação ao poste que contém a chave do trecho (atribuído o número zero): valor numérico sequencial, contado a partir da chave do trecho;
- Posição do isolador na estrutura: se fase A, ou fase B, ou fase C;
- Característica do terreno onde se encontra a estrutura (poste): planície ou serra;
- Classe de tensão do trecho: se 15 kV ou 25 kV;
- Valor do nível de ruídos medido, em dB (1 μ V): 0 ou 5 ou 15 ou 30 ou 50 ou maior.

A etapa de cadastramento das informações tinha início gerando-se e imprimindo-se, a partir do SGI-1, um formulário tamanho A4 contendo 12 fichas

⁹ Esse *software* é mais adequado para criação e manutenção de banco de dados.

¹⁰ Time é uma palavra usada no âmbito da AES Sul Distribuidora Gaúcha de Energia, para identificação da unidade regional responsável pela administração da rede elétrica, naquela área geográfica.

em branco. A seguir, era feito o preenchimento dos campos de cada ficha, com as informações da etiqueta do isolador, pois, cada ficha no formulário corresponde aos dados de um isolador.

A Figura 3.4 mostra fichas preenchidas, cada ficha possui um número único (o campo Item) gerado pelo próprio sistema SCI-1. Isso evitava a ocorrência de duplicidade na identificação do isolador. Também eram anotadas em cada ficha informações próprias da unidade (isolador), tais como:

- Nome do fabricante;
- Ano de fabricação.

O número Item (único) da ficha era então escrito, com caneta apropriada, no corpo do isolador e a ficha encaminhada para digitação dos dados no sistema SCI-1.

Item	Fabricante	Ano	Cód.Chave	Posição	Localização	Construção	kVclasse	TIME (de origem)	Ultra
4443 Lote 7	CST	2001	SFR 893	316 D	rural/plancie	3F hor	25	Santiago	15
Inspeção visual: Bom		Suportabilidade - kV sob chuva: Sim		Valor kVrrompimento60Hz: 85,7					
TipoAvaria:		Observação:		Código PALM:					
4444 Lote 7	CST	2001	SFR 893	316 E	rural/plancie	3F hor	25	Santiago	15
Inspeção visual: Bom		Suportabilidade - kV sob chuva: Sim		Valor kVrrompimento60Hz: 84,3					
TipoAvaria:		Observação:		Código PALM:					
4445 Lote 7	CST	2001	SFR 893	316 C	rural/plancie	3F hor	25	Santiago	15
Inspeção visual: Bom		Suportabilidade - kV sob chuva: Não		Valor kVrrompimento60Hz: 75,1					
TipoAvaria:		Observação:		Código PALM:					
4446 Lote 7	Santana	1985	SFR 893	317 C	rural/plancie	3F hor	25	Santiago	15

Figura 3.4 – Três fichas completas de isoladores no sistema SCI-1

Por consequência do acompanhamento permanente das atividades da pesquisa, foram identificados problemas nos procedimentos de coleta de informações em campo, transporte das peças e dificuldade de leitura das informações em algumas etiquetas (presa ao isolador). De modo que estavam afetando a qualidade dos dados cadastrados.

Foi então reavaliado o procedimento até então adotado. Como resultado das discussões, implantou-se um novo procedimento, conforme abaixo:

- 1) Cada equipe de campo passou a dispor de um instrumento minicomputador do tipo PDA para cadastramento, *in loco*, das informações coletadas junto a cada estrutura (poste).

- 2) As informações cadastradas no PDA eram as mesmas que até então se anotava na etiqueta (em papel) que acompanhava cada isolador. Foi acrescentado um campo para indicar o número do time.
- 3) Cada isolador cadastrado no PDA recebia um número denominado Identificador, com 14 dígitos. Por exemplo: 02CPS3048015C. Esse identificador era gerado pelo PDA e obedecia à seguinte regra:
 - ✓ Os 2 primeiros dígitos: número do time;
 - ✓ Os 7 dígitos seguintes: código da chave do trecho;
 - ✓ Os 5 dígitos seguintes: número sequencial;
 - ✓ E o último dígito: letra (correspondente à posição do isolador na estrutura).
- 4) O número identificador correspondente era então anotado no corpo do isolador. Desse modo cada isolador passou a conter apenas um identificador ao invés da etiqueta de papel presa a ele.
- 5) Após o cadastramento de uma quantidade de trechos, o instrumento PDA era encaminhado para o escritório para ser descarregado para um microcomputador, o arquivo do tipo DBT (extensão criada especialmente para esse propósito).
- 6) Os arquivos DBT eram então enviados por e-mail para o Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá.
- 7) Os isoladores, devidamente identificados, eram enviados para o Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá.

O programa implantado no PDA foi desenvolvido na linguagem BASIC, no Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá. O programa do PDA manteve a compatibilidade de seus campos com os campos existentes do sistema SCI-1. A Figura 3.5 mostra uma interface semelhante àquela implantada no instrumento PDA.

The screenshot shows a PDA application window titled "Cadastro - Inspeções" with a red header bar containing the word "ISOLADORES" and a "Nr.Grupo:" field. Below the header are several input fields: "Time:" (a dropdown menu), "Chave:" (a text field), "Nr.SE:" (a text field), "Nr.AL:" (a text field), "KVn:" (a text field), and "Qt.Fases:" (a text field). A section titled "CIDADES inspecionados no Trecho:" contains a table with the following structure:

Posição:	Local	Montagem	Fabricante	Falha?		
				E	C	D

Below the table are buttons for "Anterior", "Salvar", and "Próximo". At the very bottom, a status bar indicates "Record: 1 of 1".

Figura 3.5 – Interface semelhante à tela de entrada no PDA

Com a implantação do novo procedimento de campo para coleta de informações, tornou-se necessário fazer a revisão em alguns módulos da ferramenta SCI-1.

O primeiro módulo modificado foi aquele responsável pela geração de fichas cadastrais, pois, na etapa de recebimento do isolador, era suficiente coletar as seguintes informações:

- Número identificador (gerado pelo PDA);
- Nome do fabricante;
- Ano de fabricação e;
- Estado geral do isolador (inspeção visual da peça).

As demais informações do isolador eram então obtidas a partir dos arquivos DBT. Para pesquisar nesse arquivo as demais informações de um isolador, usava-se o número identificador para localização do registro correspondente. Como consequência dessa modificação, os demais módulos da ferramenta SCI-1 também foram modificados.

Mesmo com a utilização desse novo procedimento, observaram-se ainda falhas nos processos de coleta de dados em campo, que por sua vez, passavam pelo envolvimento coletivo. Algo extremamente difícil de obter com o formato de investigação de campo previsto nesta pesquisa. Portanto, sugere-se que o procedimento seja modificado em qualquer outra iniciativa deste porte e objetivo.

Por outro lado, o projeto de pesquisa também iniciava uma nova fase. Começava-se a segunda parte da pesquisa (terceiro e quarto anos). Além das informações investigadas na primeira parte, também se iniciaram as investigações das influências dos fatores atmosféricos (temperatura ambiente, umidade relativa do ar e velocidade do vento) nas medições de ruídos feitas em campo. Isso também suscitou mais modificações na ferramenta SCI-1.

Por isso, foi criada uma nova ferramenta semelhante àquela utilizada na primeira parte da pesquisa. A nova ferramenta incorporava todas as modificações introduzidas pelo uso dos instrumentos PDA e também aquelas decorrentes das investigações da segunda parte da pesquisa. Essa nova ferramenta foi identificada por SCI-2. A Figura 3.6 mostra sua tela inicial.



Figura 3.6 – Interface principal do sistema SCI-2

No sistema SCI-2 o formulário para cadastramento de isoladores foi modificado. A Figura 3.7 mostra uma parte de uma folha-formulário contendo sete fichas de isoladores.

ISOLADORES - FICHA CADASTRAL DE UNIDADES						
Item	Identificador	Fabricante	A n o	Inspecão	Avaria	Observação
29 Lote 1	2 cps 304 8001 d	São José	1979	avariado	Esm.Sup.	ESTRUTURA T2
30 Lote 1	2 cps 304 8001 e	São José	1979	avariado	Esm.Sup.	10 C /
31 Lote 1	2 cps 304 8016 e	Germer	1991	avariado	Esm.Sup.	16 E /
32 Lote 1	2 cps 304 8007 c	Sta Terezinha	1979	avariado	Esm.Sup.	0
33 Lote 1	2 cps 304 8020 d	Sta Terezinha	1979	avariado	Esm.Sup.	20 C /
34 Lote 1	2 cps 304 8010 c	São José	1979	avariado	Esm.Sup.	10 C /
35 Lote 1	2 cps 304 8001 c	São José	1979	avariado	Esm.Sup.	ESTRUTURA T2

Figura 3.7 – Fichas de isoladores geradas pelo sistema SCI-2

Nesta segunda parte da pesquisa foram aperfeiçoados alguns dos procedimentos criados na primeira parte e criados novos procedimentos. Por exemplo, no tocante ao cadastramento das informações no sistema SCI-2, foi possível agrupar os procedimentos em três etapas, conforme a seguir:

Etapa 1 – Recebimento dos isoladores

Nessa etapa os isoladores eram retirados das caixas e submetidos à inspeção visual. Em seguida eram feitas anotações em formulários próprios, compatíveis com o SCI-2, das seguintes informações:

- Número do lote: número atribuído pelo SGI-2 para identificação da remessa do grupo de isoladores recebidos pelo Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá;
- Identificador do isolador: código anotado no corpo da peça. Corresponde àquele que foi gerado pelo instrumento PDA em campo;
- Nome do fabricante: nome/símbolo gravado no corpo da peça, indicando o fabricante do isolador;
- Ano de fabricação: número gravado no corpo da peça, indicando o ano que o isolador foi produzido;
- Avaria (inspeção visual): avaliação e classificação do isolador conforme abaixo:
 - ✓ Bom: quando a unidade não apresentava anomalias ou apresentava uma ou mais anomalias leves;
 - ✓ Ruim: quando a unidade apresentava uma ou mais anomalias graves, tais como trinca, lasca ou queima;
 - ✓ Danificado: quando a unidade não tinha condições para ser submetida aos ensaios elétricos. Geralmente porque a unidade possuía metade ou menos do corpo da peça.

Os isoladores bons ou ruins foram submetidos aos ensaios elétricos.

Na sequência, era anotado no corpo do isolador o número (Item). A partir daí, a unidade passava a ter uma identificação única dentro das instalações do Laboratório de Alta Tensão. Esse código era obtido do próprio formulário e transcrito para o corpo do isolador.

Tal anotação era feita com caneta especial para não ocorrer danos ao código durante o manuseio da unidade nas etapas seguintes, dentro do laboratório. O número gerado pelo próprio SCI-2 era único em todo o banco de dados, permitindo posteriormente a identificação específica da unidade. Com isso se concluiu a coleta e registro das informações do isolador naquela ficha.

Após o preenchimento de algumas folhas-formulário, elas eram encaminhadas para a digitação das informações no SCI-2 (opção: cadastro). Cada folha-formulário permitia anotar informações de 25 isoladores. Essas folhas eram descartadas após as utilizações. A Figura 3.8 mostra a tela de cadastramento do SCI-2.

Item	Fabricante	Ano	Identificador	Inspeção	Avaria	kVrede	Ch.trecho	Poste	Fase	Localização	Construção
28	Germer	1990	2 cps 304 8012 d	avariado	Lascado	13.8	CPS - 3048	12		Urbano	- Horizont
29	São José	1979	2 cps 304 8001 d	avariado	Esm.Sup.	13.8	CPS - 3048	1		Urbano	- Horizont
30	São José	1979	2 cps 304 8001 e	avariado	Esm.Sup.	13.8	CPS - 3048	1		Urbano	- Horizont
31	Germer	1991	2 cps 304 8016 e	avariado	Esm.Sup.	13.8	CPS - 3048	16		Urbano	- Horizont
32	Sta Terezinha	1979	2 cps 304 8007 d	avariado	Esm.Sup.	13.8	CPS - 3048	7		Urbano	- Horizont
33	Sta Terezinha	1979	2 cps 304 8020 d	avariado	Esm.Sup.	13.8	CPS - 3048	20		Urbano	- Horizont

Obs: 1. Para INCLUIR registro, clique no botão indicado com * no navegador de registros, abaixo.
 2. Para ALTERAR informações de um registro, clique duas vezes sobre o campo a ser alterado.
 3. Para EXCLUIR um registro, clique sobre o indicador do registro correspondente (lado esquerdo) e pressione a tecla DEL, ou use o menu Editar.

Figura 3.8 – Interface para o cadastramento inicial no sistema SCI-2

Finalizando essa etapa, os isoladores eram transferidos para outro local dentro do Laboratório de Alta Tensão e acondicionados devidamente, para serem submetidos aos ensaios elétricos da próxima etapa.

Etapa 2 – Execução dos ensaios elétricos

Nessa etapa os isoladores eram preparados para serem submetidos aos ensaios elétricos. Inicialmente se buscavam identificar nas prateleiras de armazenamentos aquelas unidades que ali estavam por mais tempo (com base no lote de recebimento e código identificador da unidade). As unidades que estavam armazenadas por mais tempo eram as primeiras escolhidas para serem submetidas aos ensaios.

Os isoladores assim selecionados eram separados por classe de tensão. Em seguida se formavam grupos de 25 unidades, denominado Bateria. Essa quantidade foi definida em razão da produtividade apresentada pelos executores dos ensaios (alunos estagiários do curso de engenharia elétrica), bem como suas cargas horárias diárias de estágios.

