

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
Centro Tecnológico
Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial

**UMA CONTRIBUIÇÃO À CONFIABILIDADE
METROLÓGICA DE ENSAIOS EM ALTA TENSÃO DE
EQUIPAMENTOS DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO
DE ENERGIA ELÉTRICA**

**Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina
para obtenção do Grau de Mestre em Metrologia**

Autor: Cesar Alberto Penz

Orientador: Carlos Alberto Flesch, Dr. Eng.

Florianópolis, 20 de outubro de 2004.

UMA CONTRIBUIÇÃO À CONFIABILIDADE METROLÓGICA DE ENSAIOS EM ALTA TENSÃO DE EQUIPAMENTOS DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Cesar Alberto Penz

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de

Mestre em Metrologia

e aprovada na sua forma final pelo

Programa de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial.

Prof. Carlos Alberto Flesch, Dr. Eng.
Orientador

Prof. Marco Antonio Martins Cavaco, Ph. D.
Coordenador do Curso de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial

Banca Examinadora:

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Frank Hrebabetky, Dr. Rer. Nat.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Hari Bruno Mohr, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Aos meus pais
Ernani Penz (in memoriam)
Jussara Maria Silvestrin Penz

AGRADECIMENTOS

- Aos meus pais, Ernani (*in memoriam*) e Jussara, pelo amor, apoio, dedicação e por terem proporcionado as condições para eu chegasse até aqui.
- À Nona Sara, o Nono Cesar, à Vó Joana pelo amor dedicado e pela presença nos momentos felizes e difíceis.
- À Madi, o Leo e a Paulinha e todo esse tempo de convivência.
- Aos amigos do Labmetro, Jana, Gemaque, Cesare (Sânia), Gui, Ribeiro (Dalva), Cristiano (Tchê), Sutério (Elaine, Dali e Nati), Matias, Alex (Ana e Rafael), Luciana, Bel (Flávio), Danilo, André (Melissa), Coral, Jaison, Xavier.
- À Turma 2002.
- Ao meu orientador Carlos Alberto Flesch, pela orientação e incentivo para continuidade do trabalho.
- À Telma Pereira Lenzi, que me ajudou a encarar a vida de maneira mais tranqüila.
- Às Turmas 2001, 2003 e 2004 pelas conversas e conhecimentos compartilhados.
- Ao Labmetro, seus coordenadores e corpo docente, pela maneira que me receberam e sua infra-estrutura que proporcionou o êxito no desenvolvimento deste trabalho.
- Ao pessoal do Laboratório de Alta Tensão da Eletrosul, Roberto, Valci, Elgídio, Juliano e Jefferson pelos ensinamentos nessa área da engenharia com a qual nunca havia tido contato.
- À Rosana, pelo seu profissionalismo.

RESUMO

Ensaio de equipamentos em alta tensão representam significativa fatia das atividades inerentes à garantia da confiabilidade nos sistemas de transmissão de energia elétrica. A garantia da conformidade dos equipamentos avaliados é totalmente dependente da confiabilidade dos resultados obtidos. A cultura metrológica espalhada pelos procedimentos e normas concernentes à área está muito aquém do estado-da-arte em metrologia. Na maioria dos casos a incerteza de medição é sequer citada. Mostra-se então a necessidade de um estudo e avaliação das atividades relativas aos laboratórios de alta tensão, em busca da confiabilidade necessária.

O presente trabalho sistematiza a aplicação dos atuais conceitos metrológicos e da qualidade, extraídos de documentos consolidados, para posterior inserção, implementação e avaliação num ensaio em alta tensão. Tais documentos são referências nas áreas: metrologia elétrica; qualidade; certificação; tecnologia da alta tensão.

São identificadas e analisadas as principais dificuldades para a garantia metrológica de ensaios em alta tensão, nos aspectos: avaliação e gerenciamento de incertezas; equipamentos, processos e procedimentos de medição. São propostas ações para garantia da confiabilidade metrológica e avaliação segura da conformidade dos equipamentos ensaiados.

É apresentado um estudo de caso referente à calibração de transformadores de potencial, que demonstra a aplicabilidade dos resultados do trabalho numa situação real, num laboratório de ensaios em alta tensão.

ABSTRACT

High-voltage tests on equipments represent a significant portion of inherent activities to guarantee the reliability of electrical energy transmission systems. The conformity assessment of evaluated equipments is entirely dependent on results reliability. The metrological culture disseminated through relative procedures and standards is not compatible with the state of art in metrology. In many cases the measurement uncertainty is not quoted. This situation reveals the necessity of evaluation of activities related to high-voltage laboratories in search for the required reliability.

The present dissertation systemizes the application of current metrological and quality concepts. These concepts are extracted from consolidated documents for insertion, implementation and evaluation in a high-voltage test. Such documents are references in knowledge areas as: electric metrology; quality; certification; high-voltage technology.

The main difficulties are identified and analyzed for the metrological guarantee of high-voltage test in aspects as: evaluation and management of uncertainties; measurement equipment, processes and procedures. Actions are proposed for guarantee of metrological reliability and safe conformity assessment of tested equipments.

A high-voltage potential transformer calibration is presented and analyzed. In this way, the applicability of the results of this work is demonstrated in a real high-voltage test laboratory.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comportamento da performance de equipamentos frente ao tempo de utilização, adaptada de GOCKENBACH (1999).....	15
Figura 2 - Exemplo de um equipamento utilizado em subestações	21
Figura 3 - Forma de onda de impulso de tensão tipo manobra.....	24
Figura 4 - Exemplos de respostas impulsivas de equipamentos.....	25
Figura 5 - Influência da incerteza de medição nos limites de especificação	34
Figura 6 - Descrição das regiões e definição dos novos limites de conformidade	35
Figura 7 - Relação da documentação do sistema proposto	39
Figura 8 - Fluxograma do PUMA para definição do processo de medição	46
Figura 9 - Fluxograma resumo do método de avaliação de incertezas apresentado pelo ISO-GUM.....	49
Figura 10 - Fluxograma do PUMA para um processo de medição definido	54
Figura 11 - Componentes típicos de especificações de equipamentos de medição .	56
Figura 12 - Requisitos de procedimentos comentados em relação aos ensaios de alta tensão	65
Figura 13 - Classes de exatidão e aplicações típicas de transformadores de potencial	71
Figura 14 - Paralelogramo que delimita os erros de TP para as diversas classes	71
Figura 15 - Incerteza de medição máxima para cada classe de exatidão.....	72
Figura 16 - Diagrama esquemático do padrão coletivo de transformação	74
Figura 17 - Diagrama do princípio de funcionamento do comparador eletrônico	74
Figura 18 - Aproximações utilizadas pelo comparador eletrônico	75
Figura 19 - Diagrama esquemático do circuito de calibração.....	76
Figura 20 - Equipamentos de medição utilizados na calibração.....	76
Figura 21 - Levantamento geral das fontes de incerteza	79
Figura 22 - Relação entre as faixas de medição e resolução.....	82
Figura 23 - Dados de calibração para avaliação de incertezas de medição	84
Figura 24 - Estimativa da incerteza padrão de k_C	84
Figura 25 - Estimativa da incerteza expandida para a calibração do transformador classe 1,2%	85

Figura 26 - Estimativa da incerteza expandida para a calibração do transformador classe 0,3%	86
Figura 27 - Resultados da medição inseridos nos paralelogramos das classes	87
Figura 28 - Comparação dos valores de incerteza de medição estimados e máximos	88
Figura 29 - Dados da calibração do TP Tettex	95
Figura 30 - Nova estimativa da incerteza padrão de k_C	96
Figura 31 - Estimativa da incerteza padrão de C_1	97
Figura 32 - Resultados da medição inseridos nos paralelogramos das classes para nova contribuição de C_1	97
Figura 33 - Novos valores de incerteza para calibração de transformadores	98

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Alternating Current
BIPM	Bureau International des Poids et Mesures
CONMETRO	Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade
EA	European Co-operation for Accreditation
FCR	Fator de Correção de Relação
GPS	Geometrical Products Specifications
GUM	Guia para a Expressão da Incerteza de Medição
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFCC	International Federation of Clinical Chemistry
ILAC	International Laboratory Accreditation Cooperation
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
ISO	International Organization for Standardization
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry
IUPAP	International Union of Pure and Applied Physics
LIE	Limite Inferior de Especificação
LSE	Limite Superior de Especificação
OIML	International Organization of Legal Metrology
PUMA	Procedure for Uncertainty Management
SINMETRO	Sistema Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
SQL	Sistema da Qualidade Laboratorial
TP	Transformador de Potencial
VIM	Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Cenário atual do setor de transmissão de energia elétrica frente à confiabilidade dos equipamentos inerentes	13
1.2	Proposta de trabalho	16
1.2.1	<i>Elementos motivadores</i>	16
1.2.2	<i>Objetivos</i>	17
1.2.3	<i>Método de abordagem</i>	18
1.3	Estrutura da dissertação	18
2	ENSAIOS EM ALTA TENSÃO DE EQUIPAMENTOS DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	20
2.1	Generalidades	20
2.2	Ensaio em tensão direta	23
2.3	Ensaio em tensão impulsiva	23
2.4	Ensaio em tensão alternada	26
2.5	Outros ensaios	26
2.6	Incentivadores para uma abordagem metrológica e sistêmica dos ensaios em alta tensão	27
3	ESTRUTURAÇÃO DE UM SISTEMA PARA GARANTIA DA CONFIABILIDADE DE ENSAIOS EM ALTA TENSÃO	30
3.1	Conceitos	30
3.1.1	<i>Garantia da qualidade</i>	30
3.1.2	<i>Garantia da qualidade metrológica</i>	30
3.1.3	<i>Confiabilidade metrológica</i>	31
3.1.4	<i>Avaliação da conformidade</i>	31
3.2	Avaliação da conformidade de equipamentos	31
3.2.1	<i>Normatização</i>	32
3.2.2	<i>Metrologia</i>	33
3.2.3	<i>Estabelecimento de limites de conformidade</i>	34
3.2.4	<i>Demonstração da competência laboratorial</i>	36

3.3 Proposta de sistema de garantia da confiabilidade de ensaios em alta tensão	38
3.3.1 <i>Balizamento documental do sistema proposto</i>	38
3.3.1.1 Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia - VIM	39
3.3.1.2 Guia para expressão da incerteza da medição - ISO GUM	40
3.3.1.3 Técnicas de ensaio em alta tensão - IEC 60 - parte 1: definições gerais e requisitos de ensaios	41
3.3.1.4 Técnicas de ensaio em alta tensão - IEC 60 - parte 2: sistemas de medição	41
3.3.1.5 Técnicas de ensaio em alta tensão - IEEE 4	42
3.3.1.6 Normas de equipamentos e específicas de ensaios	42
3.3.1.7 Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração - NBR ISO/IEC 17025	43
3.3.1.8 Sistemas de gerenciamento de medição - Requisitos para processos e equipamentos de medição - ISO 10012	44
3.3.1.9 Especificações de produtos geométricos (GPS) - Inspeção por medição de peças e equipamentos de medição - ISO 14253	44
3.3.2 <i>Propostas de ações voltadas à garantia da confiabilidade metrológica de ensaios em alta tensão</i>	45
3.3.2.1 Definição de processos de medição	45
3.3.2.2 Avaliação e gerenciamento de incertezas de medição	48
3.3.2.3 Garantia da confiabilidade metrológica de equipamentos de medição	57
3.3.2.4 Procedimentos de medição	64
4 CONFIABILIDADE NA CALIBRAÇÃO DE TRANSFORMADORES DE POTENCIAL	69
4.1 Caracterização do ensaio	70
4.1.1 <i>Aspectos relativos à avaliação de conformidade dos transformadores</i>	70
4.1.2 <i>Aspectos relativos ao processo de medição</i>	73
4.1.2.1 Descrição do circuito de calibração	73
4.1.2.2 Modelagem da calibração	77
4.2 Contribuições específicas à confiabilidade metrológica	78
4.2.1 <i>Avaliação da incerteza de medição</i>	78
4.2.1.1 Levantamento geral de fontes de incerteza e equacionamento da incerteza padrão	78
4.2.1.2 Fontes de incerteza consideradas	80
4.2.1.3 Fontes de incerteza não consideradas	82
4.2.1.4 Composição das incertezas	83
4.2.2 <i>Situação atual da avaliação de conformidade e ações para redução da incerteza de medição</i>	86
4.2.2.1 Situação atual da avaliação da conformidade de transformadores de potencial	87
4.2.2.2 Ações para redução da incerteza de medição	89

4.2.3	<i>A nova situação da avaliação da conformidade de transformadores de potencial</i>	97
4.2.4	<i>Rastreabilidade</i>	98
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	102
5.1	Aspectos relativos à confiabilidade de ensaios em alta tensão	102
5.2	Aspectos relativos à confiabilidade metrológica da calibração de transformadores de potencial	105
5.3	Propostas para trabalhos futuros	106
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108

1 INTRODUÇÃO

1.1 Cenário atual do setor de transmissão de energia elétrica frente à confiabilidade dos equipamentos inerentes

A geração, transmissão e a distribuição da energia elétrica são personagens ativas da sociedade industrializada moderna. A dependência à energia elétrica é cada vez mais latente, sendo sua falta prejudicial à praticamente todos os setores da economia e sociedade usuária.

O setor de energia elétrica tem uma característica própria: produz uma mercadoria que não pode ser armazenada a baixo custo e em grande escala, tendo de ser consumida no momento em que é gerada. Esse é um fato que interliga, diretamente, a geração, transmissão e a distribuição de energia elétrica, sendo fundamentais a eficiência e a confiabilidade na qualidade e na coordenação do sistema elétrico (ABREU, 1999).

As mudanças maciças no setor elétrico seguida pelo processo de privatização impactam de forma ainda mais forte no mercado de energia elétrica e conseqüentemente no nível de exatidão dos processos de medição inerentes (NPL, 2000).

Além da questão econômica, maximizada pela atividade de compra e venda, a confiabilidade do sistema de transmissão de energia elétrica também reflete nos custos das empresas.

No novo ambiente regulatório, institucional e organizacional do setor elétrico brasileiro, os encargos dos novos contratos de prestação dos serviços de transmissão são definidos com base na disponibilidade das instalações da rede de

propriedade da empresa de transmissão (PASQUA, 2001; SIQUEIRA, 2001; MOTTA, 2003).