Tal providência foi adotada para assegurar que os ensaios realizados em cada bateria fossem executados pelo mesmo estagiário (ou a mesma equipe de estagiários) e assim criar uma situação que permitisse obter a melhor qualidade nas execuções dos ensaios elétricos. Os isoladores foram submetidos aos seguintes ensaios elétricos:

- Ensaio de tensão aplicada em frequência industrial, sob chuva;
- Ensaio de tensão aplicada de impulso íngreme, a seco.

Para mais detalhes sobre os ensaios acima, consultar o item 3.3 neste capítulo. Os resultados dos ensaios executados foram anotados em formulário próprio gerado pelo SCI-2. Nesse formulário foram feitas as seguintes anotações, para cada ensaio:

- Item: número anotado no corpo do isolador;
- Lote: número do lote de recebimento, anotado no corpo do isolador;
- Suportabilidade (sob chuva): sim ou não;
- KVruptura: valor da tensão a qual ocorreu a ruptura, quando aplicável;

A Figura 3.9 mostra um exemplar do formulário utilizado para anotação dos resultados dos ensaios. Os demais campos são deixados em branco, uma vez que alguns deles já se encontravam cadastrados SCI-2.

esse período os formulários eram descartados. A Figura 3.10 mostra uma interface da ferramenta SCI-2 exibindo todos os dados cadastrados na base de dados para o isolador de número 30. As etapas descritas anteriormente foram mantidas até o final da pesquisa.

The screenshot displays the 'ISOLADORES: Cadastro de Medidas' window. It features a search bar at the top with 'Item' set to 30. Below is a table listing several insulator records. The record for item 30 is highlighted. To the right, a '... informações' panel provides detailed data for item 30.

Item	Fabricante	Ano	KVrede	Inspecção	Avaria	Outras...
29	SÃO JOSÉ	1979	13.8	avariado	Esm.Sup.	>>>
30	SÃO JOSÉ	1979	13.8	avariado	Esm.Sup.	>>>
31	GERNER	1991	13.8	avariado	Esm.Sup.	>>>
32	STA TEREZINHA	1979	13.8	avariado	Esm.Sup.	>>>
33	STA TEREZINHA	1979	13.8	avariado	Esm.Sup.	>>>
34	SÃO JOSÉ	1979	13.8	avariado	Esm.Sup.	>>>
35	SÃO JOSÉ	1979	13.8	avariado	Esm.Sup.	>>>

... informações	
Item:	30
Identificador:	2 cps 304 8001
ChaveTreacho:	CPS - 3048
Poste:	1
Fase:	
Localizacao:	Urbano
Construcao:	ZF - Horizontal
Temp.[grC]:	0
Umidade(%):	0
Vento[km/h]:	0
ArqEspectro:	0
Tipo:	
Falhou:	
Substituiu:	1
dBUltra:	5
dBRadio:	0
dBBastao:	0
Time:	Caçapava do Sul
Obs:	10 C /

Obs: 1. Para busca, informe a Unidade (número do Item ou do Identificador) e tecla <Enter>.
 2. Clique duas vezes sobre o campo a ser alterado.
 3. Informe os valores.... Para finalizar, clique em outro registro.

Figura 3.10 – Todas as informações do isolador número 30

Por fim, cabe informar que os detalhes construtivos da ferramenta SCI-2 são bem semelhantes aos da ferramenta SCI-1, uma vez que foram desenvolvidas a partir do mesmo *software*. As diferenças estão mais relacionadas com adaptações na base de dados, do que com as funcionalidades da ferramenta, propriamente dita.

Capítulo 4 – ANÁLISES E RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir das análises feitas sobre a base de dados formada durante o desenvolvimento desta pesquisa, além de mostrar a sistemática adotada para realização das diversas análises. Gráficos são utilizados para auxiliar nas análises. Por fim, são apresentados os resultados obtidos a partir da aplicação das técnicas propostas. Trata-se de um primeiro caso o qual foi possível acompanhar ainda durante o projeto de pesquisa.

4.1 – Introdução

Na medida em que a base de dados evoluía no tamanho, eram realizadas análises periódicas para verificação de tendências. Essas análises, basicamente, buscaram identificar quais as relações existentes para os acertos e os erros ao se comparar os níveis de ruídos medidos em campo e os resultados obtidos a partir dos ensaios de laboratório.

Assim, para se efetuar uma análise global da base de dados foram inicialmente estabelecidas duas abordagens distintas. Uma para analisar as informações contidas nos níveis de ruídos medidos em campo e a outra para analisar os valores obtidos a partir dos ensaios realizados com os isoladores em laboratório.

A confrontação de tais análises permitiu estabelecer a melhor forma para as análises conclusivas sobre a base de dados. As exposições das análises bem como a exposição dos resultados, são feitas conforme a seguir.

4.2 – As análises

Inicialmente foram estabelecidos alguns procedimentos para agrupar as informações da base de dados. Em relação às informações de níveis de ruídos medidos para cada isolador, foram definidos inicialmente valores de referência, em dB(1 μ V).

Ressalta-se que a nomenclatura dB (1 μ V) não representa o real nível de ruído em campo. Entretanto, durante a pesquisa de campo optou-se por não forçar tal correlação, uma vez que se observou pouco incentivo nas equipes de inspeção.

Logo após o recebimento em laboratório das primeiras amostras e os comentários das equipes de campo, foi constatada a necessidade de se estabelecer valores de referência. Tal providência permitiu melhorar a qualidade das informações originadas nas inspeções em campo.

Deste modo, foram definidos cinco faixas de referência, identificadas por seus valores iniciais: 0, 5, 15, 30 e 50 dB (1 μ V). Esses valores foram mantidos durante os três anos finais da pesquisa, que teve duração total de quatro anos. Isso permitiu agrupar os isoladores nas faixas de referência conforme seus níveis de ruídos, obtidos nos ensaios em campo.

Devido a esse agrupamento, os dados apresentados neste texto diferem ligeiramente daqueles publicados ao longo do desenvolvimento desta pesquisa (na forma de artigos técnicos). Isso, no entanto, não afeta os resultados, as conclusões e recomendações.

Quanto às informações dos ensaios de laboratório, foram criados dois grupos de isoladores. O primeiro grupo correspondendo aos isoladores que passaram nos ensaios de laboratório, portanto considerados em boas condições de operação. Essas unidades receberam a identificação genérica de Aprovada. O segundo grupo correspondendo aos isoladores que não passaram nos ensaios de laboratório, portanto considerados sem condições de operação. Essas unidades receberam a identificação genérica de Reprovada.

Foi definido o agrupamento dos isoladores pela sua classe de tensão de 15 kV ou 25 kV. Criou-se também um agrupamento sem a distinção da classe de tensão. Deste modo foram criados 15 grupos de isoladores para se efetuar as análises.

Essa sistemática para análise foi adotada durante todo o projeto de pesquisa (quatro anos). Nesse período foram analisados exatos 11.482 isoladores. Entretanto, de acordo com a evolução da pesquisa que se

constituiu de duas partes, a base de dados foi também dividida em duas partes. Na primeira parte foram definidos métodos e verificado as alternativas de aplicação das ferramentas obtidas na inspeção dos isoladores em campo. Na segunda parte, foram consideradas as influências das condições atmosféricas nas medições de nível de ruídos.

Por sua vez, os resultados das inspeções de campo e os resultados dos ensaios em laboratório foram analisados sob duas maneiras.

A primeira contemplou todos os isoladores retirados de campo, sem distinção da classe de tensão, de modo a definir os índices de eficiência das ferramentas – detectores escolhidos. Essa análise, para ser eficaz em termos de engenharia, necessita ter como base o compromisso entre os níveis de eficiência (determinados pela análise dos dados de campo e laboratório), e o número de isoladores em condição de pré-falha que permaneceriam instalados em campo. Deste modo, definiu-se para os limites/faixas de ruídos previamente escolhidos, o limiar de ruídos recomendado para detecção de isoladores em condição de pré-falha, a ser utilizado nas inspeções de campo.

A segunda considerou dois universos de amostras. O primeiro destes universos é definido pelo número de isoladores que não suportaram as solicitações de ensaios de laboratório (superiores às existentes em campo), ou seja, o universo de interesse. Em tese, os isoladores que supostamente desenvolvem um processo de evolução para falha dielétrica completa (isoladores em condição pré-falha). O outro universo é definido pelo número de isoladores que suportam as solicitações impostas pelos ensaios de laboratório (que para efeitos desta pesquisa foram removidos de campo por uma questão de estética visual do poste). É de fato, um conjunto complementar de isoladores que não seria removido por razões de engenharia, ou seja, isoladores supostamente são.

Foram levantados índices de acertos e erros das ferramentas, levando-se em conta as duas maneiras de análises. O índices foram obtidos em função das variações dos limites para os níveis de ruídos, considerando ou não os fatores atmosféricos, bem como as classes de tensão de 15 kV e 25 kV.

O detector de ultrassons foi o equipamento adotado preferencialmente pelas equipes de campo dado a sua direcionalidade e a facilidade de seu uso. Essa foi uma tendência irreversível ditada pelas características operacionais do detector utilizado. É conveniente ressaltar que é uma tendência a ser mantida, principalmente quando se observa que existem dispositivos de mais fácil manuseio.

Uma das dificuldades encontradas neste tipo de pesquisa é a necessidade e a urgência na solução de problemas pelas equipes de campo que quando detectam a possibilidade de trabalhar com uma ferramenta que lhes provém facilidades não as abandonam.

4.3 – Os resultados

São expostos a seguir os resultados obtidos na primeira e na segunda parte da pesquisa bem como aqueles obtidos a partir das análises gerais durante o desenvolvimento de toda a pesquisa.

4.3.1 – Da primeira parte

Essa parte corresponde ao primeiro e segundo ano do projeto de pesquisa. Ela ficou assim caracterizada pelo fato de não ser levada em consideração a influência dos fatores atmosféricos durante a retirada dos isoladores da LADMT-AR.

Foi analisada e determinada a eficiência dos métodos para a aplicação dos detectores em campo. E ainda, confirmada sua escolha através de ensaios em laboratório. Nessa ocasião também foram desenvolvidos e propostos métodos para inspeção em campo.

A Figura 4.1 mostra a curva de permanência em relação aos níveis de ruídos de referência, para essa base de dados. As medições de nível de ruídos dos isoladores foram agrupadas de acordo com esses níveis.

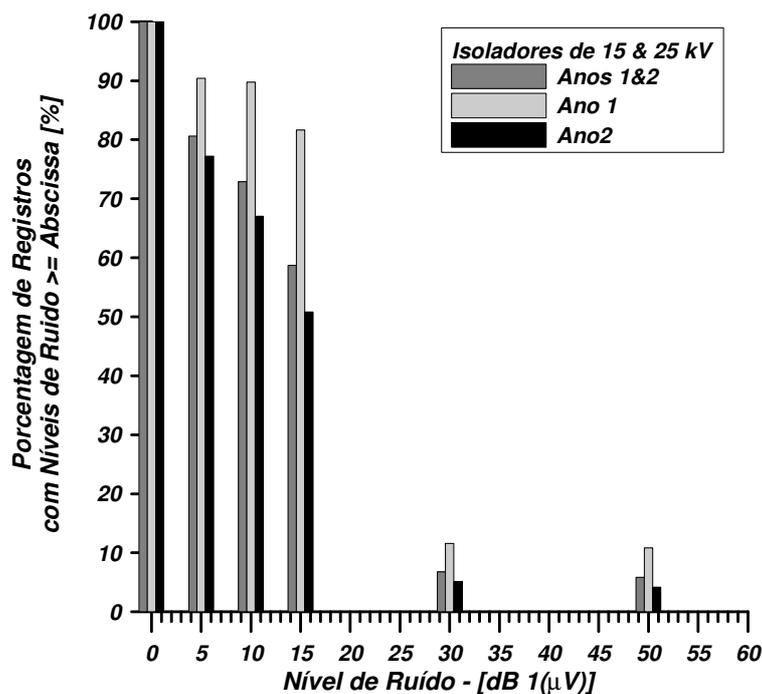


Figura 4.1 – Curva de permanência para os níveis de ruídos – Parte 1

O total de isoladores dessa parte foi igual a 6.728 isoladores. Sendo que 1.934 unidades foram da classe 15 kV e as 4.794 unidades restantes foram da classe 25 kV. Devido a fatores diversos decorrentes do transporte e manuseios das peças, a quantidade total considerada foi igual a 5.615 isoladores. Sendo que 977 unidades foram da classe 15 kV e as 4.638 unidades restantes foram da classe 25 kV. Assim, foram objeto de consideração os seguintes aspectos:

- I. Os isoladores estavam instalados em LADMT-AR em operação, tanto da classe 15 kV como da classe 25 kV. Foram inspecionados, removidos das linhas e enviados em lotes para ensaios no Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá;
- II. A reprodutibilidade das inspeções em campo foi verificada através da comparação das características das distribuições das amostras para os níveis limites de ruídos observados. Os isoladores foram considerados, tanto de forma separada nas classes 15 kV e 25 kV, quanto de forma agrupada, sem levar em conta o nível de tensão. As Tabelas 4.2 até 4.4 mostram os resultados.

A Tabela 4.1 mostra a eficiência da antena de ultrassons para o conjunto de isoladores classe 15 kV.

Tabela 4.1 – Eficiência da antena de ultrassons versus nível de ruídos – 15 kV

Limites	dB = 0	dB ≤ 5	dB ≤ 10	dB ≤ 15	dB ≤ 30	dB ≤ 50
Acertos	74,6%	51,8%	37,7%	29,7%	21,4%	19,1%
Erros	25,4%	48,2%	62,3%	70,3%	78,6%	80,9%
	Número de isoladores em condição pré-falha, remanescente no campo.					
	65	288	426	504	585	607
	8,2%	36,3%	53,6%	63,5%	73,7%	76,4%

- Isoladores da classe 15 kV:

Nesse grupo foram submetidos aos ensaios de laboratório 977 isoladores, dos quais 794 unidades não suportaram o ensaio de tensão aplicada, sob chuva. Sendo, 119 unidades do primeiro ano e 858 unidades do segundo ano da pesquisa.

Neste caso, os níveis de ruídos observados no campo em 99% dos casos foram inferiores a 50 dB(1 μ V), o que pode refletir a influência dos ruídos brancos de fundo associados a essas redes e classe de tensão.

Considerar como nível limite de ruídos 5 dB(1 μ V) para as inspeções em campo implica em manter na rede, em operação, mais 223 isoladores que também não suportaram as solicitações definidas em ensaios, ou seja, que podem ser considerados como em condição pré-falha. Por certo essas falhas demandam tempo e se desenvolvem de forma estocástica. Assim, a boa prática de engenharia recomenda remover esses possíveis pontos de problema futuro.

No presente, a escolha como nível limite de ruídos de 0 dB(1 μ V) para as inspeções em campo implica em remover as 223 unidades, bem como considerar uma eficiência para a antena de ultrassons da ordem de 75%. Esse valor é bastante razoável para um procedimento com grau de simplicidade e custos verificados.

A quantidade total de unidades inspecionadas e ensaiadas nesse grupo corresponde a lotes superiores a 100.000 unidades instaladas em campo, para um intervalo de confiança de 5% conforme tabela para determinação do tamanho da amostra [18].

A Tabela 4.2 mostra a eficiência da antena de ultrassons para o conjunto de isoladores classe 25 kV.

Tabela 4.2 – Eficiência da antena de ultrassons versus nível de ruídos – 25 kV

Limites	dB = 0	dB ≤ 5	dB ≤ 10	dB ≤ 15	dB ≤ 30	dB ≤ 50
Acertos	77,3%	75,6%	64,9%	16,9%	10,9%	6,6%
Erros	22,7%	24,4%	35,1%	83,1%	89,1%	93,4%
	Número de isoladores em condição pré-falha, remanescente no campo.					
	799	878	1.374	3.600	3.879	4.078
	18,2%	20,0%	31,3%	82,1%	88,4%	93,0%

- Isoladores da classe 25 kV:

Nesse grupo foram submetidos aos ensaios de laboratório 4.638 isoladores, dos quais 4.384 unidades não suportaram o ensaio de tensão aplicada, sob chuva. Sendo, 1.317 unidades do primeiro ano e 3.321 unidades do segundo ano da pesquisa.

Os procedimentos adotados nesse grupo foram os mesmos da classe 15 kV. Os níveis de ruídos observados no campo nesse grupo em 98% dos casos foram inferiores a 50 dB(1 μ V).

Considerar como nível limite de ruídos de 15 dB (1 μ V) para as inspeções em campo implica em manter na rede, em operação, mais 2.801 isoladores que não suportam as solicitações definidas em ensaios, ou seja, que podem ser considerados como em condição pré-falha. O volume representativo dessas unidades é da ordem de 63,9%, algo impossível de se aceitar em termos de engenharia, mesmo tendo em mente que os processos que levam ao desenvolvimento das falhas são, em regra, lentos.

No presente, a escolha como nível limite de ruídos de 0 dB (1 μ V) para as inspeções em campo implica em remover as 2.801 unidades, bem como considerar uma eficiência para a antena de ultrassons da ordem de 77%. Em termos práticos, também é possível, neste caso específico (sem comprometer a eficiência do processo de detecção de unidades sob pré-falha em campo), adotar o valor de 5 dB (1 μ V) como o nível limite de ruídos para as inspeções em campo.

Também nesse grupo, a quantidade total de unidades ensaiadas corresponde a lotes superiores a 100.000 unidades instaladas em campo, para um intervalo de confiança de 5% conforme tabela para determinação do tamanho da amostra [18].

A Tabela 4.3 mostra os índices globais quando se considera o conjunto de isoladores inspecionados sem levar em conta a classe de tensão das amostras.

Tabela 4.3 – Eficiência da antena de ultrassons versus nível de ruídos – 15 kV e 25 kV

Limites	dB = 0	dB ≤ 5	dB ≤ 10	dB ≤ 15	dB ≤ 30	dB ≤ 50
Acertos	76,9%	71,5%	60,2%	19,1%	12,7%	8,8%
Erros	23,1%	28,5%	39,8%	80,8%	87,3%	91,2%
	Número de isoladores em condição pré-falha, remanescente no campo.					
	860	1.163	1.798	4.106	4.465	4.684
	16,6%	22,5%	34,7%	79,3%	86,2%	90,4%

- Isoladores das classes 15 kV e 25 kV:

Nesse grupo foram submetidos aos ensaios de laboratório 5.615 isoladores, dos quais 5.178 unidades não suportaram o ensaio de tensão aplicada, sob chuva. Sendo, 1.436 unidades do primeiro ano e 4.179 unidades do segundo ano da pesquisa. Os níveis de ruídos observados no campo nesse grupo em 95% dos casos foram inferiores a 50 dB(1 μ V).

Novamente, considerar como nível limite de ruídos de 5 dB (1 μ V) para as inspeções em campo implica em manter na rede, em operação, mais 303 isoladores que não suportaram as solicitações definidas em ensaios, ou seja, que podem ser considerados como em condição pré-falha. O volume representativo destas unidades é da ordem de 6%.

No presente, a escolha como nível limite de ruídos de 0 dB (1 μ V) para as inspeções em campo implica em remover as 303 unidades, bem como considerar uma eficiência para a antena de ultrassons da ordem de 77%.

Em laboratório foi verificada forte atenuação na resposta dos detectores de ruídos, quando posicionados entre 8 a 10 metros da fonte de ruídos. Assim, quando se associa esses pontos ao fato de que os ruídos sofrem atenuações com a distância entre a fonte e o detector, é necessário reconhecer que a prudência (que deve orientar as decisões na área de engenharia de manutenção), indica que a melhor solução para a definição do nível limite de ruídos para as inspeções em campo é considerá-lo como igual a 0 dB (1 μ V).

A eficiência dos detectores é baseada em uma composição de índices parciais: positivo, falso positivo, negativo e falso negativo. Os índices parciais obtidos a partir das análises anteriormente descritas são apresentados na Tabela 4.4, sendo os seus correspondentes significados descritos abaixo:

- IP-IS (Índice Positivo, para Isoladores Sãos (bons)): representa as indicações corretas da inspeção de campo para os isoladores bons, determinados através de avaliações em laboratório;
- IP-PF (Índice Positivo, para Isoladores em Pré-Falha): representa as indicações corretas da inspeção de campo para os isoladores em pré-falha, determinados através de avaliações em laboratório;
- IFP-IS (Índice Falso Positivo, para Isoladores Sãos (bons)): representa as indicações incorretas da inspeção de campo referente aos isoladores bons;
- IFP-PF (Índice Falso Positivo, para Isoladores em Pré-Falha): representa as indicações incorretas da inspeção de campo referente aos isoladores em pré-falha.

Tabela 4.4 – Índices parciais, por nível limite de ruídos – 15 kV e 25 kV

	Isoladores Aprovados (ensaio de suportabilidade 60 Hz, sob chuva)					
	dB = 0	dB ≤ 5	dB ≤ 10	dB ≤ 15	dB ≤ 30	dB ≤ 50
IP-IS	32,3%	46,2%	65,9%	83,3%	94,5%	98,9%
IFP-IS	67,7%	53,8%	34,1%	16,7%	5,5%	1,1%
	Isoladores Não-aprovados (ensaio de suportabilidade 60 Hz, sob chuva)					
	dB = 0	dB ≤ 5	dB ≤ 10	dB ≤ 15	dB ≤ 30	dB ≤ 50
IFP-PF	19,4%	26,4%	40,3%	86,3%	94,2%	98,8%
IP-PF	80,6%	73,6%	59,7%	13,7%	5,8%	1,2%

A Tabela 4.5 sintetiza os índices das tabelas anteriores nas quais se apresenta a Eficiência (índices de acerto global) do detector de ultrassons versus os possíveis níveis limite de ruídos. Cabe salientar que a Eficiência indica os casos em que o resultado obtido no ensaio de laboratório (Aprovado ou Reprovado em relação ao ensaio de tensão suportável sob chuva em frequência industrial) foi coerente com a classificação do isolador em campo (supostamente São (bom) ou supostamente em Pré-Falha), conforme o nível limite de ruídos selecionado.

Tabela 4.5 – Eficiência do detector de ultrassons utilizado nessa pesquisa – Parte 1

Nível de ruídos [dB]	Eficiência do detector [%]
0	77
5	71
10	60
15	19

É possível, com a base de dados do primeiro e segundo ano desta pesquisa, elaborar os seguintes comentários e observações:

A) Mesmo quando se considera a diferença de eficiência da técnica aplicada conjuntamente para as classes de tensão 15 kV e 25 kV, é possível afirmar que o comportamento em relação ao nível limite de ruídos entre os isoladores bons e ruins se mantém razoavelmente constante. Exceto para a classe 15 kV (níveis de ruído superiores a 5 dB (1 μ V)).

Esse problema está associado a dois fatos: ao desbalanço entre o número de amostras inspecionadas em campo (ditado pelas LADMT-AR da AES Sul – massivamente 25 kV) e possíveis influências dos ruídos brancos de fundo quando comparados com os ruídos naturais gerados nas linhas de 15 kV.

B) Os resultados dessa análise, como discutido, indicaram que se deve remover da LADMT-AR qualquer isolador que apresentar nível de ruídos mensurável, quando medido em nível do solo.

C) A eficiência da técnica utilizada, em relação somente aos isoladores reprovados é razoavelmente elevada. É um valor da ordem de 80%, independente da classe de tensão (15 kV ou 25 kV) para um nível

limite de ruídos igual a 0 dB(1 μ V). A eficiência aumenta com a redução da classe de tensão, atingindo 90% para a classe 15 kV.

- D) Aumentos no nível limite de ruídos implicam em manter instalados na LADMT-AR, um maior número de isoladores em pré-falha.
- E) Existe boa reprodutibilidade nos resultados de campo para lotes anuais de amostras superiores a 1.000 unidades.
- F) Recomenda-se para pesquisas futuras que os lotes anuais sejam de pelo menos 1.000 isoladores, por classe de tensão, para mitigar influências, pois as análises realizadas com lotes anuais reduzidos conduzem a resultados díspares em relação à detecção de ruídos de campo. Os resultados obtidos contemplaram o elevado número de isoladores instalados em campo e as condições gerais das LADMT-AR investigadas (aquelas com significativos índices de interrupção no fornecimento, por causa de falha no isolador).

4.3.2 – Da segunda parte

Essa parte corresponde ao terceiro e quarto anos do projeto de pesquisa, que teve a duração total de quatro anos. Ela foi caracterizada principalmente pelo fato de se levar em consideração a influência dos fatores atmosféricos (temperatura ambiente, umidade relativa do ar e velocidade do vento), quando das inspeções dos isoladores nas LADMT-AR.

Tal ideia teve como origem o fato de que, em laboratório, realmente as condições ambientais influem no registro individual de ruídos. No entanto, ficam alguns pontos sobre tal aspecto. O primeiro, e muito importante, é relacionado com o impacto que essas condições podem ter na eficiência do processo para detecção de isoladores em condições pré-falha. O segundo é uma questão: poderia as diferentes condições atmosféricas explicar os distintos graus de eficiência observados, quando da detecção de isoladores são (bons) e em pré-falha?

Visto que as análises dos dados de campo foram realizadas em dois anos consecutivos (nesse caso, é imperativo verificar a consistências dos registros, bem como definir limites válidos para a temperatura, velocidade do vento e umidade), optou-se por agrupar (a exemplo de técnicas similares em

engenharia, por exemplo, em hidrologia) os vários parâmetros a serem analisados, na forma de Curvas de Permanência.

A Figura 4.2 mostra a curva de permanência para os níveis de ruídos de referência, obtidos nos dois últimos anos de inspeções de campo, que teve como objetivo verificar o impacto nos resultados obtidos na primeira parte desta pesquisa, também desenvolvida em dois anos.

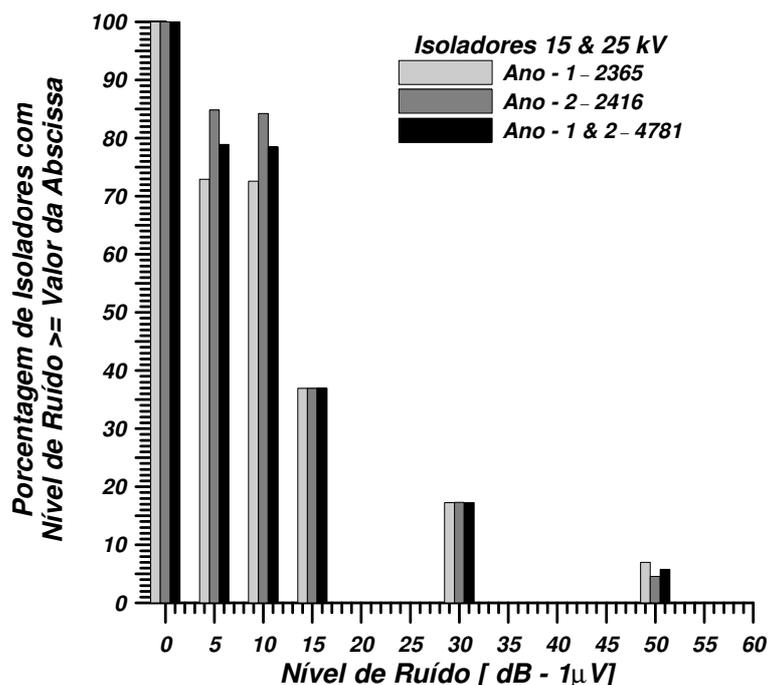


Figura 4.2 – Curva de permanência para os níveis de ruídos – Parte 2

O total de isoladores correspondente a essa parte da pesquisa foi igual a 4.754 isoladores, sendo que: 1.129 unidades foram da classe 15 kV e 3.625 unidades da classe 25 kV. Como se observa, existiu uma boa adesão com relação aos níveis de ruídos levantados anualmente e, por conseguinte, em termos de conjunto.