A garantia de continuidade do fornecimento de energia elétrica passa, necessariamente, por equipamentos e instalações com alta disponibilidade e confiabilidade operativa. Ou seja, as usinas geradoras, os sistemas de transmissão e de distribuição de energia elétrica devem apresentar alta disponibilidade e confiabilidade operativa. Neste contexto, a função manutenção assume um papel estratégico: contribuir para as necessárias disponibilidade e confiabilidade do sistema através da garantia de utilização de equipamentos adequados (MAGALHÃES, 1993; CARNEIRO, 1999; PASQUA, 2001; SERMARINI, 2001; MOTTA, 2003; SANTOS, 2003).

A performance dos equipamentos decai com o tempo de utilização. Um programa de manutenção preventiva pode atuar garantindo que esse desempenho seja mantido em níveis adequados (GOCKENBACK, 1999).

A figura 1 exemplifica dois comportamentos da performance de um equipamento frente à realização de manutenção preventiva:

(1) quando a programação da manutenção é obtida em níveis de performance distintos, nesse caso fica evidente a falta de controle sobre a confiabilidade do equipamento e, conseqüentemente, do sistema em que esse é empregado;

(2) quando a programação da manutenção é feita de forma a garantir que os equipamentos ainda estejam dentro dos limites de desempenho adequados. Requer um conhecimento aprofundado do sistema de diagnóstico e do comportamento dos equipamentos (GOCKENBACK, 1999).

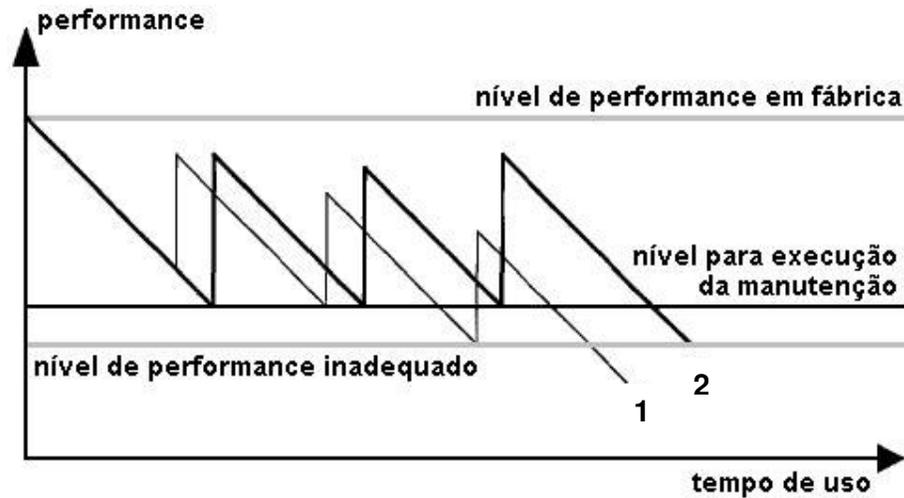


Figura 1 - Comportamento da performance de equipamentos frente ao tempo de utilização, adaptada de GOCKENBACH (1999)

As atividades de manutenção de equipamentos do sistema de transmissão são caracterizadas basicamente por dois processos distintos:

- restauração – na qual é avaliado o estado geral do equipamento e feita a troca de peças, tratamento do dielétrico, reconstrução de partes danificadas, entre outros;
- ensaios elétricos – que é a verificação da conformidade às especificações do equipamento. Tipicamente é feito o diagnóstico do sistema de isolamento do equipamento e medição de outros parâmetros característicos.

Desde que há um considerável interesse na redução dos riscos de falhas, muito tempo e esforço têm sido investidos com o objetivo de redução desses riscos. Em várias partes do mundo são formados grupos de pesquisa que se envolvem no desenvolvimento de técnicas de ensaio, construção e avaliação dos componentes presentes em sistemas de alta tensão. E é neste momento que se apresenta uma

questão importante nesta área: a estruturação do laboratório de alta tensão (STILLMAN, 1997).

O investimento num sistema para avaliação dos equipamentos, isto é, um laboratório para ensaios em alta tensão, é plenamente justificável frente aos custos das falhas decorrentes da falta de ensaios (GOCKENBACH, 1999).

Surgem nos ensaios elétricos as atividades nas quais o domínio das práticas metrológicas busca uma correta estimativa das condições dos equipamentos.

De posse de resultados, metrologicamente confiáveis, de ensaios elétricos, químicos e dados históricos, as equipes de avaliação de equipamentos são capazes de aprovar ou reprovar a liberação desses com segurança. Essa segurança na avaliação de um equipamento contribui para os níveis de confiabilidade e disponibilidade pretendidos pelas empresas de transmissão de energia elétrica.

O presente trabalho se enquadra nesse contexto de aplicação dos conceitos metrológicos e contribuição para a confiabilidade dos ensaios realizados em equipamentos do sistema de transmissão de energia elétrica.

1.2 Proposta de trabalho

O presente trabalho se propõe a sistematizar uma abordagem dos ensaios em alta tensão de equipamentos do sistema de transmissão de energia elétrica visando garantir a qualidade dos resultados por esses obtidos.

1.2.1 Elementos motivadores

A situação atual da metrologia na alta tensão impulsiona à pesquisa e sistematização de ações. A cultura metrológica espalhada pelos procedimentos e normas concernentes à área está muito aquém do estado-da-arte em metrologia e confiabilidade metrológica. Mostra-se então a necessidade de um estudo e avaliação

das atividades relativas ao laboratório de alta tensão, em busca da confiabilidade necessária.

Nota-se que a aplicação dos conhecimentos metrológicos contribuem significativamente em algumas frentes:

- conhecimento do sistema de diagnóstico de equipamentos;
- conhecimento do comportamento dos equipamentos ensaiados;
- confiança na liberação de equipamentos para uso.

Os ensaios que serão contemplados pelo trabalho estão ligados diretamente com equipamentos pertencentes aos sistemas de proteção, de monitoração e de medição para faturamento de empresas de transmissão de energia elétrica.

Os resultados alcançados podem ser empregados em empresas do setor elétrico e por empresas ligadas à fabricação e à manutenção de equipamentos.

1.2.2 Objetivos

- Diagnóstico dos principais problemas presentes na realização de ensaios de alta tensão;
- Estudo das principais fontes de incerteza;
- Avaliação das incertezas em ensaios típicos;
- Proposição de alternativas para melhoria dos resultados de ensaios;
- Adequação dos processos ao sistema da qualidade baseado na norma NBR ISO/IEC 17025;
- Estabelecimento de ações para garantia da confiabilidade metrológica de ensaios de alta tensão.

1.2.3 Método de abordagem

Sistematização dos conceitos metrológicos e da qualidade, extraídos de documentos consolidados, e posterior inserção, implementação e avaliação num ensaio em alta tensão.

Tais documentos são referências de áreas como: metrologia elétrica; sistemas de qualidade; sistemas de certificação; tecnologia da alta tensão. Esses balizam um sistema para garantia da confiabilidade dos ensaios, com foco na qualidade metrológica dos resultados.

Formado o balizamento tem-se a análise de um processo de medição com proposição de ações para garantia da confiabilidade metrológica e conseqüente confiabilidade do ensaio. Tal análise compõe-se de: caracterização do ensaio; avaliação do método e equipamentos empregados; avaliação das incertezas envolvidas; proposição e avaliação de alternativas para redução dos níveis de incerteza e garantia da confiabilidade metrológica; implementação e avaliação das recomendações estabelecidas; documentação formal.

1.3 Estrutura da dissertação

No capítulo 2 são apresentados os conceitos básicos relacionados aos equipamentos utilizados nos sistemas de transmissão de energia elétrica, os tipos de ensaios e suas particularidades.

No capítulo 3 é apresentado o balizamento documental no qual estão calcadas as ações do sistema. Em seguida são apresentadas a análise de aspectos ligados diretamente à garantia da qualidade metrológica e a contribuição dos documentos vistas as particularidades dos ensaios em alta tensão.

No capítulo 4 é apresentado o estudo de caso relativo à calibração de transformadores de potencial onde são realizadas: avaliação do método e

equipamentos empregados; avaliação das incertezas envolvidas; proposição e avaliação de alternativas para redução dos níveis de incerteza, garantia da confiabilidade metrológica e avaliação segura da conformidade desses equipamentos.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões e considerações finais deste trabalho destacando aspectos relativos à confiabilidade de ensaios em alta tensão em geral e à calibração de transformadores de potencial. São apresentadas também propostas para futuros trabalhos.

2 ENSAIOS EM ALTA TENSÃO DE EQUIPAMENTOS DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Ensaiai é determinar uma ou mais características, de um equipamento ou material, de acordo com um procedimento (ISO, 2000). Desta forma, um ensaio pode ser utilizado na avaliação de equipamentos novos, na manutenção de equipamentos usados ou como suporte para o desenvolvimento de novos sistemas (MORGAN, 1988).

Os equipamentos do sistema de transmissão de energia elétrica, tais como transformadores, disjuntores e buchas, são submetidos a uma série de ensaios elétricos.

Neste capítulo, são apresentadas características típicas desses equipamentos. São expostos também os principais tipos de ensaios realizados em equipamentos presentes nos sistemas de transmissão de energia quanto às formas convencionais de alta tensão que são: tensão alternada, tensão direta e tensão transitória ou impulsiva.

Visando demonstrar as peculiaridades presentes nos ensaios em alta tensão, são também apresentadas considerações quanto a fatores de influência, tais como: condições ambientais; montagem dos circuitos de ensaios; diversidade de equipamentos.

2.1 Generalidades

Os equipamentos presentes nos sistemas de transmissão de energia são projetados para suportarem os níveis de tensão de serviço (de dezenas a centenas

de quilovolts) e sobretensões que podem chegar, por exemplo, a três¹ vezes o valor de pico dessa tensão, em surtos de curta duração. O sistema de isolamento desses equipamentos deve apresentar, então, alta confiabilidade.

O sistema é composto basicamente por um dielétrico interno (sólido, líquido ou gasoso) e o isolador externo (porcelana, materiais poliméricos, entre outros). A figura 2 mostra um diagrama simplificado de um transformador de corrente, no qual são identificados os enrolamentos e os componentes da isolação, e uma foto para ilustração geral.

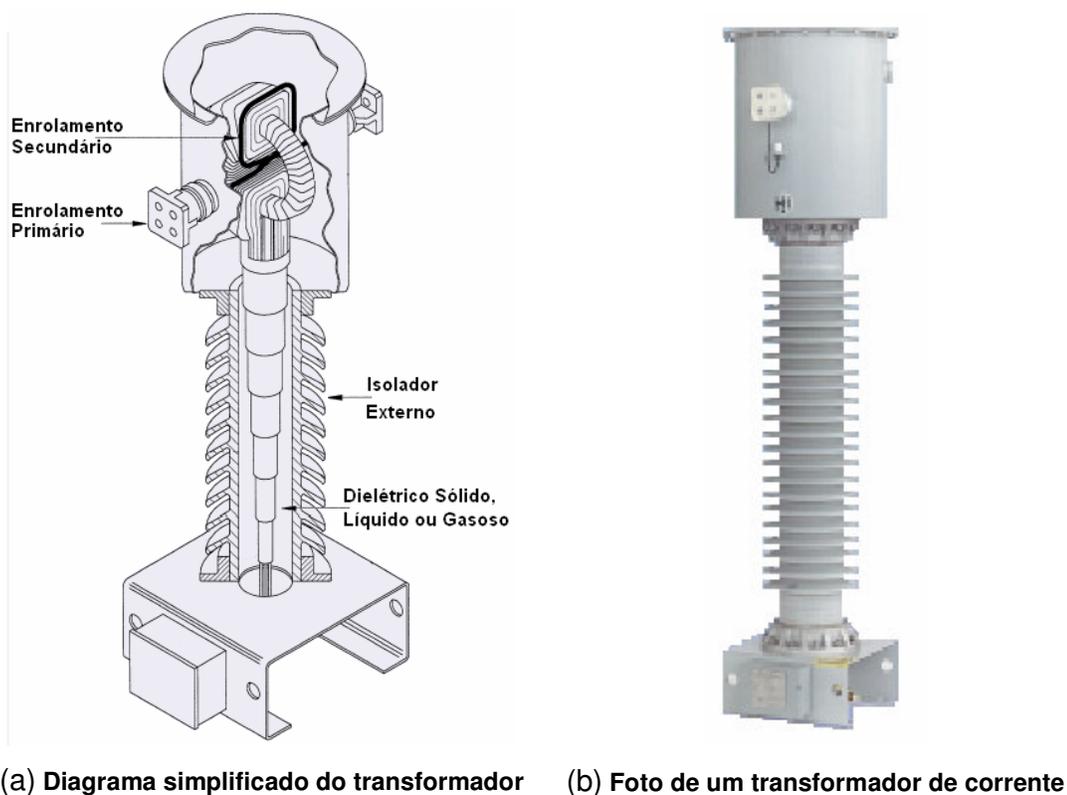


Figura 2 – Exemplo de um equipamento utilizado em subestações

¹ O fator 3 (aproximado) é referente a um equipamento projetado para trabalhar com tensão eficaz nominal de 145 kV (205 kV de pico) em que o isolamento deve suportar por um curto intervalo de tempo (alguns microssegundos) uma tensão de 650 kV (ABNT, 1992b).

As tensões normais de operação não estressam a isolação de alta tensão. Apenas em situações especiais, como condições de poluição e deterioração pelo tempo de uso, essas tensões causam problemas (MORGAN, 1988). No caso da deterioração, a manutenção seguida pelos ensaios de alta tensão contribui para a confiabilidade do equipamento.

Segundo MORGAN (1988), ensaio em alta tensão é qualquer ensaio no qual o gradiente do campo elétrico é suficiente para avaliar as propriedades do sistema de isolação e sua influência no desempenho do equipamento.

A partir dessa definição os objetivos dos ensaios podem ser vistos de forma simplificada como:

- avaliar o sistema de isolação do equipamento - por exemplo, medição do fator de perdas dielétricas;
- avaliar o desempenho da função a que este equipamento se destina - por exemplo, um transformador de potencial (TP) tem a função de prover a um instrumento (relé, amperímetro, medidor de energia, entre outros) um sinal de tensão, de amplitude reduzida por um fator conhecido. Num ensaio deve-se avaliar o erro que existe na relação de transformação do TP e compará-lo com sua especificação.

A calibração que se apresenta na atividade de alta tensão está normalmente ligada aos transformadores para instrumentos utilizados nos sistemas de transmissão de energia elétrica. Os chamados erros de relação e fase (MEDEIROS FILHO, 1990) destes são características próprias e devem ser determinadas. Portanto, a aplicação do termo ensaio é válida e apropriada.