Os limites estatísticos para as condições atmosféricas obtidas nas medições de campo foram definidos com base nas suas respectivas curvas de permanência.

I. Temperatura ambiente

A curva de permanência para a temperatura ambiente demonstra que as inspeções de campo, durante os dois anos desta parte da pesquisa, foram

realizadas em condições semelhantes e que praticamente todas as medidas foram realizadas no intervalo entre 15 °C e 40 °C, conforme mostra a Figura 4.3.

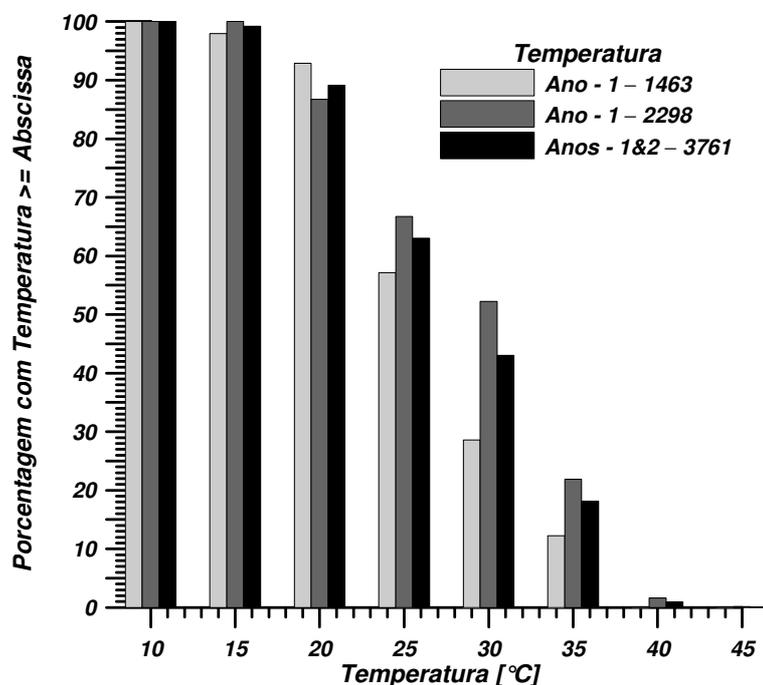


Figura 4.3 – Curva de permanência do fator temperatura ambiente

No entanto, no primeiro ano dessa parte dos trabalhos de campo, 80% das inspeções foram realizadas com as temperaturas ambientes entre 20°C e 35°C. No segundo ano o perfil da temperatura ambiente, para os mesmos 80% dos casos, contemplou a faixa entre 20°C a 40°C, com maior concentração entre 30°C e 40°C.

II. Umidade relativa do ar

A curva de permanência para a umidade relativa do ar demonstra que as inspeções de campo, durante os dois anos, foram realizadas em condições semelhantes sendo que praticamente todas as medidas foram realizadas no intervalo entre 20% e 85%, conforme mostra a Figura 4.4.

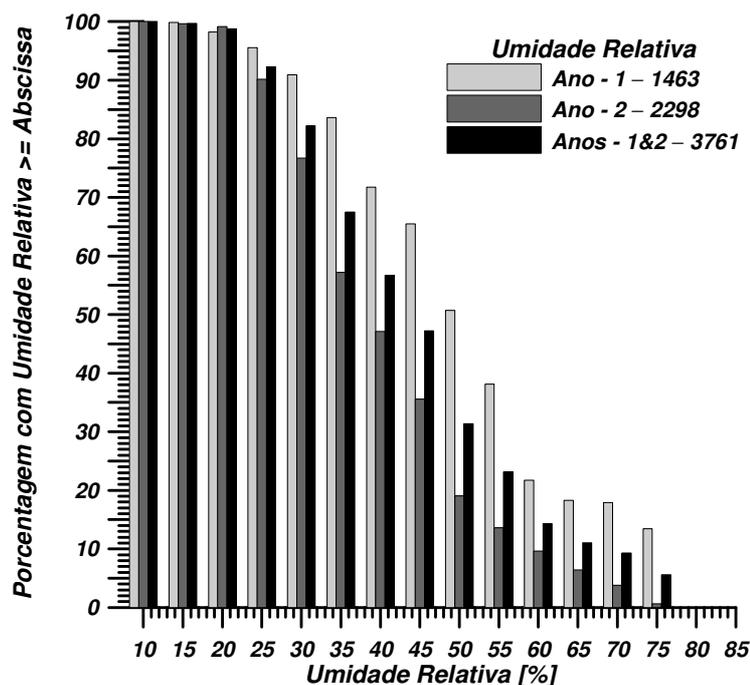


Figura 4.4 – Curva de permanência do fator umidade relativa do ar

No primeiro ano dos trabalhos de campo 80% das inspeções foram realizadas com umidades relativas do ar entre 25% e 75%. No segundo ano o perfil da umidade relativa do ar para os mesmos 80% dos casos, contemplou a faixa entre 25% e 60%.

III. Velocidade do vento

A curva de permanência para a velocidade do vento demonstra que as inspeções de campo, durante os dois anos desta pesquisa, não foram realizadas em condições semelhantes. Sendo que, praticamente todas as medidas foram realizadas no intervalo entre 0 km/h e 25 km/h, conforme mostra a Figura 4.5. Nota-se que a maioria das medidas em campo foi feita com velocidades do vento de até 5 km/h.

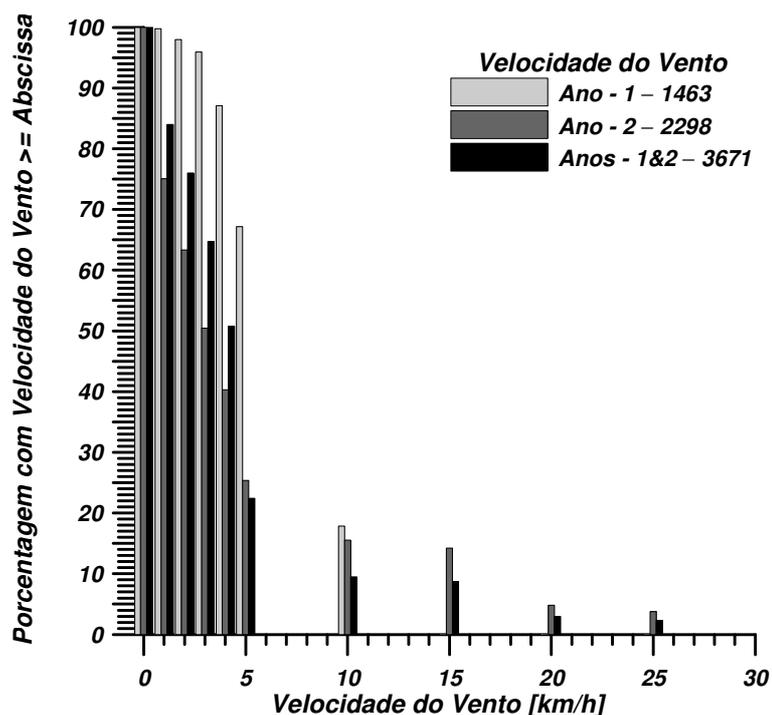


Figura 4.5 – Curva de permanência do fator velocidade do vento

No primeiro ano dessa parte da pesquisa, 85% das inspeções foram realizadas com a velocidade do vento entre 3 km/h e 15 km/h. No segundo ano dessa parte da pesquisa o perfil da velocidade do vento, para os mesmos 85% dos casos, contemplou a faixa entre 0 km/h e 15 km/h, com 36% dos casos entre 0 km/h e 3 km/h.

Com base nas curvas de permanências mostradas nas Figuras 4.2 até 4.5 e no tradicional limite estatístico de 90%, ficou claro ser representativo das regiões onde as LADMT-AR foram inspecionadas, os seguintes valores para os fatores atmosféricos:

- Temperatura Ambiente entre 15 e 40 °C;
- Umidade Relativa do Ar entre 20 e 75 %;
- Velocidade do Vento entre 0 e 15 km/h.

As análises apresentadas a seguir se resumem basicamente à verificação da eficiência do detector de ultrassons para posterior comparação com os valores obtidos anteriormente (quando não se considerou a influência das condições atmosféricas). Assim, a Tabela 4.6 mostra os valores obtidos

para a eficiência dos detectores, obtidos com o auxílio da sistemática que foi utilizada na primeira parte desta pesquisa.

Tabela 4.6 – Eficiência do detector de ultrassons utilizado nessa pesquisa – Parte 2

Nível de ruídos [dB]	Eficiência do detector [%]
0	70
5	62
10	38
15	23

A Tabela 4.7 mostra os erros na eficiência no processo de detecção de isoladores em condição pré-falha em campo, observados entre os dois períodos (sem considerar as condições atmosféricas). Os erros crescem em função do nível de ruídos e podem ser considerados como razoáveis (em nível de engenharia de manutenção), para os níveis de ruído entre 0 a 5 dB (1 μ V).

Tabela 4.7 – Erro na eficiência do detector de ultrassons utilizado – Partes 1 e 2

Nível de ruídos [dB]	Erro na eficiência do detector [%]
0	9
5	14
10	17
15	21

Deste modo, pode-se afirmar (dentro do intervalo de confiança em nível de engenharia) que a eficiência dos detectores de ultrassons utilizados (considerando as condições existentes no campo nas redes AES Sul) fica entre 70% e 80%, quando não são analisadas as condições atmosféricas nos locais de inspeção. Esses valores são considerados muito bons para o tipo de ferramenta utilizada.

Alguns pontos sobre as condições físicas do isolamento das redes devem ser comentados. O grau de envelhecimento, manutenção e conservação podem afetar o resultado de trabalhos semelhantes em outras regiões. Também a mudança dos tipos de detectores deve ser cuidadosamente investigada, uma vez que os circuitos, filtros, e demais partes construtivas podem diferir substancialmente.

No entanto, um fato é certo: a aplicação das técnicas propostas reduziu o número de desligamentos nas regiões que elas foram aplicadas, como confirmado na *Audiência Pública para a Revisão Tarifária da AES Sul em 2008*, por parte dos consumidores rurais da AES Sul.

O questionamento sobre a eficiência composta dos detectores e do método desenvolvido nesta pesquisa parte do pressuposto que não se procura analisar a condição de operação de isoladores sãos (bons) na rede e sim daqueles em estado de pré-falha.

Por exemplo, a interpretação dos dados da Tabela 4.5 para as condições de ruído de 0 dB (1 μ V), em termos dos seus índices *IP-IS* e *IP-PF*, implica em assumir que a ausência de ruído (leitura de 0 dB (1 μ V)), significa ter 32,3% de certeza de que se trata de um isolador são (bom); que a presença de qualquer ruído (leitura superior a 0 dB (1 μ V)) significa ter 80,6% de certeza de que se trata de um isolador em pré-falha.

Assim, o que se observa é que existe maior confiança nas indicações de isoladores em pré-falha. Isso se deve ao fato de que a existência de ruído é uma característica inerente aos isoladores em operação (conforme estabelecido em ensaios em laboratório com detectores M-247B® Sniffer®, capazes de realizar leituras próximas à fonte).

Com base nesse fato e nas medições obtidas em laboratório para os diversos pares Intensidade-Distância, estabeleceu-se que: *a detecção de ruídos, medidos em nível do solo e próximo à base do poste, é forte indicativo da presença e desenvolvimento de processos que podem levar a um colapso dielétrico do sistema de isolamento da LADMT-AR.*

Uma vez que o objetivo prático desta pesquisa é identificar isoladores em pré-falha nas LADMT-AR em operação, as análises a seguir consideram somente o conjunto (universo) formado pelos isoladores que não suportaram os ensaios realizados em laboratório.

A Tabela 4.8 mostra os índices obtidos, por classe de tensão e por nível limite de ruídos para o conjunto de isoladores que não suportaram o ensaio de

tensão aplicada em frequência industrial sob chuva, sem levar em conta a influência das condições atmosféricas.

Tabela 4.8 – Eficiência do detector de ultrassons. Isoladores reprovados em laboratório. Fatores atmosféricos desconsiderados.

	dB = 0	dB ≤5	dB ≤15	dB ≤30	dB ≤50
15 kV	83,1%	84,9%	93,9%	97,0%	97,1%
25 kV	85,0%	85,1%	82,9%	83,2%	84,9%
15 kV e 25 kV	84,9%	85,0%	85,1%	86,1%	89,0%

Como se observa para o nível limite de 0 dB (1 μ V) (registro de qualquer nível de ruído indicando presença de isoladores em pré-falha), a eficiência do detector não é afetada pela classe de tensão da rede. A partir de 5 dB (1 μ V) existe uma melhora na eficiência com relação à classe 15 kV e certa continuidade em termos de eficiência da classe 25 kV.

Isso reflete a influência dos ruídos de fundo com respeito às classes de tensão. Em termos gerais, dada a diferença de quantidades de isoladores analisados, não são observados impactos em termos da eficiência geral do detector. Isso é ditado pela característica das redes de média tensão da AES Sul, predominantemente em 25 kV.

A Tabela 4.9 mostra os índices obtidos, por classe de tensão e por nível limite de ruídos para o conjunto de isoladores que não suportaram o ensaio de tensão aplicada em frequência industrial sob chuva, tendo em conta a influência das condições atmosféricas.

Nesse caso são considerados como limites válidos para análise os valores limites de temperatura, umidade relativa e velocidade do vento determinados a partir das curvas de permanência mostradas nas Figuras 4.2 a 4.5 os seguintes valores para os fatores atmosféricos.

- Temperatura Ambiente entre 15 e 40 °C;
- Umidade Relativa do Ar entre 20 e 75%;
- Velocidade do Vento entre 0 e 15 km/h.

Tabela 4.9 – Eficiência do detector de ultrassons. Isoladores reprovados em laboratório. Fatores atmosféricos considerados.

	dB = 0	dB ≤5	dB ≤15	dB ≤30	dB ≤50
15 kV	95,0%	94,9%	93,9%	97,0%	95,1%
25 kV	85,1%	85,0%	83,9%	84,2%	84,9%
15 & 25 kV	87,0%	86,9%	87,1%	86,9%	89,0%

A Tabela 4.10 mostra as diferenças em termos de eficiência na detecção de ruídos quando se leva em conta a influência das condições atmosféricas. Como se observa a influência das condições atmosféricas só é presente para a classe 15 kV e para os níveis de ruídos de 0 e 5 dB (1 μ V).

Nos demais casos as condições ambientais não afetam os resultados. Em resumo, mesmo considerando que as condições ambientais influenciam nos resultados individuais em laboratório, esse fato não se verifica de forma coletiva.

Tabela 4.10 – Diferenças de resultados da eficiência. Isoladores reprovados em laboratório.

	dB = 0	dB ≤5	dB ≤15	dB ≤30	dB ≤50
15 kV	12%	10%	0%	0%	2%
25 kV	0%	0%	1%	1%	0%
15 & 25 kV	2%	2%	2%	1%	0%

Desse modo é possível, com a base de dados do terceiro e quarto ano desta pesquisa, elaborar os seguintes comentários e observações:

- A) As variações dos fatores atmosféricos, ocorridas em diferentes períodos do ano, foram consideradas típicas para os locais considerados.
- B) As inspeções em campo foram realizadas com os fatores atmosféricos dentro das seguintes faixas:
 - Temperatura ambiente entre 15 e 40 °C;
 - Umidade relativa do ar entre 20 e 75%;
 - Velocidade do vento entre 0 e 15 km/h.

Essas faixas foram consideradas normais pela AES Sul Distribuidora Gaúcha de Energia, para a região geográfica sobre a qual essa pesquisa foi desenvolvida.

- C) Ao considerar somente o universo dos isoladores reprovados nos ensaios de tensão suportável em frequência industrial sob chuva, a eficiência da inspeção (índice de acerto) aumentou em relação aos resultados da primeira parte desta pesquisa. Para o nível limite de ruídos igual a 0 dB(1 μ V) e sem considerar a influência dos fatores atmosféricos, esse índice foi de 85%.
- D) Ao considerar somente o universo dos isoladores reprovados e a influência dos fatores atmosféricos, a eficiência da inspeção (índice de acerto) foi de 87%, para o nível limite de ruídos igual a 0 dB(1 μ V).
- E) A partir dos resultados anteriores (C e D) admite-se que as medições de ruídos em campo praticamente não sofreram modificações. O que permite afirmar que os fatores atmosféricos não causaram influência nas inspeções em campo, em específico com os detectores de ultrassons.
- F) Poder-se-ia admitir que os fatores atmosféricos tivessem influência para os isoladores da classe 15 kV. Nesse grupo o índice de acerto saltou de 83% para 95%, ao considerar o nível de limite de ruídos igual a 0 dB(1 μ V). Porém isso deve ser visto com reservas, pois no primeiro caso 645 unidades foram consideradas danificadas, no universo de 781 unidades. No segundo caso 397 foram consideradas danificadas, no universo de 416 unidades. A grande diferença entre os tamanhos dos universos não torna prudente tal afirmativa.
- G) Um aumento no nível limite de ruídos implicará em manter um número maior de isoladores em pré-falha instalados na LADMT-AR, pois ocorrem reduções nos índices de acerto à medida que se eleva o nível limite de ruídos.

4.3.3 – Do projeto de pesquisa

Durante o desenvolvimento desta pesquisa foram feitas algumas constatações. Elas podem também ser consideradas como resultado do projeto

de pesquisa. Uma vez que são gerais e foram feitas durante buscas por respostas mais específicas.

Assim, adicionalmente aos resultados mostrados e discutidos anteriormente nesse capítulo, apresentam-se adiante esses resultados. Eles foram obtidos a partir de experimentos em laboratório e da análise da base de dados considerada em sua totalidade. São eles:

- A) A tecnologia de ultrassom, por ser mais direcional, mostrou-se mais eficiente para investigação das fontes de ruídos. Com esse detector foi possível, na maioria dos casos, identificar na estrutura (poste) qual era o isolador emissor de ruídos. Para isso o instrumento detector de ruídos foi posicionado no solo e próximo à estrutura (com distâncias laterais entre 2 e 5 metros, em relação ao pé do poste).
- B) A tecnologia de RF é a indicada para se executar uma primeira varredura na LADMT-AR, pois os ruídos são captados com distâncias de até 400 m. Entretanto, com essas distâncias, não é possível identificar a(s) estrutura(s) do trecho inspecionado que está produzindo os ruídos.
- C) Os isoladores do tipo pino, instalados em LADMT-AR energizada, apresentam certo grau mínimo de ruídos. Isso pode ser constatado quando se investiga o nível de ruídos, bem próximo ao corpo do isolador (tanto em laboratório como em campo).
- D) O nível de ruídos de um isolador energizado (em laboratório) se atenua à medida que o instrumento detector M-247B® Sniffer® é afastado do corpo do isolador. Para isoladores em boas condições de operação, o nível de ruídos desaparece para distâncias superiores a 1 m. Para isoladores ruins, os níveis de ruídos podem ser detectados com distâncias de 8 a 10 metros.
- E) Deve ser removido da LADMT-AR qualquer isolador que apresentar nível de ruídos maior que zero, quando medido com o instrumento detector de ruídos posicionado no solo e nas proximidades do pé do poste.
- F) A recomendação para remover da LADMT-AR isoladores com nível de ruídos superior ao nível limite de ruídos igual a 0 dB(1µV), possui

um índice de acerto máximo (certeza) de 85%. Independentemente da classe de tensão da LADMT-AR.

4.4 – Os resultados de um Caso

Durante os quatro anos de desenvolvimento desta pesquisa a concessionária AES Sul Distribuidora Gaúcha de Energia acompanhou especialmente alguns trechos considerados críticos em suas LADMT-AR. Durante a segunda parte da pesquisa foi possível aplicar a técnica proposta (em sua primeira versão) em um dos trechos.

Assim, ainda durante o período de pesquisa foi possível dispor de dados que permitiram confrontar os desempenhos operacionais desse trecho, na sua condição base (sendo as inspeções realizadas com o uso de técnicas convencionais) e com a aplicação da técnica proposta. A Figura 4.6 mostra a avaliação comparativa dos desempenhos observados para essas condições.

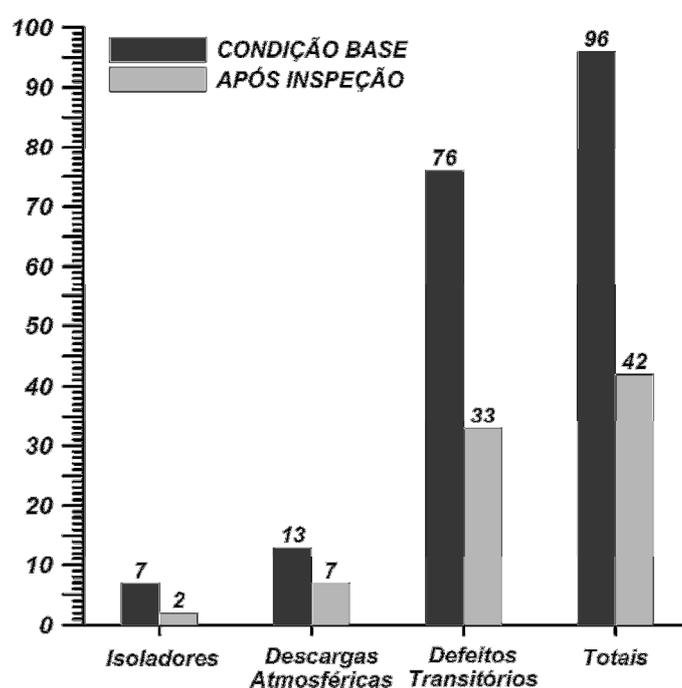


Figura 4.6 – Comparação do desempenho operacional de um trecho específico da rede aérea em média tensão da AES Sul

O gráfico acima mostra o número de interrupções ocorridas no trecho em função das causas. A causa Isoladores se refere àquelas ocorrências em

que ficou claramente identificado o isolador como o causador da interrupção. A causa Descargas Atmosféricas se refere àquelas ocorrências em que as interrupções foram causadas por sobretensão originada das descargas atmosféricas. Geralmente estão associados aos dias de tempestades ou nublados.

A causa Faltas Transitórias se refere àquelas ocorrências de interrupções não sustentadas em que a energia é restabelecida logo em seguida. Essas interrupções são associadas às falhas dielétricas temporárias no sistema de isolamento do trecho. A maioria dessas falhas é originada por fatores atmosféricos temporários, tais como: ventos e/ou chuvas.

Citam-se os exemplos: (1) galhos de árvore que por ação do vento tocam os condutores energizados; (2) estruturas (poste/componentes) molhadas pela ação da chuva que modificam temporariamente suas propriedades isolantes. Os isoladores em estado de pré-falha são potencializados para a falha, quando submetidos à chuva.

É possível constatar pelo gráfico da Figura 4.6 que após a inspeção do trecho e a posterior substituição dos isoladores em estado de pré-falha, houve significativa melhora do seu desempenho operacional. Nota-se considerável redução das interrupções pela causa Faltas Transitórias. Isso porque certamente foi identificado (e substituído) um elevado número de isoladores em estado de pré-falha.

4.5 – Priorização das intervenções

Uma vez que é possível obter em campo leituras – registros entre 1 e 100 dB(1 μ V), a pergunta que se segue à definição da conveniência em se considerar 0 dB(1 μ V), para os detectores de ultrassons, como o valor limite de ruído capaz de definir quais isoladores tipo pino se encontram na condição pré-falha é a existência ou não de uma lógica relativa à priorização de intervenções, ou seja, substituições de isoladores em operação nas redes de média tensão.

A lógica por trás das operações nas linhas de média tensão passa pelo conhecimento dos índices de desempenho do alimentador, ou do trecho analisado. Dentre eles, que são prioritários, é possível, com base na amplitude da leitura, definir uma sequência de atividades com base no nível de ruído registrado? Quando se considera a existência de forte potencial de interferências nas comunicações de rádio e televisão a resposta imediata é: quanto maior o nível de ruídos registrado durante as inspeções em campo maior é a possibilidade de desenvolvimento de interferências. Portanto, os isoladores que apresentarem os maiores níveis de ruído devem ser prioritariamente substituídos.

Um ponto, pelo menos no que tange as redes de média tensão da AES Sul, demonstrado anteriormente, é que a presença de ruídos, detectáveis ao pé dos postes por detectores ultrassônicos, implica em baixa suportabilidade dielétrica frente a tensões em frequência industrial sob chuva.

Assim a primeira questão que surge é se existe uma correlação entre o nível de ruído e o valor da tensão suportável média frente a tensões em frequência industrial – valor mais provável, capaz de definir uma sequência de intervenções nas redes?

Para tanto, seja a análise dos dados levantados na primeira fase desta pesquisa (na qual não foi levada em conta a influência das condições ambientais). Considerando a semelhança dos registros de ruídos entre as duas fases desta pesquisa as conclusões obtidas não devem ser afetadas pela não inclusão desses dados.

A avaliação da correlação entre classes de tensão, níveis de ruídos, valores mais prováveis da tensão suportável em frequência industrial sob chuva foi realizada com o Software MINITAB®. Essa ferramenta é uma alternativa matemática ao método das curvas de permanência utilizado anteriormente para a avaliação dos limites para as condições ambientais.

Após uma análise geral dos dados foi considerada a conveniência de se utilizar o *Modelo Estatístico de Weibull a 2 Parâmetros*. Esse modelo não é o mais adequado para todos os dados. No entanto, a uniformização permite

chegar às mesmas conclusões evitando discussões sobre a aderência dos dados, oriundos de fenômenos físicos definidos para modelos estatísticos específicos.

A Figura 4.7 mostra o modelo estatístico para a tensão disruptiva em frequência industrial – *Isoladores Classe 15 kV* que não suportaram o *Ensaio de Tensão a Frequência Industrial sob Chuva* – para os registros com nível de ruídos superior a 0 dB(1 μ V). Como discutido, o modelo estatístico é de *Weibull – 2 Parâmetros*, que nesse caso específico foi o que mostrou a maior aderência aos dados de campo e ensaios.