2.2 Ensaios em tensão direta

Tensões diretas eram utilizadas principalmente para pesquisa científica na investigação fundamental do comportamento dos dielétricos (KIND, 1978). Nos últimos vinte anos, um grande desenvolvimento da tecnologia de transmissão de energia elétrica utilizando tensão direta trouxe novas perspectivas para a aplicação dessa técnica pelas empresas do setor (ANDERSEN, 2000; KATANCEVIC, 2002).

Na indústria, as principais aplicações são (KUFFEL, 1970; KIND, 1978; ZHANG, 1996):

- ensaio de cabos com valor de capacitância elevada, situação em que a utilização de tensões alternadas demandaria alto nível de corrente;
- armazenamento de energia para geração de tensões impulsivas em ensaios de equipamentos em geral;
- ensaios de equipamentos dos sistemas de transmissão de energia elétrica em tensão direta.

Os parâmetros característicos deste tipo de tensão são o valor eficaz e a variação máxima admissível durante a realização de um ensaio (IEC, 1989). A medição de tensões diretas pode ser baseada na utilização de divisores de potencial, normalmente resistivos, juntamente com o instrumento de medição pertinente. Outra maneira é o uso de amperímetro para obtenção da imagem da tensão através da corrente.

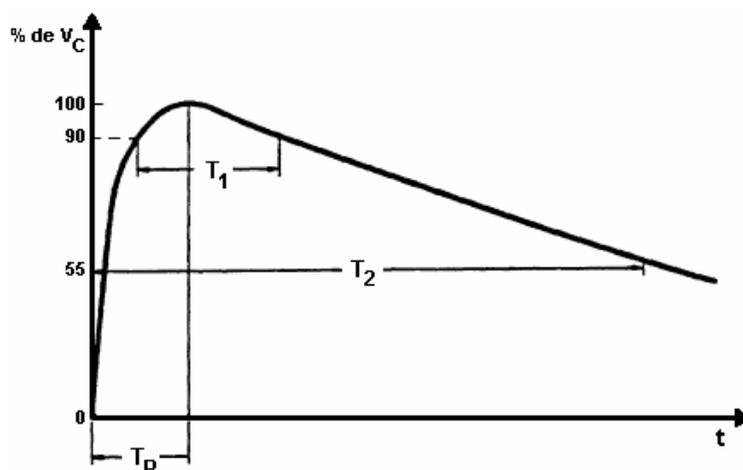
2.3 Ensaios em tensão impulsiva

Os equipamentos pertencentes aos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica estão sujeitos a vários tipos de efeitos transitórios de tensão. Dois desses efeitos são alvos dos ensaios em tensão impulsiva: os gerados por descargas atmosféricas e os gerados por manobras no sistema.

A realização desse tipo de ensaio é basicamente a aplicação de um impulso de tensão com parâmetros conhecidos e observação do comportamento do equipamento. Esse tipo de ensaio é realizado para avaliar tanto o sistema de isolamento quanto o comportamento dinâmico do equipamento (FITZPATRICK, 1996; ZHANG, 1996; BERLIJN, 1999).

A título de ilustração é mostrada na figura 3 uma forma típica de um impulso de tensão do tipo manobra e seus principais parâmetros característicos (IEC, 1989).

Os níveis de tensão estão apresentados como percentuais do valor de crista² (V_C) que o equipamento deve ser submetido. Por exemplo, um transformador de potencial de tensão eficaz nominal de 550 kV (777 kV de pico) pode ser submetido a um ensaio de impulso de manobra de 1300 kV de crista (ABNT, 1992b).



Legenda:

V_C : Valor de crista

T_P : tempo de crista – valor típico de 250 μ s

T_1 : tempo acima de 90%

T_2 : tempo de meia crista – valor típico de 2500 μ s

Figura 3 - Forma de onda de impulso de tensão tipo manobra

² O termo crista é mais adequado que pico em se tratando de tensões impulsivas. Esse se refere ao máximo valor de tensão que o equipamento é submetido.

A figura 4 exemplifica um comportamento hipotético de um equipamento ensaiado com impulso de tensão e analisado o comportamento do dielétrico (LUCAS, 2001).

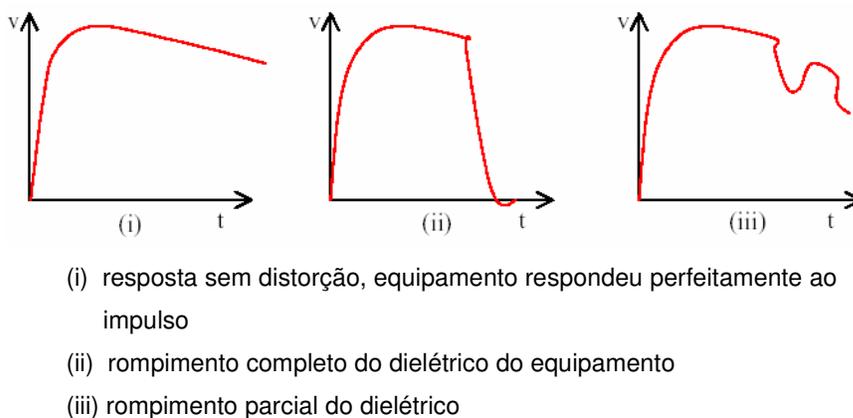


Figura 4 - Exemplos de respostas impulsivas de equipamentos

O sistema de medição é basicamente composto por um divisor de tensão impulsiva e um sistema de aquisição de sinais. Esses dois módulos devem possuir características bastante particulares e adequadas para uma correta obtenção da resposta gerada pelo equipamento sob ensaio.

Os impulsos se caracterizam pela alta taxa de variação de tensão e dessa forma trazem problemas com relação à interferência eletromagnética que podem causar nos instrumentos de medição (RYAN, 1994).

Além das características de compatibilidade eletromagnética, pode-se citar como sendo cruciais na performance destes instrumentos de medição: frequência de amostragem; não-linearidade das bases de tempo e amplitude; indutâncias parasitas inerentes aos cabos que ligam o divisor de impulso ao instrumento; largura de banda do instrumento (IEEE, 1987; CLAUDI, 1998; TANG, 2000; RUNGIS, 2002; HÄLLSTRÖM, 2002).

2.4 Ensaios em tensão alternada

As principais aplicações de tensões alternadas na engenharia de alta tensão estão inseridas na (KUFFEL, 1970; KIND, 1978; RYAN, 1994; LUCAS, 2001):

- avaliação de dielétricos – medição do fator de dissipação, medição de descargas parciais, ensaio de tensão induzida e tensão suportável;
- medição de parâmetros – erros de relação e fase (calibração de transformadores para instrumentos), medição de resistências de enrolamentos, polaridade, impedância de curto-circuito em transformadores e resposta em frequência.

Os parâmetros característicos da tensão alternada são basicamente (IEC, 1989):

- a frequência – 50 Hz ou 60 Hz para ensaios sob frequência industrial; valores mais altos se referem a ensaios de tensão induzida ou resposta em frequência;
- o valor eficaz da tensão – depende do nível de tensão do sistema em que o equipamento opera;
- o valor de pico da tensão – depende do nível de tensão do sistema em que o equipamento opera;

Os métodos mais comuns para medição de altas tensões utilizam divisores resistivos ou capacitivos para a redução da tensão. Isto se faz necessário devido aos equipamentos de medição apresentarem limites de tensão de entrada da ordem de 1000 V.

2.5 Outros ensaios

Outras categorias de ensaios também fazem parte do rol de atividades de laboratórios típicos de alta tensão:

- ensaios em alta corrente – necessários na calibração de transformadores de corrente, avaliação do comportamento térmico e resistência mecânica devido aos campos magnéticos e correntes impulsivas (IEC, 1989; RYAN, 1994; IEEE, 1995);
- ensaios que combinam os tipos citados anteriormente – itens 2.3, 2.2, 2.4 e ensaios de alta corrente – para avaliação de situações com grau de semelhança maior ao que pode ocorrer em campo (IEC, 1989; IEEE, 1995).

2.6 Incentivadores para uma abordagem metrológica e sistêmica dos ensaios em alta tensão

Para garantia da confiabilidade dos ensaios há necessidade de domínio sobre uma ampla gama de dificuldades técnicas que se apresentam na execução desses. Essas dificuldades podem ser entendidas como incentivadores para utilização de uma base de conhecimentos que contribua para obtenção da confiabilidade requerida pelos ensaios.

No caso, deste trabalho, a metrologia e os sistemas de garantia da qualidade formam essa base de conhecimentos.

Neste momento é abordada e comentada uma série dessas dificuldades demonstrando as peculiaridades dos ensaios de alta tensão.

No item 2.1 foram definidos dois objetivos básicos de um ensaio em alta tensão: avaliação da isolamento e avaliação da função do equipamento.

A avaliação da isolamento se destaca por sua alta susceptibilidade às condições ambientais da sala de ensaio. Por exemplo, devido à alteração das condições dielétricas do ar, pode ocorrer uma corrente de fuga em isoladores externos

mascarando uma medida de fator de dissipação. Um caso extremo de umidade elevada pode inviabilizar o ensaio pelo aparecimento de arcos elétricos.

Segundo recomendação da IEC (1989), as salas de ensaio devem apresentar temperatura, umidade relativa e pressão atmosférica o mais próximo possível das condições³ de 20 °C, 65% e 101,3 kPa, respectivamente. A grande dificuldade em se obter tais condições está no alto investimento em sistemas de controle dessas grandezas devido às dimensões das salas de ensaios.

Mais ainda, deve-se evitar a suspensão de qualquer substância no ambiente e a ocorrência de gradiente de temperatura e deve-se garantir baixo deslocamento de ar (HYLTÉN-CAVALLIUS, 1986).

Outro aspecto de forte influência na execução de ensaios em alta tensão é referente à montagem física do circuito (IEC, 1989). Na alta tensão os campos elétricos gerados são muito elevados, podendo influenciar no funcionamento do circuito ou mascarar resultados (HYLTÉN-CAVALLIUS, 1986).

É hábito dos laboratórios de alta tensão a realização de experimentos para determinação do melhor posicionamento dos equipamentos, visando a diminuição das influências dos campos.

Outras características dos ensaios em alta tensão que incentivam uma abordagem metrológica e sistêmica são apresentadas na seqüência (KUFFEL, 1970; KIND, 1978; HYLÉN-CAVALLIUS, 1986; RYAN, 1994; ROBERTS, 1997; ZINGALES, 1999; LUCAS, 2001):

- tensões elevadas estão presentes, dificultando a medição direta e exigindo cuidados especiais de segurança;

³ Tais condições se referem a ensaios definidos como “a seco” (IEC, 1989). Esta distinção é porque as normas prevêm a execução de ensaios sob condições de chuva e poluição e nesses casos estas condições não são aplicáveis.

- elevada susceptibilidade a ruídos internos e externos ao laboratório, especialmente de alta frequência, na avaliação de dielétricos a partir da medição de descargas parciais;
- equipamentos são de grande porte, pela necessidade de garantir a isolamento, fato que impõe severas restrições à experimentação;
- disposição física dos elementos do circuito exige ligações com cabos que impõem relação de impedâncias com influência significativa;
- capacitâncias parasitas entre equipamentos e entre esses e a instalação física, são de valor bastante significativo;
- grande quantidade e diversidade de equipamentos, com variadas classes de tensão, requer grande diversidade de formas de preparação e montagem dos circuitos. Essa necessidade implica abordagens muitas vezes específicas para cada equipamento.

3 ESTRUTURAÇÃO DE UM SISTEMA PARA GARANTIA DA CONFIABILIDADE DE ENSAIOS EM ALTA TENSÃO

Além de demonstrar a integridade e o nível de implantação de um sistema da qualidade, os laboratórios devem, formal e preliminarmente, apresentar evidências de competência técnica para que os resultados de ensaios sejam dotados de confiabilidade.

Este capítulo apresenta os principais temas que devem ser abordados para que a confiabilidade dos ensaios em alta tensão seja garantida. As particularidades dos ensaios em alta tensão são consideradas em aspectos como: avaliação de incertezas de medição; confiabilidade metrológica de equipamentos de medição; processos e procedimentos de medição em alta tensão.

3.1 Conceitos

3.1.1 Garantia da qualidade

Conjunto de atividades planejadas e sistemáticas, implementadas no sistema da qualidade e demonstradas como necessárias, para prover confiança adequada de que a entidade atenderá os requisitos para a qualidade (ISO, 1994).

3.1.2 Garantia da qualidade metrológica

Conjunto de atividades planejadas e sistematicamente implementadas no sistema da garantia da qualidade, demonstradas como necessárias para garantir e comprovar a confiabilidade dos resultados das medições (SOARES, 1999).

3.1.3 Confiabilidade metrológica

O termo confiabilidade refere-se usualmente à capacidade de um item (produto, processo ou sistema) desempenhar uma função requerida sob condições preestabelecidas em um período de tempo definido (SOARES, 1999).

No contexto deste trabalho a confiabilidade metrológica significa a capacidade do Sistema da Garantia da Qualidade Metrológica desempenhar conforme requisitos definidos, a “função garantia da qualidade das medições”.

3.1.4 Avaliação da conformidade

A avaliação da conformidade é um processo sistematizado, com regras preestabelecidas, devidamente acompanhado e avaliado, de forma a propiciar adequado grau de confiança de que um produto, processo ou serviço, ou ainda um profissional, atende a requisitos preestabelecidos em normas ou regulamentos (INMETRO, 2002).

3.2 Avaliação da conformidade de equipamentos

A importância de equipamentos conformes às suas especificações foi destacada no item 1.1, assim como a da confiabilidade dos ensaios que objetivam a avaliação da conformidade.

Neste momento tem-se a necessidade de expressar como um ensaio pode ser considerado confiável, isto é, esboçar as diretrizes para uma segura avaliação da conformidade de um equipamento.

Para tanto, dividiu-se a abordagem em quatro tópicos: normatização, metrologia, estabelecimento de limites de conformidade e demonstração de competência laboratorial.

3.2.1 Normatização

A normatização, que consiste no estabelecimento voluntário de padrões, regras e requisitos mínimos para produtos, processos e serviços, tem sido um dos instrumentos básicos para a organização da produção assim como para a racionalização dos mercados (MCT, 2001).

O estabelecimento da normatização como uma linguagem comum para a sociedade é um processo complexo e envolve um sem-número de aspectos da vida econômica. Neste domínio estão incluídos, entre muitos outros, a fixação de condições para projetos; condições para aceitação de produtos e serviços; métodos de ensaio; terminologia; convenções gráficas (DIAS, 1998).