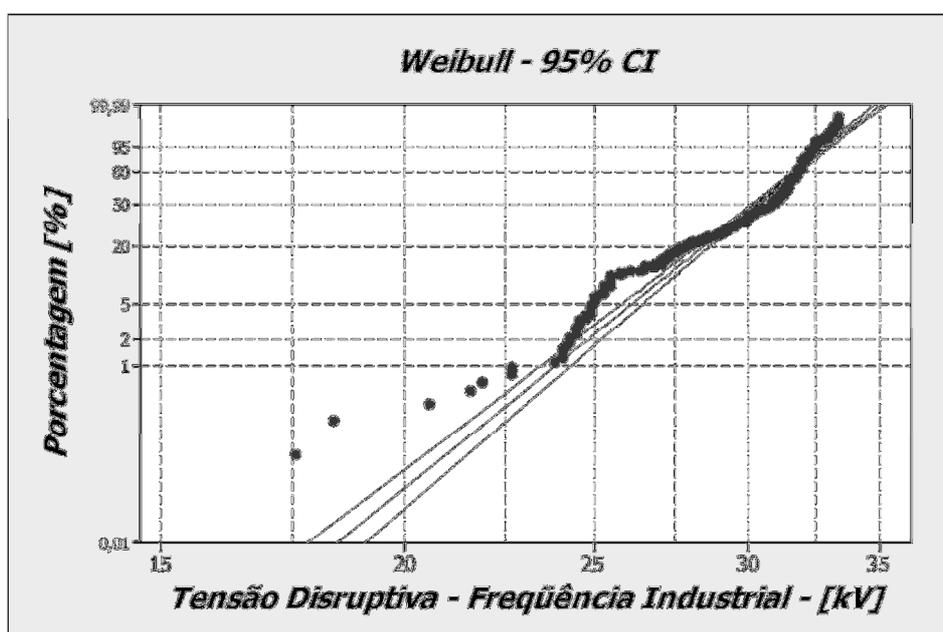


Figura 4.7 – Modelo estatístico para tensão disruptiva em frequência industrial sob chuva isoladores 15 kV que não suportaram o ensaio – níveis de ruídos superiores a 0 dB(1 μ V)

Com base em dados similares aos mostrados na Figura 4.7 é obtida a Figura 4.8 que mostra para os isoladores classe 15 kV a evolução da tensão suportável mais provável em função dos níveis de ruídos superiores aos valores da abscissa.

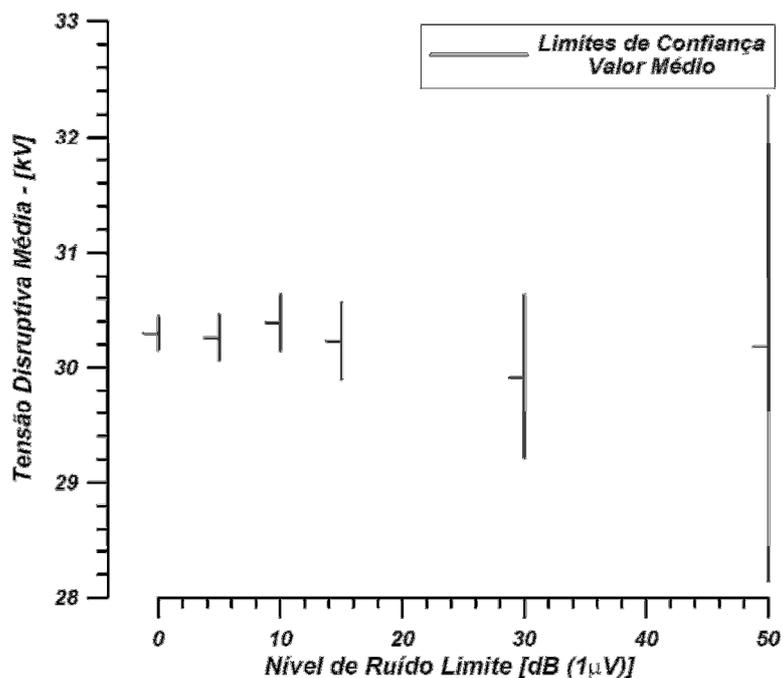


Figura 4.8 – Valores médios mais prováveis para a tensão disruptiva em frequência industrial sob chuva isoladores 15 kV– níveis de ruídos superiores ao da abscissa

Como observado na Figura 4.8 não existem variações estatísticas dignas de nota, quando os valores de suportabilidade em frequência industrial sob chuva para os níveis de ruídos superiores a 0 dB(1µV) são comparados, por exemplo, com os valores de suportabilidade para os níveis de ruídos superiores a 50 dB(1µV). Também não se detectam tendências e nesse caso deve-se considerar uma incerteza da ordem +/- 3%, ou seja, +/- 1 kV em relação ao valor mais provável [20].

O aumento nos limites de confiança – “*Dispersão em Relação à Média*” observado na Figura 4.8 está relacionado com a redução do número de amostras que formam os conjuntos de dados, que decrescem com o aumento do nível de ruídos. Assim uma vez que os conjuntos para níveis superiores se encontram contidos dentro dos níveis inferiores é possível afirmar que o comportamento observado reflete certa consistência nos dados.

A Figura 4.9 mostra a mesma análise em função do nível de ruído específico, em que a dependência dos conjuntos é eliminada e os dados são analisados de forma independente. Assim, nesse caso os dados do conjunto para ruídos iguais a 5 dB(1µV) contém somente os dados desse conjunto e não o de todos que lhe são superiores.

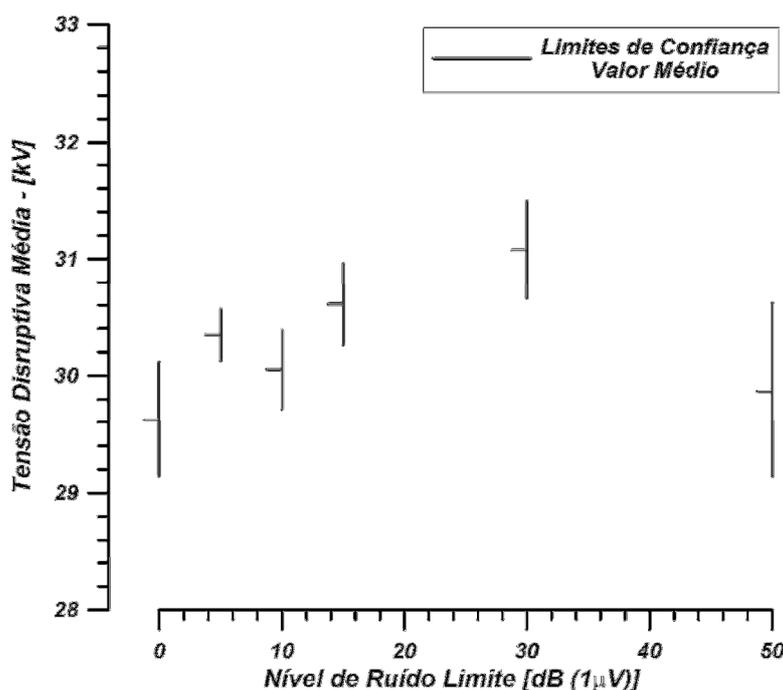


Figura 4.9 – Valores médios mais prováveis para a tensão disruptiva em frequência industrial sob chuva isoladores 15 kV– níveis de ruídos iguais ao da abscissa

Novamente, como observado anteriormente, não existem variações estatísticas dignas de nota, quando os valores de suportabilidade em frequência industrial para os níveis de ruídos iguais a 0 dB(1µV) são comparados, por exemplo, a valores de suportabilidade para os níveis de ruídos iguais a 50 dB(1µV). Também não se detectam tendências gerais mesmo que sejam consideradas tendências parciais, uma vez que essas se encontram dentro do grau de incerteza padrão da ordem +/- 3%, ou seja, como mencionado, +/- 1 kV em relação ao valor mais provável [20].

As Figuras 4.10 e 4.11 para os isoladores *Classe 25 kV* apresentam tendências similares às observadas para os isoladores *Classe 15 kV*.

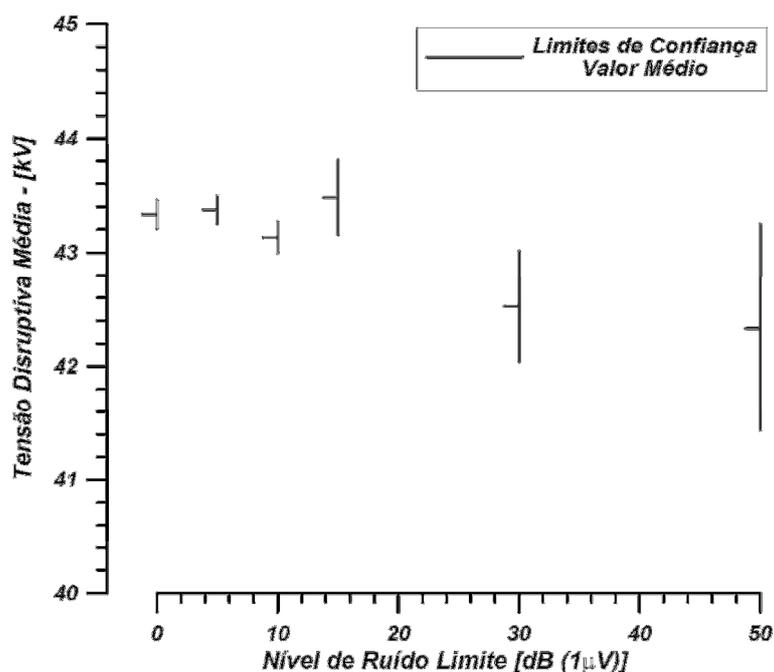


Figura 4.10 – Valores médios mais prováveis para a tensão disruptiva em frequência industrial sob chuva isoladores 25 kV– níveis de ruídos superiores ao da abscissa

Como observado na Figura 4.10 existem algumas variações estatísticas quando os valores de suportabilidade em frequência industrial sob chuva para os níveis de ruídos superiores a 0 dB(1µV) são comparados, por exemplo, com os valores de suportabilidade para os níveis de ruídos superiores a 50 dB(1µV). Essas são reduzidas com base na incerteza da ordem +/- 3%, ou seja, +/- 1 kV em relação ao valor mais provável [20]. A tendência observada é a esperada, ou seja, redução no valor mais provável da tensão suportável em frequência industrial com o aumento do nível de ruídos.

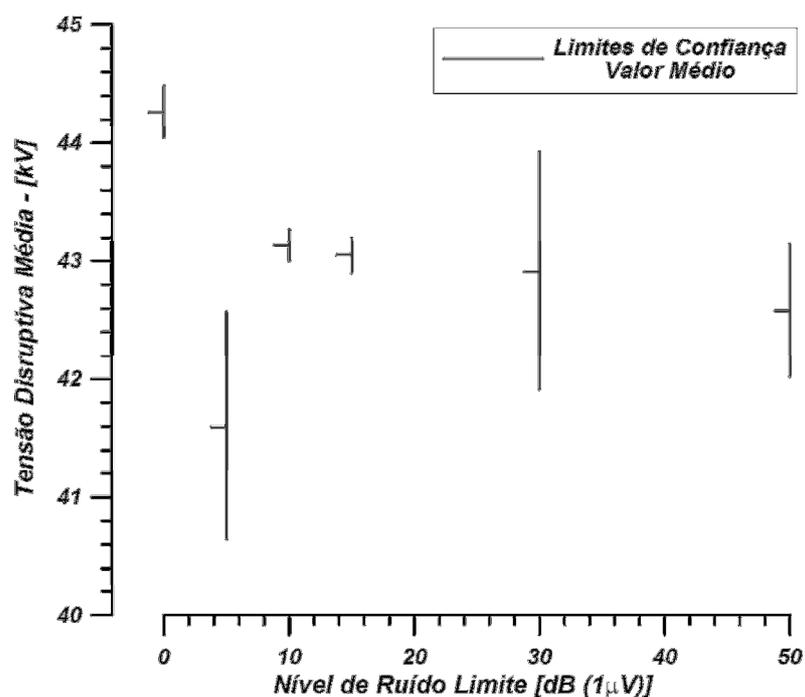


Figura 4.11 – Valores médios mais prováveis para a tensão disruptiva em frequência industrial sob chuva isoladores 25 kV– níveis de ruídos igual ao da abscissa

Novamente, como observado anteriormente, não existem variações estatísticas, dignas de nota, quando os valores de suportabilidade em frequência industrial para os níveis de ruídos iguais a 0 dB(1µV) são comparados, por exemplo, aos valores de suportabilidade para os níveis de ruídos iguais a 50 dB(1µV). Também não se detectam tendências gerais mesmo que sejam consideradas tendências parciais, uma vez que essas se encontram dentro do grau de incerteza padrão da ordem +/- 3%, ou seja, como mencionado, +/- 1 kV em relação ao valor mais provável [20].

Desse modo, não existem relações capazes de definir de forma indelével uma ordem para a intervenção nas redes em função do nível de ruídos detectados em campo. Assim, a lógica deve seguir a possibilidade da existência de interferências nas transmissões de rádio e televisão.

Capítulo 5 – CONCLUSÕES E CONTRIBUIÇÕES

Este capítulo apresenta as conclusões e contribuições desse trabalho e propõe um procedimento de campo para inspeção de LADMT-AR. Também expõe sugestões para pesquisas futuras, pois como é incipiente o uso dessas tecnologias para inspeção em LADMT-AR, há um grande campo para o desenvolvimento de outras técnicas. Por fim, apresenta os comentários finais.

5.1 – As conclusões

A) *Sobre o tema e o projeto de pesquisa*

É sabido que para qualquer sistema elétrico de potência (SEP) as ocorrências mais indesejáveis são: a falha no sistema de geração da energia elétrica e a falha no sistema de transporte da energia elétrica. Em qualquer um dos casos haverá interrupção no fornecimento da energia elétrica para o consumidor (carga).

É razoável admitir que todos os esforços da Engenharia Elétrica estejam direcionados para os dois grandes pilares do SEP. O primeiro pilar é aquele que busca encontrar meios para gerar a energia elétrica na quantidade necessária para suprir as cargas. O segundo é aquele que busca garantir que as linhas de transmissão permaneçam a maior parte do tempo em condições de transportar a energia elétrica.

O tema desse projeto de pesquisa é a continuidade no fornecimento da energia elétrica. Esse tema encontra-se no pilar que busca garantir que as linhas de transmissão (ou distribuição) estejam sempre em condições de transportar a energia elétrica. Isso porque, além desse pilar ser o responsável efetivo pelo o fornecimento da energia elétrica, é também o responsável pela qualidade do fornecimento dessa energia, na medida em que visa reduzir as quantidades e as durações das interrupções desse fornecimento.

Outra questão considerada durante a etapa de definições do projeto de pesquisa foi escolher para qual segmento do SEP (se transmissão ou distribuição) a pesquisa deveria ser direcionada.

Na busca de tal resposta, partiu-se de um fato conhecido no setor elétrico brasileiro, qual seja, em um SEP, à medida que se desloca no sentido da geração para a carga, ocorre um aumento significativo na quantidade de linhas aéreas de distribuição de média tensão. Então, o segmento distribuição terá maior extensão que o segmento transmissão. Por conseguinte no segmento distribuição é onde ocorrerá o maior número de falhas.

Assim, embora a extensão de LADMT-AR seja desconhecida do público, optou-se pelo segmento distribuição para o desenvolvimento da pesquisa. Tal decisão foi devido ao potencial desse segmento para a aplicabilidade dos eventuais resultados da pesquisa.

Outro fator que também contribuiu para consolidar a definição do projeto de pesquisa foi a análise sobre a aplicação de técnicas de termovisão no sistema elétrico brasileiro.

Essa técnica apresenta melhores resultados quando utilizada em instalações elétricas com nível de tensão mais elevado (pois o calor é associado com a energia elétrica) e mais eficiente quando aplicada em instalações elétricas localizadas em ambientes fechados. Entretanto, é uma técnica de elevado custo.

Ela é mais aplicada em linhas com tensão muito elevada (acima de 145 kV). Nesses casos, mesmo falhas de curta duração, implicará na interrupção do fornecimento de energia para grande número de consumidores.

Essa técnica não é recomendada para aplicação em larga escala, como por exemplo, em LADMT-AR, quer seja pelo aspecto econômico ou pelo aspecto da eficiência da técnica em nível de tensão mais baixo (até 36,2 kV).

Portanto, a partir da combinação das análises acima foi escolhido o tema e definido o projeto de pesquisa, qual seja, o de pesquisar o uso de tecnologias alternativas (ultrassom e RF) para serem aplicadas na inspeção de

componentes isoladores das LADMT-AR, com o propósito de contribuir para redução do número de interrupções do fornecimento de energia elétrica. Então, a partir das pesquisas desenvolvidas por esse autor, no âmbito do projeto de pesquisa, foi definido o título dessa tese.

B) Sobre a tese

Considerando o objetivo exposto no capítulo 1 e as exposições de resultados (e comentários) feitas no capítulo 4, relacionam-se a seguir as conclusões dessa tese:

- 1) A tecnologia de ultrassom, por apresentar uma característica mais direcional, mostrou-se como a mais eficiente para investigação de fontes de ruídos, principalmente sob a ótica das equipes de manutenção de LADMT-AR. Com esse tipo de detector, na maioria dos casos, foi possível a identificação do isolador fonte de ruídos;
- 2) A tecnologia de RF, por sua maior sensibilidade na captação de ruídos e menor direcionalidade, é indicada para executar inspeção geral e em distância (varredura) da LADMT-AR, pois os ruídos são captados em distâncias de até 400 m;
- 3) Os isoladores emitem ruídos mínimos, quando instalados em LADMT-AR em operação;
- 4) O nível de ruídos se atenua à medida que o detector de ruídos é afastado do corpo do isolador. Para isoladores em boas condições de operação, o nível de ruídos virtualmente desaparece para distâncias superiores a 1 metro;
- 5) O isolador em operação que apresentar nível de ruídos mensurável deve ser removido da LADMT-AR, desde que a medição seja feita por instrumento detector posicionado próximo da base do poste;
- 6) A recomendação para remover os isoladores com nível de ruídos superior ao limite de 0 dB(1 μ V) possui um nível de certeza igual a 85% (índice de acerto), independente da classe de tensão.

C) *Sobre a pesquisa*

O capítulo 4 contém o detalhamento de todos os resultados obtidos a partir dos trabalhos dessa pesquisa. Como base naquelas exposições, nos ensaios específicos em laboratório e nas conclusões dessa tese, são apresentadas a seguir as conclusões gerais sobre essa pesquisa:

- 1) Ensaios de laboratório com isoladores sãos (bons) energizados indicaram que o isolador nessa condição é fonte de ruído natural, porém não é mensurável a partir de distâncias superior a 1 metro, contados a partir do isolador. O instrumento utilizado nesse experimento foi o detector de ultrassom M-247B® Sniffer®;
- 2) Ensaios de laboratório com isoladores ruins (trincados) energizados indicaram que o isolador nessa condição é fonte de ruído com nível elevado. Foram detectáveis a distâncias de até 10 metros, contados a partir do isolador. Verificou-se que em casos extremos essa distância pode ser ultrapassada. Novamente, o instrumento utilizado foi o detector de ultrassom M-247B® Sniffer®;
- 3) Ensaios de laboratório constataram que os ruídos de fundo (ou naturais) aumentam à medida que se eleva o nível de tensão de operação do isolador. Esse fato poderia ser o responsável por alguma redução do índice de acerto para os isoladores da classe 25 kV. Para níveis de tensão mais baixos o nível de ruídos é geralmente bem definido e também claramente detectado. Isso significa que há uma dificuldade natural na aplicação da técnica proposta, para linhas aéreas de distribuição com tensão superior a 36,2 kV (limite para a média tensão);
- 4) As medições do nível de ruídos feitas a partir do solo, não captam os ruídos naturais do isolador sãos (bons). Isso porque em LADMT-AR a altura média dos postes é de 9 metros;
- 5) Os melhores índices de acertos (máxima eficiência dos detectores) ocorrem para os níveis limite de ruídos igual a 0 dB(1µV) e 5 dB(1µV);
- 6) Aumentos no nível limite de ruídos implicam em deixar em operação na LADMT-AR um maior número de isoladores no estado de pré-falha;

- 7) Os fatores ambientais (temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento), dentro de limites estatísticos, não têm influência no resultado das inspeções de campo. Isso se verifica (como demonstrado) uma vez que o volume de unidades inspecionado mascara o efeito individual da influência desses fatores nos resultados.

5.2 – As contribuições

Conforme apresentado no capítulo 1, esse trabalho de pesquisa permitiu comprovar as seguintes afirmativas:

- 1) Existe correlação entre nível de ruídos e suportabilidade frente a solicitações em frequência industrial, em isoladores tipo pino;
- 2) A correlação ruídos-suportabilidade pode ser utilizada de forma positiva para definição de técnica de inspeção em campo, para determinar a condição física de isoladores tipo pino;
- 3) Os procedimentos recomendados são de baixo custo, quando comparado com a aplicação de técnicas concorrentes (de termovisão e corona);
- 4) Apesar de existir nítida correlação ruídos-suportabilidade para isoladores em estado de pré-falha, o mesmo não foi verificado para isoladores são (bons);
- 5) Ruídos não significam somente possíveis interferências nas operações de difusão de rádio e televisão, mas também problemas de suportabilidade dielétrica e falhas dielétricas em isoladores tipo pino.

Adicionalmente, o trabalho contribuiu com o desenvolvimento de métodos para aplicação de instrumentos com tecnologia de ultrassons (combinados com técnicas de varredura por RF), para inspeção de isoladores tipo pino em LADMT-AR energizada.

5.3 – O procedimento recomendado

Como resultado prático desse projeto de pesquisa, recomenda-se o procedimento de campo descrito abaixo. Ele deve ser adotado nas inspeções

em LADMT-AR, nas classes de 15 kV e de 25 kV. Este procedimento requer instrumentos detectores de ruídos de ultrassons e instrumentos detectores de ruídos de RF.

Passo 1:

Fazer a primeira varredura, à distância, de todo o trecho da LADMT-AR submetido à inspeção. Essa varredura deve ser feita com o auxílio de um veículo se deslocando em estrada que margeie a LADMT-AR. A velocidade do veículo deve ser menor que 40 km/h, e a distância do mesmo em relação ao eixo da LADMT-AR deve ser inferior a 400 m. Para execução dessa varredura deve-se utilizar um instrumento detector de ruídos de RF adequado instalado no teto do veículo. Por exemplo, o detector M-240® [15].

A estrutura (poste) ou região da LADMT-AR (grupo de estruturas consecutivas), que apresentar nível de ruídos mensurável (leitura acima de 0 dB(1 μ V)), deve ser marcada para uma posterior investigação de confirmação.

Passo 2:

Para as estruturas (postes) identificadas no passo 1, fazer varreduras locais em cada estrutura para confirmação da emissão de ruídos elevados. Para execução dessa varredura deve-se utilizar outro tipo de instrumento detector de ruídos de RF. Esses instrumentos são mais adequados para investigação local, por exemplo, os detectores M-242® ou M-330® [15].

A estrutura (poste) que apresentar elevado nível de ruídos deve ser marcada para posterior investigação detalhada.

Passo 3:

Para as estruturas (postes) identificadas no passo 2, fazer uma inspeção detalhada da estrutura. Essa inspeção consiste na medição do nível de ruídos e na consequente identificação do isolador de pino fonte

de ruídos e exige a utilização de instrumento detector de ruídos que seja direcional. Para execução dessa inspeção, deve-se utilizar um instrumento detector de ruídos de ultrassom. Esses instrumentos são adequados para investigação local, por exemplo, os detectores UP-2000® [9] ou M-250® [15]. Essa inspeção deve ser executada da seguinte maneira:

O inspetor deve se posicionar nas proximidades do poste (até 2 m da base do poste). A partir do solo, apontar para cima a antena do instrumento detector de ruídos, no sentido dos isoladores de cada fase. Os isoladores que apresentarem nível de ruídos superior a 0 dB(1μV) devem ser identificados.

Para os isoladores identificados, deve-se anotar em formulário apropriado o nível de ruídos medido e a localização física do isolador de pino, na LADMT-AR.

Passo 4: (opcional)

Caso ocorram dúvidas no passo 3, em relação a qual fase que apresenta nível de ruídos (ou mesmo o isolador), podem-se usar instrumentos detectores de ruídos de ultrassom, para pequenas distâncias. Esse instrumento pode ser levado até bem próximo do corpo do isolador (distância mínima de 10 cm, em relação ao isolador).

Geralmente é necessário o auxílio de outras ferramentas para aproximar o instrumento detector de ruídos no sentido do isolador suspeito de ser a fonte de ruídos. Para execução dessa inspeção utiliza-se um instrumento detector de ruídos de ultrassom, por exemplo, o detector M-247B® Sniffer® [15].

Essa inspeção deve ser assim executada: o inspetor deve se posicionar próximo ao poste, deve fixar o detector na ponta de um bastão de manobras de comprimento adequado e ajustar o nível de ruídos mínimo do detector para um valor igual a 5 dB(1μV). Em seguida, o detector deve ser aproximado do isolador investigado. Se o inspetor

ouvir ruídos com o instrumento naquela posição, o isolador deve ser identificado e as anotações feitas no formulário próprio.

Pode-se afirmar que a aplicação das técnicas propostas serão as de menores custos se comparadas com as técnicas que utilizam termovisores. Pois, admitindo-se que os custos com as capacitações das duas equipes de campo sejam bem próximos, o que é factível; na comparação entre os custos com as aquisições dos instrumentos, tal afirmativa se mostrará evidente.

Por fim, para corroborar a afirmativa do parágrafo anterior cita-se o exemplo: um conjunto de instrumentos sônicos (semelhante àquele utilizado nessa pesquisa) composto pelos modelos M-242®, M-240®, M-330®, M-250® e M-247B® Sniffer® [15], tem o preço aproximado de R\$20.000,00 (vinte mil reais). Enquanto que um instrumento termovisor modelo T-640® [22] tem o preço aproximado de R\$60.000,00 (sessenta mil reais).

5.4 – Sugestões para pesquisas futuras

Durante quatro anos consecutivos de desenvolvimento dessa pesquisa, mais de 11.000 isoladores foram investigados quanto ao seu desempenho em operação. É uma quantidade inédita para isoladores de porcelana do tipo pino, investigados em um trabalho de pesquisa.

A partir dos resultados obtidos nessa pesquisa, relaciona-se abaixo algumas linhas de investigação que podem servir como sugestões para pesquisas futuras.

- a) Investigar o universo dos isoladores aceitos como unidades sãs (boas). Esse universo foi o responsável pela redução do grau de certeza da técnica na presente pesquisa;
- b) Investigar novas tecnologias associadas à direcionalidade dos instrumentos detectores de ruídos. Esse aspecto se mostrou de grande relevância para identificação precisa do componente fonte de ruídos;
- c) Investigar novas técnicas para serem aplicadas em linhas energizadas com tensão superior a 36,2 kV. Em algumas discussões iniciais acredita-

se ser possível o uso das tecnologias investigadas para tensão de até 145 kV;

- d) Verificar o impacto de se desenvolver conexões e registro automático de ruídos de forma a aplicar técnicas de inteligência artificial para melhorar os processos de identificação e classificação de ruídos.

Por fim, esse autor deixa aqui registrado seu grande interesse em participar de projetos nessa linha pesquisa. Tanto na formulação como na proposição de novos projetos junto a empresas e órgãos governamentais de fomento à pesquisa.