Nota-se a intensa relação entre a função normativa e a de avaliação da conformidade e há que se visar a capacitação laboratorial não somente de laboratórios que realizam ensaios para a indústria de transformação (MCT, 2001). Os demais setores da economia, com destaque para as atividades compreendidas nos segmentos nos quais o Estado exerce poder regulamentador, também devem receber ações para o incremento da capacidade laboratorial. Fazem parte, portanto, desse contexto as áreas de Saúde, Alimentos, Trânsito, Meio Ambiente, Recursos Minerais e Hídricos, assim como os setores de Energia Elétrica, Telecomunicações, Petróleo e Gás e outros (MCT, 2001).

Em se tratando de equipamentos do sistema de transmissão de energia elétrica nota-se a questão normativa desde sua construção até os ensaios que esses podem ser submetidos.

Neste sistema de garantia da confiabilidade de ensaios evidencia-se o papel normativo em toda a sua extensão. O sistema da qualidade, a confiabilidade

metrológica e os aspectos característicos aos ensaios em alta tensão devem estar todos sobre uma base documental sólida, garantindo sua credibilidade.

3.2.2 Metrologia

A metrologia é a ciência que abrange todos os aspectos teóricos e práticos relativos às medições, constituindo-se em um importante instrumento para o desenvolvimento das atividades econômicas, científicas e tecnológicas. Uma base científica forte e confiável e um sistema metrológico harmonizado são indispensáveis para prover eficiência na produção e no comércio de bens e serviços. Para a indústria os benefícios são claros, pois proporciona uma melhora da qualidade dos produtos, processos e serviços, especialmente os que requerem alta tecnologia (MCT, 2001).

Um processo de medição tem como produto o resultado da medição. Esse é composto pelo seu valor base (por exemplo, indicação ou média de leituras) e a incerteza correspondente. Essa última caracteriza a dispersão dos valores que podem ser fundamentadamente atribuídos ao mensurando (BIPM, 2000), ficando estabelecida então, uma faixa de dúvida no resultado. A incerteza é característica inerente àquele processo de medição no momento em que é executado para o dado mensurando.

A avaliação de incertezas está no centro do estabelecimento da rastreabilidade de um resultado de medição, que é a característica do resultado que permite relacionar as medições entre laboratórios (EHRLICH, 1998; ILAC, 1994). Resultados de medição com rastreabilidade assegurada garantem credibilidade e segurança ao laboratório. Desta forma, torna-se importante a utilização de técnicas consolidadas e consensadas para estimar a incerteza e garantir a confiabilidade metrológica dos ensaios.

3.2.3 Estabelecimento de limites de conformidade

A grande maioria das especificações de equipamentos é definida por limites (máximos, mínimos ou faixa) que determinadas características devem respeitar para serem ditos conforme.

A avaliação de conformidade é uma atividade em que a realização de medições é comum. Conseqüentemente, as incertezas estão presentes e afetam a classificação dos equipamentos como conformes ou não conformes. Os limites de especificação bem definidos, quando não considerada a incerteza de medição, são substituídos por zonas de dúvida, reduzindo as regiões de conformidade e não conformidade (ISO, 1998).

A avaliação de incertezas deve garantir a relação adequada entre os limites de especificação (do parâmetro ou grandeza a ser medida) e a incerteza, de modo que o processo de medição seja capaz de discriminar o mensurando dentro dos riscos de erros definidos pela empresa (SOARES, 1999). A figura 5 mostra como se relacionam os limites de especificação e a incerteza de medição.

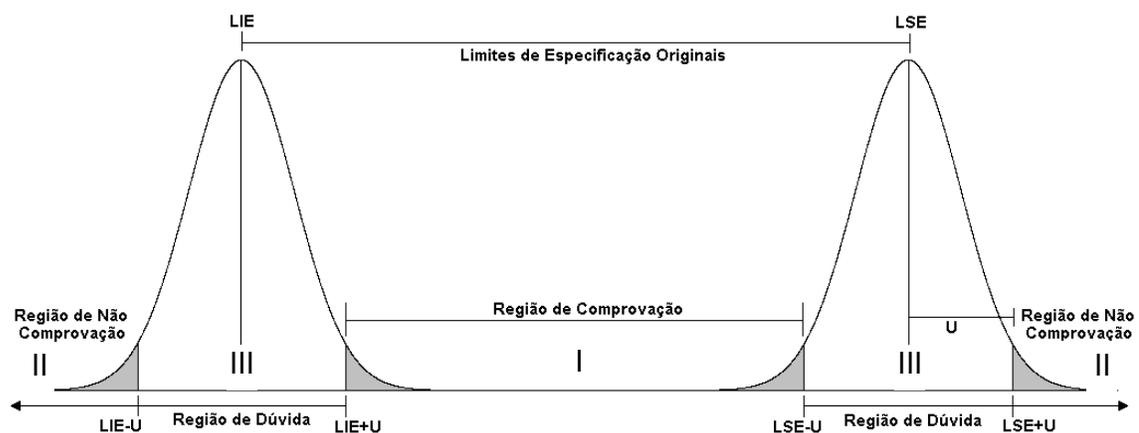


Figura 5 - Influência da incerteza de medição nos limites de especificação

Fica clara a existência de três regiões bem distintas: região de comprovação da conformidade, região de comprovação de não conformidade e regiões de dúvida sobre a comprovação se um equipamento é conforme ou não conforme. A figura 6 identifica as regiões correspondentes à figura 5 e define os novos limites para classificação do mensurando.

Região	I	II	III
Situações Possíveis	Comprovação de Conformidade com a Especificação	Comprovação de Não Conformidade com a Especificação	Dúvida na Comprovação de Conformidade ou Não Conformidade com a Especificação
Definição da Região	$LIE + U < y < LSE - U$	$y < LIE - U$ ou $y > LIE + U$	$LIE - U < y < LIE + U$ ou $LSE - U < y < LSE + U$
y é o valor medido		LIE é o limite inferior de especificação	
U é a incerteza expandida da medição		LSE é o limite superior de especificação	

Figura 6 - Descrição das regiões e definição dos novos limites de conformidade

Região III: próxima aos limites de especificação, esta região fica encoberta pela incerteza de medição. Aqui a declaração da conformidade não pode ser feita com a segurança necessária. A ação de avaliar um equipamento desta região sem levar em consideração a presença da incerteza pode implicar em:

- aprovar um equipamento fora da especificação;
- reprovar um equipamento dentro da especificação;

Região I: esta região é inicialmente definida entre os limites de especificação (sem a incerteza de medição). Com a inserção da incerteza a região onde era garantida a conformidade é reduzida, forçando um processo de seleção mais exigente do que o previsto.

Região II: esta região é definida tomando-se inicialmente os limites de especificação para as extremidades do gráfico, no entanto, surge com a consideração da incerteza uma faixa onde não é possível uma declaração segura da conformidade.

Neste trabalho, a análise dos limites de conformidade deverá ser realizada para a garantia de uma classificação segura dos equipamentos ensaiados. A partir das especificações das tolerâncias e níveis de incertezas de medição, o processo de medição pode ser planejado para minimizar os riscos de classificação errônea dos equipamentos sob ensaio.

3.2.4 Demonstração da competência laboratorial

A aceitação de resultados de ensaios no mercado global requer confiança tanto em relação aos aspectos técnicos quanto ao reconhecimento formal (SCHMIDT, 2002).

O reconhecimento formal da competência do laboratório é proporcionado pela acreditação⁴. Essa é obtida de um agente que tende a ser único em um determinado sistema econômico, âmbito legal ou região geográfica. Esse agente é reconhecido como autoridade, por força de determinação regulamentar, por acordo técnico ou ainda em decorrência de um pacto global em um campo da atividade produtiva (GOMIDE, 2000).

Em relação ao aspecto técnico essa confiabilidade depende da rastreabilidade do resultado do ensaio, que pode ser obtida utilizando-se métodos de ensaio

⁴ Resolução do CONMETRO (2003) dispõe sobre a alteração do termo "credenciamento" para "acreditação" para expressar reconhecimento de competência de organismos de avaliação da conformidade no âmbito do Sinmetro.

validados, equipamentos de medição calibrados e avaliação da incerteza de medição consistente (SCHMIDT, 2002; DAR, 2002).

Esse processo de demonstração da competência deve passar seguramente pela implantação de um Sistema da Qualidade Laboratorial (SQL) baseado em técnicas e métodos adequados.

Além de demonstrar a integridade e o nível de implantação de um sistema da qualidade, os laboratórios devem apresentar evidências da competência técnica para que os resultados de calibrações ou ensaios sejam dotados de confiabilidade (GOMIDE, 2000).

Algumas destas evidências estão ligadas, por exemplo, aos procedimentos. A definição, documentação e utilização efetiva de procedimentos é requisito básico no que diz respeito à: garantia da homogeneidade na execução das atividades; manutenção do conhecimento do laboratório ao alcance de todos; diminuição do índice de falhas na execução das atividades.

O gerenciamento dos equipamentos de medição também se destaca como requisito na garantia da qualidade metrológica. A necessidade da garantia da rastreabilidade dos resultados de medição implica a elaboração de um programa de confirmação metrológica⁵ dos equipamentos de medição.

O sistema da qualidade laboratorial possibilita o amplo domínio e melhoria contínua dos procedimentos técnicos e administrativos, trazendo ainda como vantagens adicionais a racionalização e otimização das rotinas (GIÁGIO, 2001).

⁵ Confirmação metrológica é o conjunto de operações necessárias para garantir que um equipamento de medição está conforme aos requisitos da atividade em que ele será utilizado (ISO, 2003).

3.3 Proposta de sistema de garantia da confiabilidade de ensaios em alta tensão

Um sistema de garantia da qualidade formalizado através de padrões é praticamente uma obrigação para qualquer empresa que queira ser competitiva, sobreviver e expandir seus negócios (ARAÚJO, 1995). Desta forma, a utilização de referências normativas para estabelecimento de um sistema para garantia da confiabilidade de ensaios em alta tensão torna-se imprescindível.

A descrição do sistema proposto inicia com a exposição do chamado balizamento documental, que é uma série de referências onde estão calcadas as ações do sistema. Em seguida são apresentadas a análise de aspectos ligados diretamente à garantia da qualidade metrológica e a contribuição dos documentos adotados pelo sistema.

3.3.1 Balizamento documental do sistema proposto

Para o estabelecimento de um sistema que atinja seus fins há necessidade de utilização de documentos que cubram a atividade de ensaio em todos os seus aspectos: técnicas em alta tensão; gestão laboratorial; garantia da qualidade metrológica; atendimento aos requisitos do cliente.

Há a necessidade da utilização de documentos consensados, disseminados e complementares na concepção de um sistema operativo desde a chegada do equipamento ao laboratório, inspeção inicial, montagem do circuito de medição, execução do ensaio, avaliação dos resultados, e finalmente, emissão do relatório final.

A proposta julga necessária a documentação apresentada na figura 7.

Identificação	Descrição
VIM	Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia
ISO GUM	Guia para Expressão da Incerteza da Medição
IEC 60 - 1	Técnicas de ensaio em alta tensão - Parte 1: Definições gerais e requisitos de ensaio
IEC 60 - 2	Técnicas de ensaio em alta tensão - Parte 2: Sistemas de medição
IEEE 4	Standard Techniques for High Voltage Testing
-	Normas do equipamento e específicas do ensaio
NBR ISO/IEC 17025	Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração
ISO 10012	Sistemas de gerenciamento de medição – Requisitos para processos e equipamentos de medição
ISO 14253 - 1	Especificações de produtos geométricos (GPS) – Inspeção por medição de peças e equipamentos de medição – Parte 1: Regras de decisão na comprovação de conformidade ou não-conformidade com especificações
ISO/TS 14253 - 2	Especificações de produtos geométricos (GPS) – Inspeção por medição de peças e equipamentos de medição – Parte 2: Guia para estimativa da incerteza na medição de GPS, calibração de equipamentos de medição e verificação de produtos

Figura 7 - Relação da documentação do sistema proposto

Na seqüência são apresentados os documentos balizadores do sistema de garantia da confiabilidade de ensaios.

3.3.1.1 Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia - VIM

O Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia (VIM) – (BIPM, 2000) - é o documento elaborado pelo Bureau Internacional de Pesos e Medidas - BIPM, pela Comissão Internacional de Eletrotécnica - IEC, pela Federação Internacional de Química Clínica - IFCC, pela Organização Internacional de Normalização - ISO, pela União Internacional de Química Pura e Aplicada -

IUPAC e pela União Internacional de Física Pura e Aplicada – IUPAP, com o intuito de harmonizar os termos utilizados pelos profissionais da metrologia. Publicado originalmente no ano de 1993, o VIM (BIPM, 2000) foi adotado no Brasil, sob a portaria n° 29 de 10 de março de 1995, após discussão e consenso de ampla parcela da comunidade técnica e acadêmica atuante no campo da metrologia (BIPM, 2000).

Neste trabalho, o VIM (BIPM, 2000) terá efetivada a contribuição a que ele se propõe: harmonizar os termos presentes nos vários documentos que balizam a estrutura para garantia da confiabilidade de ensaios. Conceitos, que não estão presentes no referido vocabulário e têm sido incorporados à metrologia, serão retirados de documentos mais recentes.

3.3.1.2 Guia para expressão da incerteza da medição - ISO GUM

O Guia para Expressão da Incerteza da Medição (BIPM, 1998) foi preparado por um grupo de trabalho, consistindo de peritos nomeados pelo BIPM, IEC, ISO e OIML⁶. Esse estabelece regras gerais, e aplicáveis, para avaliação e expressão da incerteza da medição que se pretende aplicar a um largo espectro de medições, tendo estas as mais diversas finalidades:

- manter o controle da qualidade e a garantia da qualidade na produção;
- respeitar e fazer cumprir leis e regulamentos;
- conduzir pesquisa básica, pesquisa aplicada e desenvolvimento na ciência e na engenharia;
- calibração de padrões e instrumentos e executar ensaios, através de um sistema nacional de medição, de forma a obter a rastreabilidade até os padrões nacionais;

⁶ OIML – Organização Internacional de Metrologia Legal.

- desenvolver, manter e comparar padrões físicos de referência nacional e internacional, incluindo materiais de referência.

3.3.1.3 Técnicas de ensaio em alta tensão - IEC 60 - parte 1: definições gerais e requisitos de ensaios

Expressa na forma de uma recomendação o consenso internacional sobre temas relativos a ensaios de alta tensão, em equipamentos do sistema de energia elétrica, realizados com tensões máximas acima de 1 kV. No escopo estão ensaios de dielétricos com tensão direta, alternada e impulsiva, ensaios com correntes impulsivas, e ensaios combinando os tipos anteriores.