5.5 – Comentários finais

Esse trabalho teve início em 2008. Ele é produto resultante do projeto P&D denominado *Técnicas para Manutenção Preditiva de Isoladores para Redes em Média Tensão*.

O projeto P&D foi concebido a partir da parceria entre a concessionária AES Sul Distribuidora Gaúcha de Energia e o Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá.

•

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Kreuger, F. H.; "Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment". Butterworths, 1989.
- [2] Kuffel, E.; Zaengl, W. S.; Kuffel J.; "High Voltage Engineering: Fundamentals". 2nd ed.; Newnes, Butterworth-Heinemann, 2000.
- [3] Bartnikas, R.; MsMahon, E. J.; "Engineering Dielectrics, v.1 Corona Measurement and Interpretation". ASTM STP 669, 1979.
- [4] König, D.; Narayana, R. Y.; "Partial Discharges in Power Apparatus". Berlin: Vde-Verlag Gmbh, 1993.
- [5] Piah, M. A. M.; Daru, A.; Hassan, A.; "Electrical Tracking Performance of LLDPE-Natural Rubber Blends by Employing Combination of Leakage Current Level and Rate of Carbon Track Propagation". IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation v. 12, No. 6; Dec., 2005.
- [6] Ultrasonom logística. Sítio: www.ultrasom-pe.com.br. Acesso em 08/05/2011.
- [7] Lundgaard, L. E.; "Partial Discharge-Part XIV: Acoustic Partial Discharge Detection-Practical Application". IEEE September/October, v. 8 N^o 5, 1992.
- [8] Jermendy, L.; Simon, S.; "Insulation Diagnostic Methods". IEEE Power Delivery v.2 p.81-85, 1998.
- [9] UE systems Inc. Sítio: www.uesystems.com. Acesso em 26/05/2011.
- [10] Muhlen, S. S.; "Interferência e Compatibilidade Eletromagnética". Alemanha 2002.
- [11] Instruction Manual Model M-330® Mini RFI Locator; RADAR Engineers – 2006.
- [12] Loftness, M.; "AC Power Interference Handbook". 2nd Edition, Tumwater, Percival Technology, 2003.
- [13] Dutta, P.K. ; Duttagupta, P.B; "Novel signal processing techniques for fault detection and location in HV sub transmission and transmission lines". IEEE 2nd International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management (APSCOM -93), Hong Kong (China), p.673-678, 7-10 Dez., 1993.
- [14] Kannus, K.; Lehtio, A.; Lakervi, E.; "Radio and TV Interference Caused by Public 24 kV Distribution Networks". IEEE Transactions on Power

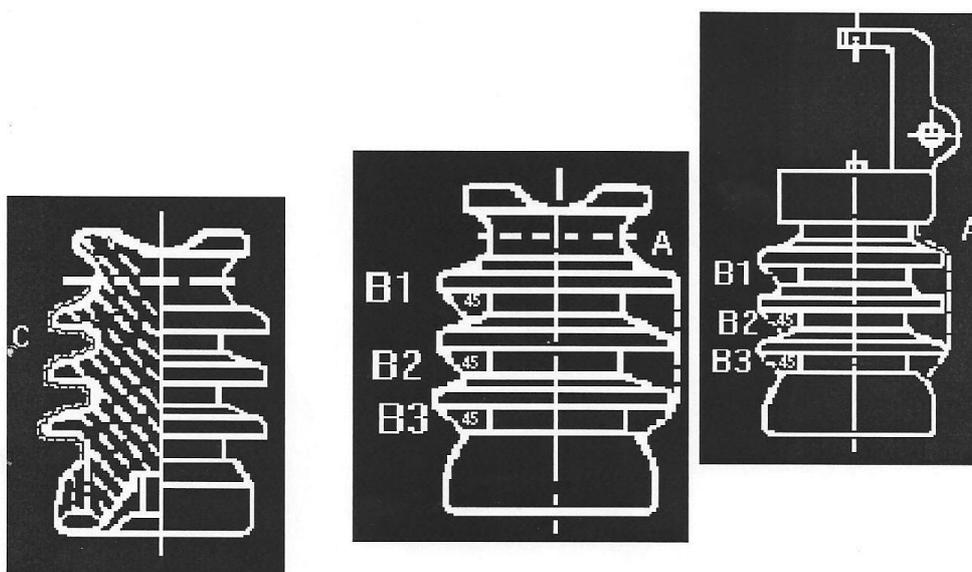
- Delivery, v.6, p.1856-1861 No.4, Oct., 1991.
- [15] RADAR engineers. Sítio: www.radarengineers.com. Acesso 29/05/2011.
- [16] Instruction Manual Ultra Probe 2000®; UE Systems Inc. – 2006.
- [17] Norma Inspeção de redes de distribuição aéreas de 15 kV e 34,5 kV – COELBA – 2009.
- [18] ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica; “Manual de Fiscalização da Distribuição”; pagina 79; ANEEL - 2003.
- [19] Lutron electronic Inc. Sítio: www.lutron.com. Acesso em 14/10/2007.
- [20] Norma brasileira NBR 6936 – Técnicas de ensaios elétricos de alta-tensão.
- [21] Norma brasileira NBR 5032 – Isoladores para linhas aéreas com tensões acima de 1.000 V – Isoladores de porcelana ou vidro para sistemas de corrente alternada.
- [22] Flir systems Brasil. Sítio: www.flir.com/br. Acesso em 18//04/2011.
-

ANEXOS

Anexo 1 – Figuras normativas.

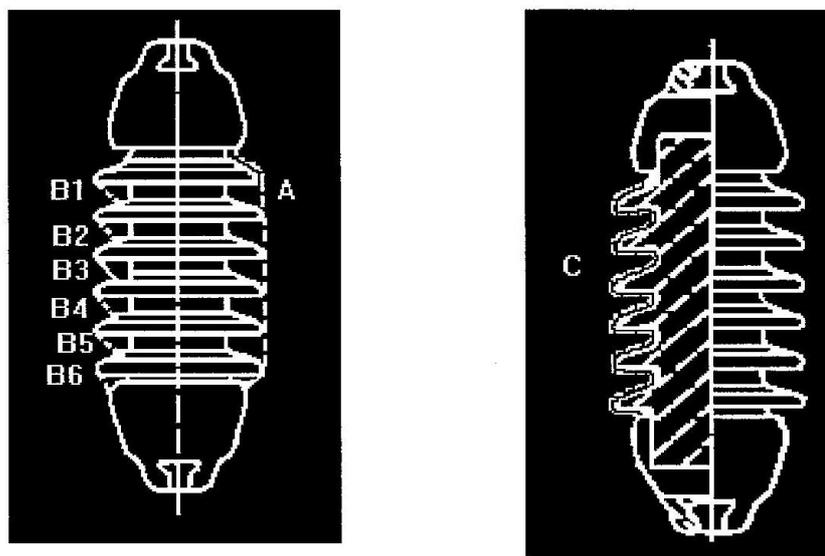
Anexo 2 – Procedimentos para o ensaio de tensão aplicada na frequência industrial, sob chuva.

•
G
• •



Distância de escoamento: C
 Distância de descarga a seco: A
 Distância de descarga sob chuva: $B1 + B2 + B3$

Figura A.2 — Verificação dimensional do isolador-pilar



Distância de escoamento: C
 Distância de descarga a seco: A
 Distância de descarga sob chuva: $B1 + B2 + B3 + B4 + B5 + B6$

Figura A.4 — Verificação dimensional do isolador-bastão

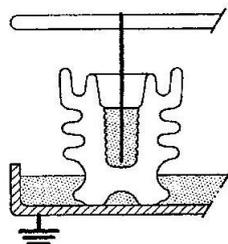


Figura A.9 — Montagem para ensaio elétrico de rotina em isoladores de pino

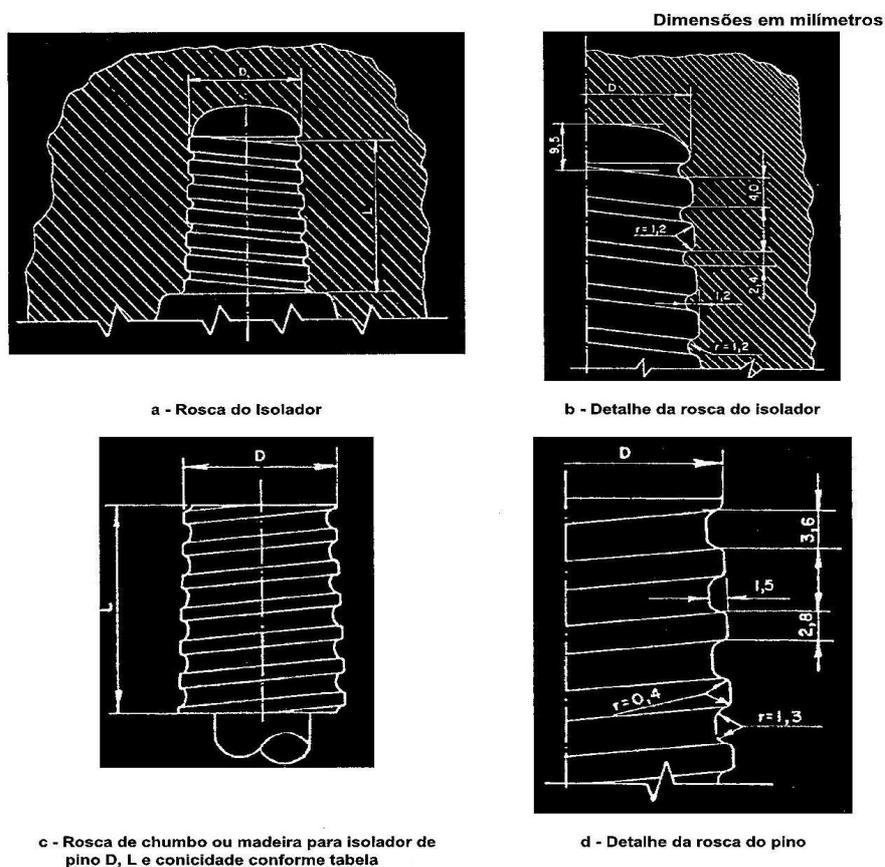


Tabela – Dados da rosca de chumbo ou madeira

D - Nominal	25 mm	35 mm
D - Real	25,4 mm	34,9 mm
L - Mínimo	40 mm	45 mm
Número mínimo de voltas	2	3
Conicidade nominal	1:16	1:16
Passo de rosca	6,4 mm	6,4 mm

Figura A.11 — Rosca no isolador

1. Preparação para o ensaio:

a) Deve-se configurar a pressão dos canos e o posicionamento dos furos afim de produzir chuva a um ângulo de aproximadamente 45° em relação ao solo e que a precipitação da chuva esteja entre 1 e 2 mm/min.

b) A água para este ensaio deve ser água tratada, ou seja, da forma como é recebida pela concessionária de água e esgoto (copasa). É interessante que seja feita uma limpeza da caixa d'água ao iniciar uma bateria de ensaios de forma a garantir a qualidade da água.

2. O ensaio:

O isolador deve ser montado sobre um pino metálico aterrado, vertical, com superfície lisa e com diâmetro não inferior a 16 mm. O pino deve ter comprimento suficiente para assegurar que o isolador fique instalado a pelo menos 1 m do chão. Nenhum outro objeto deve ficar a uma distância menor que 1,5 vezes a altura do isolador ou pelo menos 1 m. Um condutor com diâmetro mínimo de 5 mm e comprimento mínimo de quatro vezes a altura do isolador mais um diâmetro da saia superior, deve ser amarrado ao pescoço do isolador por meio de um fio de diâmetro mínimo de 1 mm. Esse fio deve ser enrolado sobre o condutor por uma extensão mínima de um diâmetro da saia superior, de cada lado do pescoço. Se o isolador dispuser de grampo para fixação do condutor, com o comprimento citado anteriormente e de diâmetro adequado deve ser preso ao grampo. A tensão de ensaio deve ser aplicada entre o condutor e a malha de terra. A figura 1 abaixo mostra um isolador preparado para o ensaio.

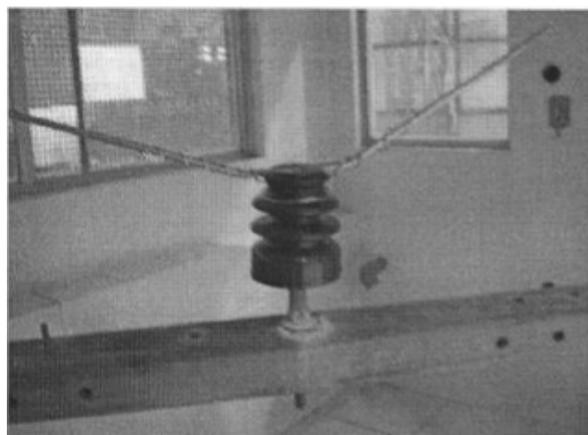


Figura 1 – Isolador pronto para ensaio

3. A tensão aplicada entre o condutor e a terra é dada pela equação de correção:

$$U_{aplicado} = U_{normalizado} \times 0,386 \times \frac{P_{local}}{(273 + T_{local})}$$

Onde:

- $U_{aplicado}$ é a tensão corrigida aplicada ao isolador;
- $U_{normalizado}$ é a tensão nominal do item;
- P_{local} é a pressão atmosférica local em milímetros de mercúrio – [mmHg];
- T_{local} é a temperatura ambiente em °C.

4. Eleva-se a tensão condutor-terra de forma a atingir a tensão previamente calculada e, a partir desta tensão alcançada, marca-se 1 min no cronômetro. Se ao final deste minuto o isolador não permitir um fluxo de corrente que atue a proteção do equipamento ele é aprovado. Caso contrário, será reprovado.

•