Os objetivos são: definir os termos gerais e específicos; apresentar requisitos gerais para os equipamentos sob ensaio; descrever os métodos de geração e medição das tensões e correntes; descrever os métodos para avaliação dos resultados e indicação de critérios de aceitação e rejeição (IEC, 1989).

3.3.1.4 Técnicas de ensaio em alta tensão - IEC 60 - parte 2: sistemas de medição

Esta segunda parte da norma é aplicável para sistemas de medição completos, e para seus componentes, usados na medição de altas tensões e correntes durante os ensaios definidos no escopo da IEC 60-1 (IEC, 1989).

Os objetivos são: definir os termos utilizados; apresentar os requisitos dos sistemas de medição; descrever métodos para aprovação de sistemas de medição e verificar seus componentes; descrever as ações para demonstrar que o sistema de medição atende os requisitos apresentados no seu texto.

A norma apresenta ainda um adendo, lançado posteriormente, que representa o Anexo H da referida parte da norma IEC 60 (IEC, 1994). O anexo traz um

procedimento para estimativa da incerteza de medição em alta tensão acompanhado de exemplos.

É importante salientar que o adendo (IEC, 1996) foi publicado em 1996, isto é, após a primeira publicação oficial do VIM (BIPM, 2000) e ISO-GUM (BIPM, 1998). No entanto, deve-se atentar para alguns termos utilizados no adendo (IEC, 1996), que não são adequados para documentos de cunho metrológico, como pregado por BIPM (2000) e BIPM (1998).

3.3.1.5 Técnicas de ensaio em alta tensão - IEEE 4

Essa norma estabelece métodos padronizados para medição de alta tensão e técnicas básicas de ensaio. Tais técnicas são aplicáveis a qualquer tipo de equipamento de sistemas de transmissão de energia elétrica.

Os ensaios abordados são referentes a: tensão alternada, tensão direta, tensão impulsiva e corrente impulsiva. São abordados também temas referentes à melhoria da exatidão das medições e problemas associados aos ensaios em alta tensão.

Os objetivos são: definição de termos gerais; apresentação de requisitos dos equipamentos sob ensaio e procedimentos de ensaio; descrever métodos para avaliação dos resultados de ensaio.

3.3.1.6 Normas de equipamentos e específicas de ensaios

Os equipamentos são, normalmente, regidos por uma coletânea de normas. Fazem parte desta coletânea volumes como: especificação, método de ensaio, medições especiais, entre outros. O ensaio deverá respeitar todos os requisitos apresentados em todos os volumes.

Em relação aos documentos referentes aos métodos de ensaio, estes se restringem a apresentar os tipos de medições a ser realizadas, procedimentos simplificados, condições ambientais de referência, recomendar princípios e métodos

de medição. Nenhuma menção é feita quanto à confiabilidade metrológica necessária. Desta forma, deve partir do laboratório a especificação do sistema de medição, definição do procedimento completo, avaliação das incertezas de medição e todos os requisitos para garantia da confiabilidade metrológica.

3.3.1.7 Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração - NBR ISO/IEC 17025

A norma NBR ISO/IEC 17025 (ISO, 2001) é o principal documento de referência para o credenciamento de laboratórios de ensaio e calibração no Brasil e no mundo. Ela contém todos os requisitos que os laboratórios devem atender se desejam demonstrar que têm implementado um sistema da qualidade, são tecnicamente competentes e capazes de produzir resultados tecnicamente válidos (ISO, 2001).

O escopo dessa norma envolve o controle de todas as tarefas inerentes à realização de medições, na extensão necessária para assegurar a qualidade dos resultados fornecidos, a partir da exigência (GIÁGIO, 2001):

- do estabelecimento de políticas e diretrizes para a qualidade através de um Manual da Qualidade, que deve descrever a estrutura da documentação usada no SQL e fazer referência aos procedimentos;
- da definição de todas as funções e responsabilidades, em todos os níveis hierárquicos do laboratório, visando assegurar o cumprimento de todos os requisitos da norma;
- de procedimentos documentados de todas as atividades técnicas e administrativas executadas;
- de registros técnicos e da qualidade, que evidenciem a execução das tarefas em conformidade com os demais documentos da qualidade (manual e procedimentos).

Dividida em requisitos de gestão e requisitos técnicos, traz uma maior facilidade na implementação e auditoria do sistema da qualidade.

3.3.1.8 Sistemas de gerenciamento de medição - Requisitos para processos e equipamentos de medição - ISO 10012

Esta norma internacional apresenta requisitos gerais e orientações para o gerenciamento de processos de medição e confirmação metrológica de equipamentos de medição utilizados no suporte e demonstração de conformidade com requisitos metrológicos.

Em linhas gerais a norma aborda ainda assuntos como: a responsabilidade gerencial na garantia de processos e equipamentos de medição; gestão de recursos humanos visando responsabilidade e competência técnica; gestão de recursos de informação (procedimentos e software); análise e aprimoramento do sistema de gerenciamento de medição.

Um sistema efetivo de gerenciamento de medição garante que os equipamentos e processos de medição sejam adequados para o que são propostos.

3.3.1.9 Especificações de produtos geométricos (GPS) - Inspeção por medição de peças e equipamentos de medição - ISO 14253

A ISO 14253-1 (ISO, 1998) é uma norma internacional, publicada em 1998 pelo comitê técnico 213 da ISO (*International Organization for Standardization*) na área de especificações geométricas de produtos - GPS (*Geometrical Product Specifications*). O documento estabelece as regras para avaliação de conformidade aos níveis de tolerância de características de peças e erros máximos permissíveis de equipamentos de medição.

A ISO/TS 14253-2 (ISO, 1999) é uma especificação técnica, publicada em 1999 pelo comitê técnico 213 da ISO (*International Organization for Standardization*) na

área de especificações geométricas de produtos - GPS (*Geometrical Product Specifications*). O documento apresenta uma metodologia para avaliação, expressão e documentação de incertezas de medição nas calibrações e nas medições no processo produtivo.

A justificativa para utilização de documentos da área controle geométrico na garantia da confiabilidade de ensaios de alta tensão pode ser dada pela generalidade com que os temas são abordados nesses documentos.

Tanto as regras para avaliação da conformidade, apresentadas na ISO 14253-1 (ISO, 1998), como a metodologia para avaliação de incertezas, apresentada na ISO/TS 14253-2 (ISO, 1999), são abordadas de forma genérica e podem ser aplicadas a quaisquer processos nos quais se julga adequada sua utilização.

3.3.2 Propostas de ações voltadas à garantia da confiabilidade metrológica de ensaios em alta tensão

A garantia da confiabilidade dos ensaios passa pela aplicação dos atuais conceitos e métodos metrológicos em aspectos como: definição de processos de medição; avaliação e gerenciamento de incertezas de medição; confiabilidade metrológica de equipamentos de medição; procedimentos de medição.

Tais aspectos são abordados preliminarmente através dos principais conceitos e métodos inerentes. Num segundo momento são apresentadas análises e propostas específicas, vistas situações relativas aos ensaios em alta tensão.

3.3.2.1 Definição de processos de medição

Para FLESCH (2001) o processo de medição é o conjunto formado por sistemas de medição, operações e condições de contorno concernentes a uma medição.

A partir da definição do que se pretende medir (tarefa de medição) e a capacidade de medição requerida (incerteza alvo), para o processo de avaliação da conformidade, o processo de medição deve ser planejado.

Uma referência importante nesse planejamento é a ISO/TS 14253-2 (ISO, 1999) onde é apresentada uma sistemática de abordagem para esse planejamento a partir do gerenciamento da incerteza de medição.

O PUMA (*Procedure for Uncertainty Management*) é apresentado pelo fluxograma da figura 8 (ISO, 1999) e caracteriza os passos para que a definição do processo de medição seja alcançada.

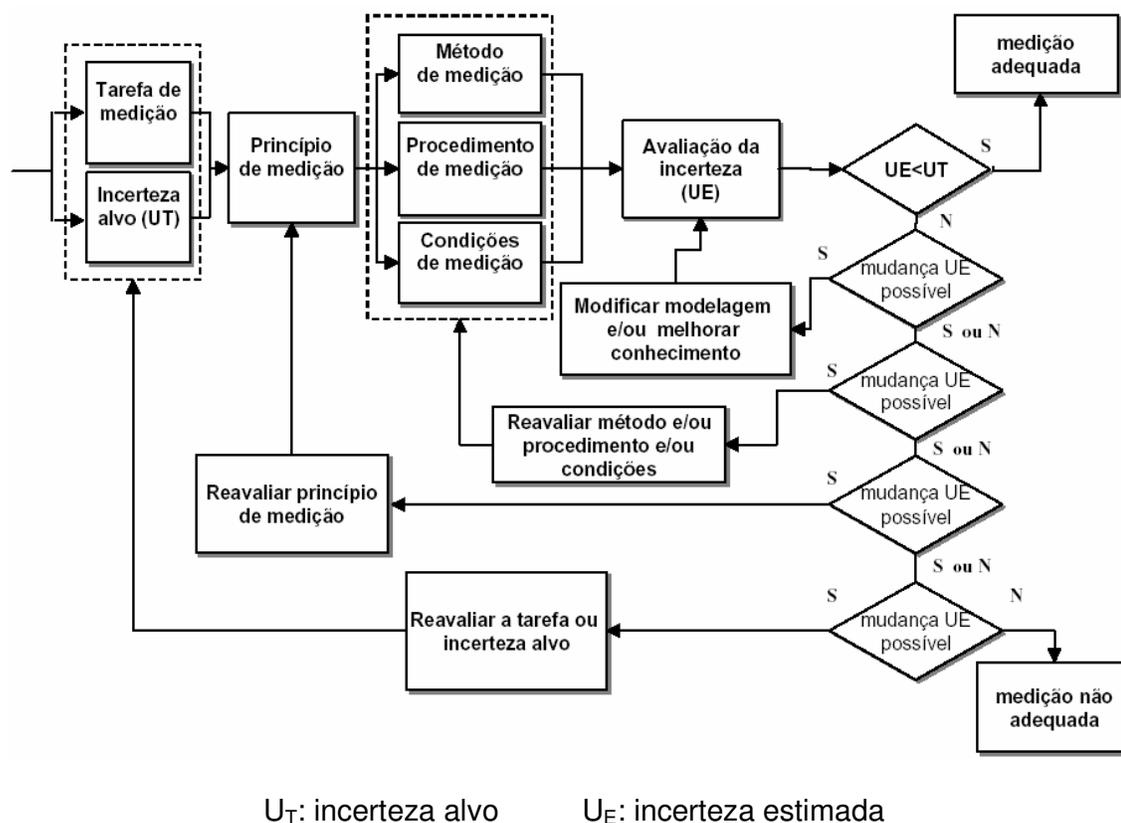


Figura 8 - Fluxograma do PUMA para definição do processo de medição

A aplicação do gerenciamento de incerteza em projeto e desenvolvimento de processos de medição tem o objetivo de fazer com que o processo, na sua forma

final, possua as características metrológicas definidas durante a fase de planejamento (BARP, 2000).

A especificação completa de um processo de medição deve incluir a identificação de todos os equipamentos relevantes, procedimentos, ferramentas de software, condições de influência, habilidade dos operadores e qualquer outro fator que possa influenciar na confiabilidade do resultado da medição (ISO, 2003).

O princípio de medição é definido com base na experiência e nos instrumentos ou sistemas de medição disponíveis. O método, o procedimento e as condições de medição são estabelecidos com base na experiência e nos limites técnicos e econômicos da empresa (SOARES, 1999).

O fluxograma do PUMA apresenta uma sistemática iterativa que faz com que, através de modificações em certos aspectos do processo de medição, se obtenha um valor para a incerteza estimada (U_E). Estabelecido de uma forma bem definida, isto é, um caminho lógico, essa sistemática facilita a tomada de decisões necessárias à obtenção da incerteza alvo (U_T) (LISKA, 1999). Permite identificar as principais fontes de incerteza do sistema de medição e, através de diversas ações, reduzir essas fontes para níveis permitidos (BARP, 2000).

A sistemática pode modificar o projeto, construção ou especificações de componentes do sistema de medição; modificar o princípio, procedimentos, métodos ou condições de medição; levar a uma avaliação mais detalhada da incerteza de medição ou redefinir o valor da incerteza alvo (BARP, 2000).

No entanto existem processos de medição nos quais não é possível modificar as condições de medição ou uma modificação não pode ser implementada com facilidade. Portanto aconselha-se que a seqüência de modificações seja executada baseando-se na situação existente e no bom senso em modificar o item que

produzirá um efeito mais significativo no valor da incerteza estimada U_E , sem comprometer o custo do processo de medição (LISKA, 1999).

A ISO/TS 14253-2 (ISO, 1999) aborda a avaliação de incertezas com algumas simplificações em relação ao ISO-GUM (BIPM, 1998). Essas simplificações assumem: coeficientes de correlação 1, -1 ou 0; fator de abrangência igual a 2 para cálculo da incerteza expandida.

Este trabalho sugere a execução do procedimento de avaliação de incertezas apresentado pelo ISO-GUM (BIPM, 1998) que pode contribuir para uma estimativa de incerteza mais adequada.

3.3.2.2 Avaliação e gerenciamento de incertezas de medição

O conhecimento da incerteza de medição em resultados de ensaios é de fundamental importância para os laboratórios, seus clientes e todas as outras instituições que utilizam estes resultados (LIRA, 1998; DAR, 2002).

Neste item a avaliação de incertezas é abordada em quatro tópicos que são: aspectos gerais da avaliação de incertezas de medição; análise de procedimentos de avaliação de incerteza apresentados por referências relacionadas a ensaios em alta tensão; gerenciamento de incertezas de medição; e aspectos da especificação de equipamentos de medição e importância na avaliação *a priori* da incerteza de medição.

a) Aspectos gerais da avaliação de incertezas de medição

O ISO-GUM (BIPM, 1998) - apresentado no item 3.3.1.2 - se consolidou como uma referência para todas as áreas nas quais a avaliação de incertezas de medição se faz importante.

Vale salientar que se trata de um guia e que abordagens diferentes, ou variantes da abordagem ali proposta, podem levar a resultados diferentes, devendo-se então procurar a mais adequada dependendo da aplicação.

Algumas dessas abordagens utilizam técnicas como simulação de *Monte Carlo*, convolução e lógica *fuzzy* para obtenção da incerteza do processo (COX, 1999; TURZENIECKA, 2000; COX, 2001a; COX, 2001b; MAURIS, 2001).

O método apresentado no guia pode ser resumido pelo fluxograma da figura 9. A apresentação do fluxograma não é suficiente para abordar todas as considerações exigidas pelo guia. Trata-se apenas de uma exposição geral onde são destacadas características julgadas relevantes.

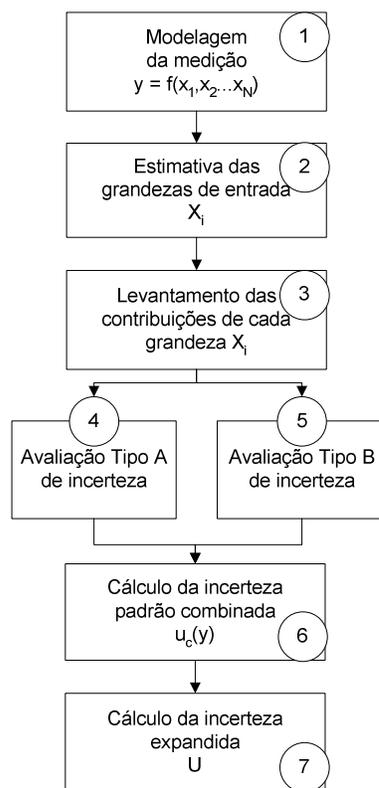


Figura 9 - Fluxograma resumo do método de avaliação de incertezas apresentado pelo ISO-GUM

Sobre cada um dos sete blocos apresentados na figura 9 pode-se evidenciar aspectos importantes.

1 - Na maioria dos casos o mensurando Y não é medido diretamente, e sim determinado a partir de N outras grandezas (X_i) através de uma relação funcional f . A função f deve modelar a medição de tal forma que a exatidão requerida pelo resultado de medição seja atendida (BIPM, 1998).

2 - As grandezas de entrada (X_i) podem ser consideradas outros mensurandos e depender de outras grandezas. Essa recursividade pode inviabilizar a formulação de uma função explícita para o mensurando original, no entanto é importante o conhecimento de como essas grandezas interagem (BIPM, 1998).

3 - As contribuições das incertezas podem ser retiradas de: certificados de calibração, especificações de fabricantes, referências normativas, conhecimento adquirido do processo de medição.

4 - A avaliação Tipo A estima um desvio padrão a partir de uma série de observações das grandezas de entrada (X_i) ou da grandeza de saída (Y) (BIPM, 1998). Este desvio é denominado de incerteza padrão do Tipo A e leva em consideração todas as variações aleatórias das grandezas de entrada e possíveis interações ou correlações entre estas (ORFORD, 1995). É importante salientar que essas medições repetidas devem ser realizadas sob as mesmas condições.

5 - A avaliação Tipo B também caracteriza a incerteza em termos de um desvio padrão (BIPM, 1998). É baseada no julgamento científico e conhecimento *a priori* da distribuição de probabilidade da variabilidade de cada grandeza X_i . As distribuições de probabilidade mais usuais neste tipo de avaliação são: normal, uniforme, triangular e tipo U. Deve-se reconhecer que uma avaliação do Tipo B pode

ser tão confiável quanto uma avaliação Tipo A, principalmente quando é realizado um baixo número de medições (BIPM, 1998).

6 - A incerteza padrão combinada $u_c(y)$ é um desvio padrão estimado e caracteriza a dispersão dos valores que poderiam ser atribuídos ao mensurando. Usualmente é obtida a partir da soma quadrática de todas as incertezas padrão, estimadas nas avaliações Tipo A e Tipo B, convertidas para a grandeza de saída (Y) através dos coeficientes de sensibilidade. A correlação de grandezas de entrada deve ser analisada e considerada no cálculo de $u_c(y)$ quando essa for significativa (BIPM, 1998).

7 - A incerteza padrão combinada $u_c(y)$ pode não ser adequada para avaliar a conformidade de um valor medido à sua tolerância. É verdade que $u_c(y)$ expressa a qualidade de um resultado de medição, no entanto, a avaliação de conformidade pode exigir uma incerteza que cubra uma faixa maior de valores consistentes com as condições de medição (KESSEL, 1999). Essa incerteza é denominada de incerteza expandida (U) e é obtida multiplicando-se a incerteza padrão combinada $u_c(y)$ por um fator de abrangência k^7 .

A avaliação de incertezas pelo método do ISO-GUM (BIPM, 1998) exige o estudo detalhado por exemplo, das distribuições de probabilidades e dos graus de liberdade para cada componente de incerteza considerado e do coeficiente de correlação quando se suspeita de correlação entre grandezas de entrada. Normalmente a aplicação do método exige pessoal com conhecimento aprofundado em metrologia (SOARES, 1999).

⁷ Fator multiplicativo que transforma a incerteza padrão combinada, com probabilidade de 68,27%, para incerteza expandida com probabilidade de 95,45%, por exemplo. Este fator é baseado na distribuição-t ou distribuição de Student.

b) Análise de procedimentos de avaliação de incerteza apresentados em referências relacionadas a ensaios em alta tensão

A análise dos documentos tem o propósito de avaliar a forma de abordagem da avaliação de incerteza e estabelecer um alinhamento à terminologia e métodos apresentados pelo Guia para a Expressão da Incerteza de Medição (ISO-GUM) – (BIPM, 1998) - e pelo Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia (VIM) – (BIPM, 2000).

Os documentos analisados neste item são:

- anexo H (IEC, 1996) da recomendação Técnicas de Ensaio em Alta Tensão - IEC 60 (IEC, 1994) - Parte 2: sistemas de medição, intitulado “procedimento para estimativa de incerteza em medições de alta tensão”;
- item 13.6 da norma Técnicas de Ensaio em Alta Tensão – IEEE 4 (IEEE, 1994), intitulado “avaliação da exatidão⁸ da medição”.

A análise dos documentos revela:

- que os documentos utilizam terminologia ora adequada, ora inadequada para os atuais conceitos metrológicos, o que complica a interpretação;
- que os documentos não abordam a importância da formulação de um modelo matemático para a medição a ser realizada. Tal deficiência pode atuar diretamente na avaliação da incerteza através de uma possível não compreensão dos mecanismos de atuação das grandezas de influência;
- a utilização dos termos contribuições sistemáticas e contribuições aleatórias com referência às avaliações Tipo B e Tipo A, respectivamente. O ISO-GUM (BIPM, 1998) aborda tal falha nos itens

⁸ O termo utilizado na norma é *accuracy* que, segundo o VIM, é o grau de concordância entre o resultado de uma medição e o valor verdadeiro do mensurando.

3.3.3 e 3.3.4 e afirma que “a classificação não se propõe a indicar que haja qualquer diferença na natureza (aleatória ou sistemática) dos componentes dos dois tipos de avaliação. Ambos os tipos são baseados em distribuições de probabilidade e os componentes de incerteza resultantes de cada tipo são quantificados por variâncias ou desvios padrão”;

- no caso da referência IEEE 4 (IEEE, 1994), há má utilização dos conceitos de erro e incerteza. Fato este que não é identificado para a IEC 60-2 (IEC, 1994);
- que o cálculo do fator de abrangência não é realizado como apresentado pelo ISO-GUM (BIPM, 1998). A IEC 60-2 (IEC, 1996) aplica um fator de abrangência para cada tipo de avaliação (Tipo A e Tipo B) o que acarreta uma incerteza total sobreestimada. A IEEE 4 (IEEE, 1994) apresenta a distribuição t, não a utiliza e assume fatores de abrangência fixos (1, 2 ou 3) dependendo do nível de confiança desejado e experiência do metrologista.

De maneira geral a análise revelou que a referência IEC 60-2 (IEC, 1994) aborda a avaliação de incertezas de maneira mais adequada aos padrões estabelecidos pelo ISO-GUM (BIPM, 1998). A IEEE 4 (IEEE, 1994) se mostra muito confusa nos conceitos aplicados e se afasta do que é recomendado pelas atuais referências para avaliação de incerteza.

c) Procedimento para gerenciamento da incerteza de medição

O PUMA se apresenta também na ISO/TS 14253-2 (ISO, 1999) de maneira simplificada como apresentado na figura 10.

Esta segunda forma de apresentação se remete ao efetivo gerenciamento de incertezas para um processo de medição já definido.

Tal abordagem é visivelmente útil para o acompanhamento e adequação dos níveis de incerteza para, por exemplo, situações particulares de medição. Situações essas que exigem uma rápida adequação do valor da incerteza sem alterações drásticas no processo de medição tais como mudança do método, do procedimento ou das condições de medição.

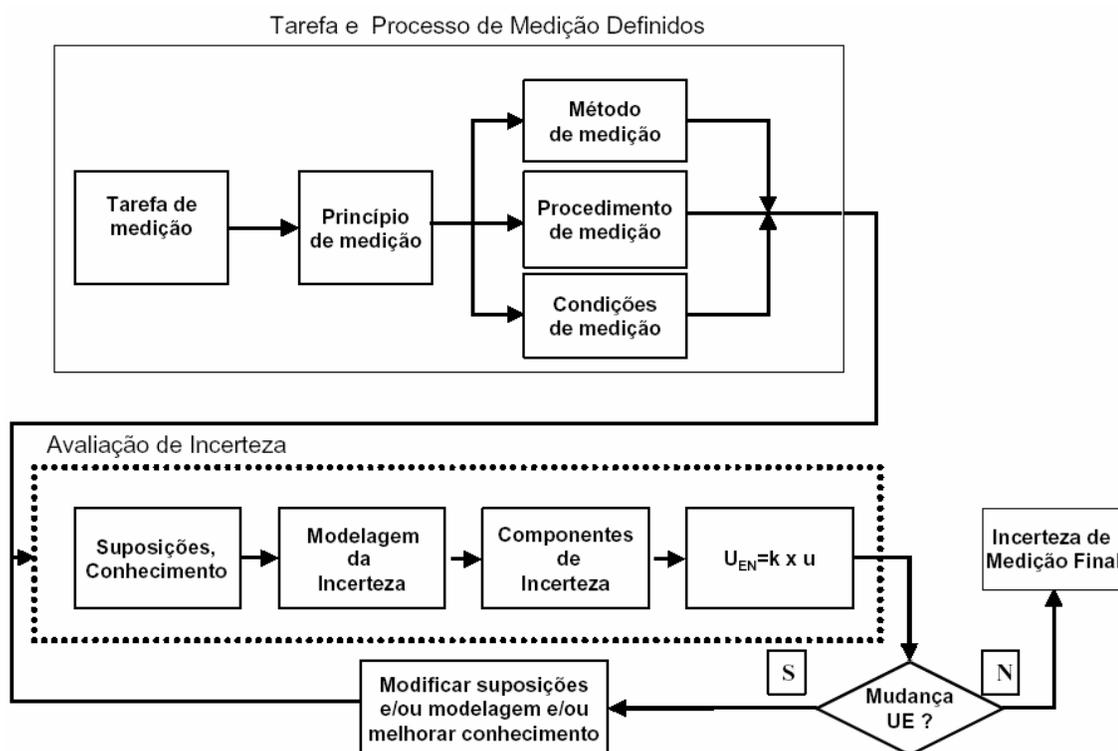


Figura 10 - Fluxograma do PUMA para um processo de medição definido

d) Aspectos relativos à interpretação de especificações de equipamentos e sua importância na avaliação *a priori* de incertezas

A estimativa de incertezas do processo de medição pode incorporar também as avaliações realizadas *a priori*. Utilizando as informações provenientes dos

equipamentos de medição e sua interação com as grandezas de influência, pode-se estimar antecipadamente a incerteza do processo de medição.

Dessa forma, a escolha de equipamentos de medição pode atuar diretamente na qualidade dos resultados e financeiramente, quando não abordado de maneira criteriosa e embasada.

A abordagem desse assunto é também motivada pela complexidade e variedade de termos e formas de especificação que podem ser encontradas (FLUKE, 1994).

As especificações que são tratadas nesse texto se referem às características metrológicas⁹ dos equipamentos de medição.

Quanto à escolha dos equipamentos, as referências IEC 60 (IEC, 1989; IEC, 1994) e IEEE 4 (IEEE, 1994) não evidenciam formas de abordagem para essa atividade. Ressaltam apenas que os equipamentos de medição devem apresentar erros máximos admissíveis adequados para o processo em que serão utilizados.

Cabe então ao laboratório a determinação das características adequadas dos equipamentos de medição.

As especificações devem ser analisadas com rigor para entender o que de fato o fabricante do equipamento pretende expressar com o dado apresentado.

Em muitos casos a especificação é composta por uma série de dados relacionados com os diversos fatores que podem influenciar na utilização do equipamento. A figura 11 destaca uma série desses fatores.

⁹ Características metrológicas de equipamentos de medição são os fatores que podem influenciar no resultado da medição. Essas devem ser diretamente comparáveis com os requisitos do processo de medição para o julgamento de adequabilidade do equipamento (ISO, 2003).

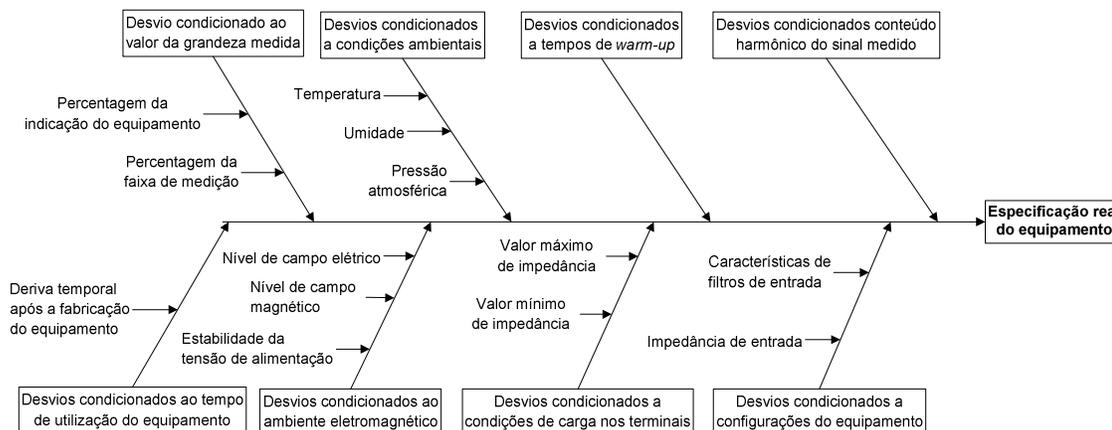


Figura 11 - Componentes típicos de especificações de equipamentos de medição

Identificadas todos os componentes da especificação, esses podem ser interpretados e utilizados no cálculo do limite de erro admissível do equipamento, com o qual se tem uma noção mais clara de sua especificação real (FLUKE, 1994).

Essa especificação real não é necessariamente o comportamento do equipamento no processo de medição. Na grande maioria das vezes o comportamento dos equipamentos é bem melhor que sua especificação para as condições que é projetado.

A má interpretação ou uma análise parcial das especificações pode resultar em:

- subutilização de equipamentos de medição – quando poderiam ser utilizados equipamentos com características metrológicas piores, resultando em menores custos para implementação do processo de medição;
- baixa significativa da qualidade dos resultados – quando se entende *a priori* que as características metrológicas dos equipamentos são adequadas para a atividade, mas se comprova o contrário.

3.3.2.3 Garantia da confiabilidade metrológica de equipamentos de medição

O gerenciamento dos equipamentos de medição utilizados nos ensaios é vital para a garantia da qualidade metrológica dos resultados e é requisito da norma NBR ISO/IEC 17025 (ISO, 2001), adotada como referência para o sistema proposto neste trabalho.

A ISO 10012 (ISO, 2003) apresenta o conceito de confirmação metrológica para o eficaz gerenciamento de equipamentos. Essa é entendida como toda a atividade realizada para prover equipamentos compatíveis aos requisitos do processo de medição (ISO, 2003).

A confirmação metrológica inclui atividades como (ISO, 2003): elaboração e execução de planos de calibração e verificação; ajustes ou reparos e subsequente recalibração; comparação com os requisitos do processo de medição no qual o equipamento será utilizado.

Dentre essas atividades deve ser dada especial atenção aos planos de calibração e verificação. Esses têm como principais objetivos: contribuir para a rastreabilidade dos resultados e conseqüente confiabilidade; diminuir os riscos de utilização de equipamentos de medição operando aquém do desejado; acompanhar o comportamento de equipamentos ao longo do tempo (SOMMER, 2001; ISO, 2003; RUNSHENG, 2004).

As atividades de calibração e verificação são abordadas a seguir destacando: a necessidade de realização das atividades; as particularidades referentes aos ensaios em alta tensão; propostas de ações para efetivação dessas junto ao sistema de garantia da confiabilidade de ensaios em alta tensão.

a) Definições de calibração e verificação

De acordo com o VIM (BIPM, 2000), calibração é um conjunto de operações que estabelece, sob condições especificadas, a relação entre os valores apresentados por um equipamento de medição e os valores correspondentes das grandezas estabelecidos por padrões.

De acordo com essa definição a calibração não apresenta nenhuma ação de ajuste ou manutenção do equipamento a ser calibrado (SOMMER, 2001).

A NBR ISO/IEC 17025 (ISO, 2001) apresenta o requisito intitulado verificações intermediárias, necessário para a manutenção da confiança no *status* da calibração de equipamentos de medição. No entanto, o conceito de verificação não é apresentado em nenhum dos documentos balizadores deste trabalho.

Segundo FLESCHE (2003) a verificação se define como uma atividade experimental, com características de uma calibração simplificada, que visa fornecer evidências sobre a manutenção ou não da conformidade de instrumento, cadeia, sistema ou processo de medição.

A utilização da definição apresentada por FLESCHE (2003) atende ao requisito da NBR ISO/IEC 17025 (ISO, 2001) e engloba ainda a possibilidade da verificação atuar na avaliação do desempenho de processos de medição.

A NBR ISO/IEC 17025 (ISO, 2001) indica ainda a necessidade de procedimentos e cronogramas definidos para a calibração e verificação.

b) Calibração e verificação de equipamentos e avaliação de processos de medição em ensaios em alta tensão

Os equipamentos de medição utilizados em ensaios em alta tensão estão sujeitos, na maioria das vezes, a condições de influência adversas ou sem

monitoramento adequado. Essa característica imputa ao laboratório a necessidade de uma maior atenção quanto ao comportamento desses equipamentos.

A IEC 60-2 (IEC, 1994) evidencia a necessidade de planos de calibração e verificação quando se refere aos *performance tests* e *performance checks*¹⁰ que devem ser realizados nos equipamentos de medição. Tal norma mostra ainda a necessidade de construção de um histórico do desempenho dos equipamentos, através da documentação de todos os dados pertinentes.

A literatura pesquisada aborda a realização da calibração tanto em relação aos sistemas completos quanto partes dos sistemas de medição.

A disponibilidade de serviços de calibração na área de alta tensão é recente no Brasil. Somente no final do ano de 2001 o INMETRO¹¹ dispôs de toda a infraestrutura laboratorial necessária para ser referência nacional em alta tensão alternada até 200 kV (OLIVEIRA FILHO, 2003a).

No Brasil ainda não há laboratório acreditado pelo INMETRO para calibração de sistemas de medição de alta tensão (OLIVEIRA FILHO, 2003a).

Para alta tensão em corrente contínua e alta tensão de impulso, ainda não há definições quanto ao laboratório que vai atuar como referência nacional (OLIVEIRA FILHO, 2003a).

¹⁰ *Performance test* e *performance check* estão apresentados na IEC 60-2 (IEC, 1994) com atribuições compatíveis à calibração e à verificação, respectivamente. No entanto, as definições desses termos na IEC 60-2 não são adequadas ao estado-da-arte em metrologia.

¹¹ INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial - é uma autarquia federal, vinculada ao Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, que atua como Secretaria Executiva do Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (CONMETRO), colegiado interministerial, que é o órgão normativo do Sistema Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (SINMETRO).

Os níveis de tensão de operação dos sistemas de transmissão de energia, em corrente alternada, instalados no Brasil são 69 kV, 138 kV, 230 kV, 345 kV, 440 kV, 500 kV e 750 kV (ONS, 2003).

O nível de tensão em que os equipamentos dos sistemas de transmissão são ensaiados depende do ensaio a realizar. Esses níveis podem ser menores, maiores ou iguais à tensão de operação.

Nota-se nesse momento a existência de uma lacuna na disponibilidade de serviços de calibração dos sistemas de medição utilizados nos ensaios, tornando evidente as dificuldades para garantia da rastreabilidade dos resultados na forma rigorosa do estado-da-arte em metrologia.

A busca de alternativas para garantia da confiabilidade metrológica dos ensaios deve partir então da definição das condições mínimas em que os equipamentos de medição utilizados nos ensaios devam ser avaliados.

A impossibilidade da garantia da rastreabilidade na sua forma estrita é tratada na NBR ISO/IEC 17025 (ISO, 2001). A referida norma prevê então a utilização de métodos especificados e/ou padrões consensados, claramente descritos e acordados por todas as partes envolvidas.

Segundo HUGHES (1994) e OLIVEIRA FILHO (1995) os sistemas de medição de alta tensão alternada até 200 kV apresentam características que facilitam a calibração fora do laboratório em que esses são utilizados. Tais características são: maior facilidade em relação ao transporte dessas vistas suas dimensões; menor influência de fatores relacionados à montagem dos circuitos.

Para tensões acima de 200 kV é sugerida que a calibração seja realizada no laboratório em que o sistema será utilizado devido à influência de fatores relacionados à montagem do circuito de ensaio (HUGHES, 1994; OLIVEIRA FILHO,

1995; CLAUSS, 2000). No entanto, a dificuldade no transporte de padrões de grande porte pode inviabilizar essa calibração, juntamente com a possibilidade de danos decorrentes de choques e vibrações mecânicas.

c) Propostas de ações para garantia da confiabilidade metrológica dos equipamentos de medição

Apresentadas as alternativas encontradas na literatura é possível a proposição de ações para garantia da confiabilidade dos equipamentos utilizados nos ensaios de alta tensão.

Primeiramente são apresentadas algumas definições quanto às características dos equipamentos de medição:

- todo equipamento de medição é projetado para trabalhar sob condições de utilização¹² definidas;
- o comportamento dos parâmetros característicos desses equipamentos deve ser conhecido para maior confiabilidade do ensaio;
- os comportamentos são definidos, normalmente, por faixas em que as características devem permanecer nas condições de utilização definidas;
- a determinação do comportamento dos parâmetros fora das condições de ensaio fornece subsídios que contribuem para a avaliação do equipamento de medição;

Apresentadas as situações relacionadas à disponibilidade de serviços e aos níveis de tensão e sua influência na calibração as ações propostas são:

¹² Condições de uso para as quais as características metrológicas especificadas de um instrumento de medição mantêm-se dentro de limites especificados (BIPM, 2000). Este conceito apresentado pelo VIM pode ser expandido aos equipamentos de medição utilizados nos ensaios.

- calibração dos equipamentos ou sistemas de medição utilizando o nível de tensão disponível em laboratórios de referência ou acreditados. Apesar de não avaliados na tensão nominal o conhecimento do comportamento desses nas tensões disponíveis é bastante significativo (IEC, 1994; HUGHES, 1994). A dificuldade pode se apresentar na questão do transporte e garantia de que os equipamentos remetidos à calibração externa retornem sem nenhum tipo de avaria. Equipamentos como capacitores padrão para alta tensão podem ser muito sensíveis a choques e vibrações mecânicas ocorridas no transporte;
- verificação dos equipamentos ou processos de medição antes da realização do ensaio utilizando baixa tensão através de padrões com características conhecidas (ROBERTS, 1995). O monitoramento em baixa tensão pode ser uma alternativa para o acompanhamento das características desses equipamentos ou processos. No entanto, a não detecção de variações em baixa tensão não significa que o equipamento se comportará como desejado em alta tensão. Logicamente se detectadas não conformidades em baixa tensão essas devem ser investigadas.
- avaliação da característica de resposta dos parâmetros dos equipamentos de medição até os níveis de tensão disponíveis. Esse tipo de avaliação pode ser utilizado para estimar o comportamento do equipamento na tensão nominal;
- avaliação de parâmetros que não são característicos da utilização do equipamento de medição. Por exemplo, um transformador de potencial padrão, que tem como parâmetro característico sua relação de

transformação, pode ter suas características de isolamento avaliadas por meio de ensaios de fator de dissipação ou descargas parciais. Se identificadas variações significativas desses parâmetros, aliado a existência de dados históricos dos mesmos, o comportamento do equipamento pode estar aquém do desejado. Nesse caso uma avaliação mais criteriosa ou envio para calibração externa seja justificável apesar de riscos no transporte e indisponibilidade de um nível de tensão ótimo;

- realização de intercomparações entre os padrões e diferentes procedimentos disponíveis no laboratório ou em outros laboratórios.

A análise das ações propostas acima revela que essas não são excludentes entre si mas podem compor um sistema para garantia da confiabilidade dos equipamentos de medição.

Esse sistema deve ser baseado na construção de históricos para avaliação da evolução dos parâmetros dos equipamentos de medição.

De posse de dados de várias avaliações realizadas nos equipamentos de medição é possível evidenciar a conformidade desses às especificações relatadas pelos fabricantes.

A redução da contribuição desses equipamentos à estimativa da incerteza de medição dos ensaios também pode ser uma consequência da utilização de históricos.

A experiência adquirida pelo laboratório em relação ao comportamento dos equipamentos ou processos de medição é altamente significativa e deve ser registrada com o maior detalhamento possível. A realização periódica de ensaios de avaliação dos processos em diferentes condições e sob variados fatores de influência deve ser incentivada.

A busca por experiências e resultados de outros laboratórios também pode contribuir para a garantia da confiabilidade dos ensaios através do fortalecimento do conhecimento do comportamento dos equipamentos.

O próximo item se refere aos procedimentos de medição, onde é abordada a validação desses procedimentos. Tal validação é também eficaz na garantia da confiabilidade metrológica pois avalia os processos de medição.

3.3.2.4 Procedimentos de medição

Segundo o VIM (BIPM, 1998), procedimento de medição é o conjunto de operações, descritas especificamente, usadas na execução de medições particulares, de acordo com um dado método.

Como apresentado no item 2.6 os ensaios em alta tensão são susceptíveis a uma gama de fatores. Muitos desses podem ser difíceis de serem detectados e corrigidos. Uma abordagem preventiva pode ser realizada na forma dos procedimentos com alto grau de detalhamento das atividades inerentes aos ensaios. Esse detalhamento tem o intuito de minimizar efeitos indesejáveis e expor ações para solução de problemas encontrados no decorrer do ensaio.

a) Requisitos para procedimentos

A norma NBR ISO/IEC 17025 (ISO, 2001) especifica uma série de requisitos que atuam diretamente na elaboração, manutenção e execução dos procedimentos de medição. Tais requisitos são apresentados na figura 12 e comentados levando em consideração às particularidades dos ensaios de alta tensão.

Requisito NBR ISO/IEC 17025	Observações
O laboratório deve apresentar procedimentos documentados apropriados para realizar todos os serviços de calibrações e ensaios que realiza.	Os incentivadores apresentados no item 2.6 reforçam a necessidade de procedimentos documentados para assegurar a uniformidade na execução das atividades e conseqüente confiabilidade.
Instruções documentadas relativas ao uso e operação dos equipamentos mais relevantes.	Como em qualquer processo de medição os equipamentos de medição utilizados devem ser operados de maneira adequada para contribuir na confiabilidade da medição.
Procedimento documentado sobre a preparação e manuseio do objeto sob ensaio.	Os equipamentos ensaiados são, normalmente, de grande porte devido à necessidade de garantia da isolamento – gera-se desta forma uma dificuldade de experimentação. A limpeza do objeto sob ensaio e equipamentos de medição é importante, principalmente em ensaios para avaliação do sistema de isolamento (livre de poeira, umidade, gorduras ou outros contaminantes na isolamento externa).
Quando um ensaio segue determinada norma técnica esta deve ser a mais atual.	
Revisão dos procedimentos deve ser periódica e disseminada a todos.	Os incentivadores apresentados no item 2.6 evidenciam a alta susceptibilidade dos ensaios em alta tensão a variados fatores. A observação de condições atípicas pode requerer que procedimentos sejam revisados visando a identificação das causas desse comportamento.
Procedimentos estabelecendo cuidados especiais para realização de atividades fora do ambiente laboratorial.	
Os procedimentos devem ser validados, segundo procedimento documentado.	Segundo a NBR ISO 9000 ¹³ (ISO, 2000), validação é a comprovação, através do fornecimento de evidência objetiva, de que os requisitos para uma aplicação ou uso específicos pretendidos foram atendidos.

Figura 12 – Requisitos de procedimentos comentados em relação aos ensaios de alta tensão

b) Validação de procedimentos e sua contribuição para a confiabilidade metrológica

A NBR ISO/IEC 17025 (ISO, 2001) apresenta requisitos para avaliação dos métodos utilizados na execução das atividades de calibração e ensaio.

¹³ A NBR ISO 9000 apresenta os fundamentos e o vocabulário para sistemas de gestão da qualidade.

A extensão desses requisitos para aplicação nos procedimentos como um todo contribui para a confiabilidade metrológica. Nota-se uma grande interação entre a validação de procedimentos e a indisponibilidade de serviços de calibração para equipamentos de medição utilizados nos ensaios de alta tensão.

As técnicas utilizadas para validar o desempenho dos procedimentos elaborados pelo laboratório segundo a NBR ISO/IEC 17025 podem ser as seguintes ou uma combinação dessas (ISO, 2001):

- utilização de padrões de referência;
- uso de outros métodos/procedimentos;
- realização de comparações interlaboratoriais;
- avaliação sistemática dos fatores de influência;
- avaliação da incerteza do resultado baseado em fundamentos teórico-científicos do método e experiência prática.

A utilização dessas técnicas pode contribuir para diminuição da lacuna existente na prestação de serviços de calibração de equipamentos de medição em alta tensão.

c) Abordagem modular dos procedimentos de ensaio em alta tensão

A documentação de procedimentos pode se tornar longa e repetitiva no caso de ensaios em alta tensão. Esse fato é induzido por fatores como os apresentados no item 2.6, com destaque para a existência de grande número de marcas e modelos de equipamentos, que exigem abordagens específicas para cada equipamento.

Uma abordagem modular do procedimento de ensaio pode contribuir para a eficiência e eficácia da elaboração, execução e manutenção dos procedimentos de ensaio.

Propõe-se a execução de um ensaio através da utilização de uma série de procedimentos específicos. Estes serão referenciados em um único documento aqui denominado “Procedimento *Master* (PM)”, aplicável a um determinado tipo de equipamento (transformador de potencial, transformador de corrente, bucha, entre outros).

O conteúdo do PM é de cunho geral, isto é, aplicável a qualquer marca e modelo do equipamento ao qual se destina.

Os ensaios são divididos em grupos de acordo com a possibilidade da realização em uma única montagem (medições simultâneas).

A estrutura do PM será basicamente a seguinte:

- Informações gerais;
- Grupo 01;
- Grupo 02;
- ...
- Grupo n.

Em cada item denominado de grupo será apresentada uma tabela que fará referência a todos os documentos necessários para realização das atividades constantes no grupo.

É sugerida a elaboração de três procedimentos específicos, que são:

- preparação, montagem e crítica dos dados – este documento deve apresentar a montagem do circuito de ensaio/calibração. Sugere-se a elaboração de documentos exclusivos para cada equipamento de marca e modelo ou famílias de acordo com as especificidades de montagem. Sendo este um documento particular a um equipamento ou família de equipamentos nele deve ser apresentada uma sistemática simples para a

análise crítica dos dados coletados na execução do ensaio/calibração. Essa análise visa identificar possíveis erros na montagem do circuito;

- aquisição dos dados – este documento deve conter as informações de como proceder no manuseio dos instrumentos e na leitura dos dados;
- incerteza da medição e registros dos resultados – apresenta a descrição das características metrológicas pertinentes, juntamente com o procedimento para avaliação de incertezas de medição. Apresenta ainda a forma como devem ser documentados os resultados obtidos.

4 CONFIABILIDADE NA CALIBRAÇÃO DE TRANSFORMADORES DE POTENCIAL

Transformadores para instrumentos são equipamentos projetados e construídos especificamente para alimentação de instrumentos elétricos de medição¹⁴, controle ou proteção. Podendo ser de dois tipos - de potencial (TP) e de corrente (TC) - atuam como redutores de tensão ou corrente, isto é: a magnitude da grandeza no secundário é menor que a do primário (MEDEIROS FILHO, 1990).

O módulo da grandeza a ser medida é transformado por uma relação determinada para um valor secundário adequado aos instrumentos. A utilização de corrente e tensão secundária normalizada permite certa padronização dos instrumentos. Essa por sua vez leva a uma grande redução nos custos de fabricação, tanto dos instrumentos como dos próprios transformadores (OLIVEIRA, 2001).

No caso de transformadores de potencial a carga secundária é um instrumento de medição de tensões. Devido à queda de tensão na impedância interna do TP, gerada pelas correntes de carga e magnetização, surgem erros na magnitude e fase do secundário. Tais erros afetam a medição de faturamento de energia e os sistemas de proteção e controle que utilizam os instrumentos ligados ao secundário do TP (SETTLES, 1961; MEDEIROS FILHO, 1990; OLIVEIRA, 2001).

¹⁴ Quando o termo medição é empregado na designação do tipo de utilização de um transformador esta se refere à tarefa de compra e venda de energia elétrica, isto é, medição de energia. A utilização em proteção e monitoramento não exclui a definição de medição apresentada no VIM (INMETRO, 2000).

O conteúdo deste capítulo trata da calibração de transformadores de potencial (indutivos e capacitivos), isto é, o processo de avaliação dos erros de relação (magnitude) e fase existentes no TP.

Inicia-se com a caracterização do ensaio, vislumbrando aspectos relativos à avaliação da conformidade do TP quanto aos requisitos normativos e de especificação e a descrição do processo de medição. Finalmente, são expostas as contribuições específicas à confiabilidade metrológica como: avaliação da incerteza de medição e rastreabilidade.

4.1 Caracterização do ensaio

Todo transformador de potencial deve ser calibrado para determinação dos erros de relação e fase. Os limites desses erros e os métodos de ensaio são especificados por normas consensadas e difundidas nas empresas do setor elétrico (ABNT, 1992a; ABNT, 1992b).

A compreensão adequada de como as fontes de incerteza afetam o resultado do ensaio passa obrigatoriamente pela descrição e análise do processo de medição em seus principais aspectos: sistema de medição, procedimentos, condições de contorno, entre outros.

4.1.1 Aspectos relativos à avaliação de conformidade dos transformadores

A performance dos transformadores de potencial (TP) é normalmente especificada em termos do fator de correção de relação (FCR) e o erro de fase (γ), quando esses são submetidos a valores de cargas normalizados (SETTLES, 1961).

O FCR é o fator pelo qual deve ser multiplicada a “relação de transformação nominal k_{TN} ” para se obter a “relação de transformação real k_{TR} ” (MEDEIROS

FILHO, 1990). O valor do FCR, em valor percentual, é obtido diminuindo-se de 100% o erro de relação ($\epsilon\%$) medido na calibração, que pode ser positivo ou negativo.

A partir destes erros são definidas classes de exatidão, apresentadas na figura 13, nas quais os transformadores são enquadrados dependendo da sua aplicação típica (IEEE, 1993).

Erro de Relação Máximo	0,1 %	0,3 %	0,6 %	1,2 %
Aplicação	Medição para Faturamento	Medição para Faturamento	Proteção e Monitoração	Proteção e Monitoração

Figura 13 – Classes de exatidão e aplicações típicas de transformadores de potencial

As classes de exatidão apresentadas na figura 13 estabelecem limites de erro, que o transformador deve respeitar, para que seja considerado conforme à sua especificação (ABNT, 1992b). Essa é definida graficamente pelo paralelogramo apresentado na figura 14.

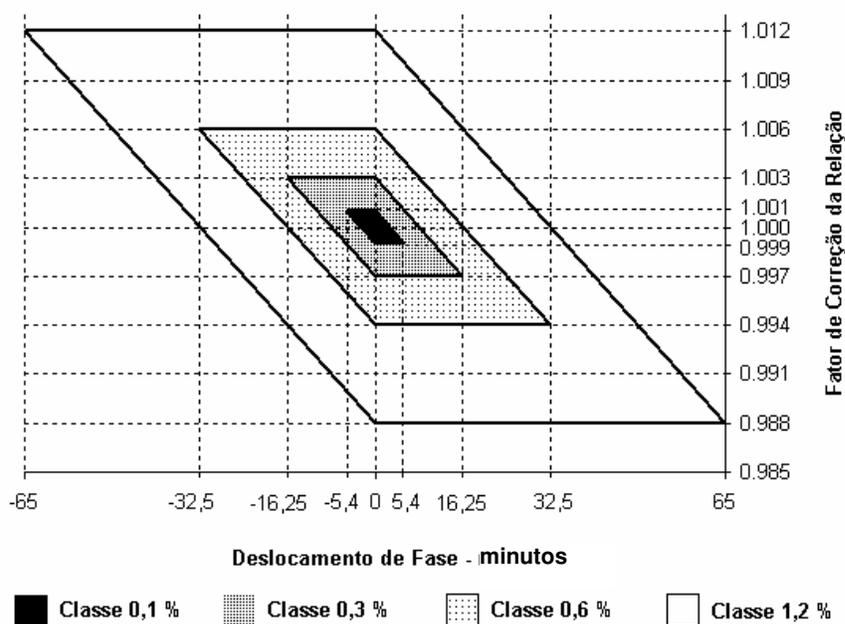


Figura 14 – Paralelogramo que delimita os erros de TP para as diversas classes

Considera-se que um TP está dentro de sua classe de exatidão em condições especificadas quando, nestas condições, o ponto determinado pelo fator de correção de relação e pelo ângulo de fase estiver dentro do paralelogramo de exatidão, correspondente à sua classe de exatidão, especificado da figura 14 (MEDEIROS FILHO, 1990).

A partir da definição dos limites dos erros de relação e fase pode-se definir a incerteza de medição máxima para uma avaliação de conformidade segura do transformador, como discutido no item 3.2.3.

A norma ISO 10012-1 (ISO, 1993) apresenta uma orientação que é a seguinte: o erro imputável à calibração deve ser tão pequeno quanto possível. Na maioria das áreas de medição não deveria ser maior do que um terço e, de preferência, um décimo do erro máximo admissível do equipamento avaliado.

Devido à qualidade dos equipamentos de medição utilizados na metrologia elétrica, a relação normalmente adotada, entre os limites de conformidade e a incerteza de medição, é três. Este valor é adotado no trabalho

De maneira rigorosa os níveis de incerteza na calibração dos transformadores, utilizando o fator definido acima, são apresentados na figura 15.

Classe de Exatidão do TP	0,1 %	0,3 %	0,6 %	1,2 %
Incerteza de Medição Máxima para Relação	0,03 %	0,1 %	0,2 %	0,4 %
Incerteza de Medição Máxima para Fase	1,8 '	5,4 '	10,8 '	21,7 '

Figura 15 - Incerteza de medição máxima para cada classe de exatidão

4.1.2 Aspectos relativos ao processo de medição

Na seqüência são apresentados: o circuito de calibração; a modelagem matemática estabelecida para a caracterização da calibração; algumas considerações sobre os procedimentos utilizados na montagem e execução da calibração.

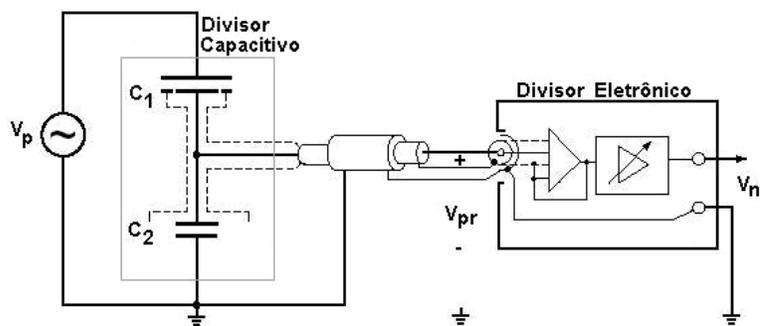
Todas as informações e análises, referentes a equipamentos e procedimentos, apresentadas neste item decorrem da interação com o laboratório de alta tensão em que foi desenvolvido este trabalho. Portanto, os princípios de funcionamento, circuito de calibração e aproximações apresentadas se referem a estrutura disponibilizada pelo referido laboratório.

No entanto, acredita-se que muitas das análises apresentadas possam ser aplicadas, na sua íntegra ou com adaptações, a outras estruturas disponíveis em laboratórios de alta tensão.

4.1.2.1 Descrição do circuito de calibração

A determinação dos erros de relação e fase do transformador de potencial é realizada a partir da comparação desse com um padrão coletivo de transformação. Tal padrão coletivo é composto por um divisor capacitivo seguido de um divisor eletrônico de tensão.

Esse conjunto, que tem a função de emular um transformador de potencial com a mesma relação de transformação, tem seu diagrama esquemático apresentado na figura 16.



Legenda:

C_1 - capacitor de alta tensão;

C_2 - capacitor de baixa tensão;

V_p - tensão de alimentação primária de ensaio;

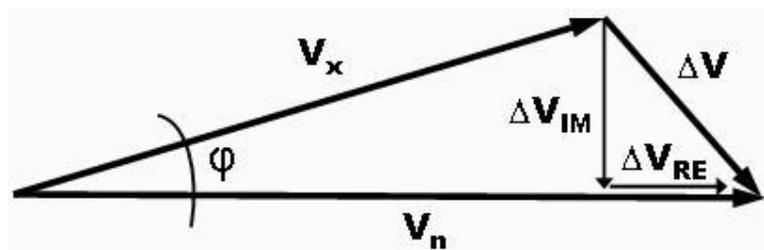
V_{pr} - tensão primária reduzida pelo divisor capacitivo;

V_n - tensão secundária padrão.

Figura 16 – Diagrama esquemático do padrão coletivo de transformação

Para a comparação das duas tensões, secundário do transformador a calibrar (V_x) e secundário do padrão (V_n), é utilizado um comparador eletrônico de tensão.

A operação do comparador pode ser descrita através da análise do diagrama da figura 17 (TETTEX, 1981a).



Legenda:

ΔV – é a diferença entre as tensões V_x e V_n ;

ΔV_{RE} – é a parte real do sinal ΔV ;

ΔV_{IM} – é a parte imaginária do sinal ΔV .

Figura 17 – Diagrama do princípio de funcionamento do comparador eletrônico

A decomposição do sinal ΔV em parte real e imaginária é realizada através de um retificador de fase seletiva. Utilizando os valores ΔV_{RE} e ΔV_{IM} o comparador aproxima os valores dos erros de relação e fase (TETTEX, 1981a). A figura 18 mostra as aproximações aplicadas pelo instrumento.

Erro		Aproximação
Relação (%)	$\varepsilon = \frac{V_x - V_n}{V_n} \cdot 100$	$\frac{\Delta V_{RE}}{V_n} \cdot 100$
Fase (min)	φ	$tg(\varphi) = \frac{\Delta V_{IM}}{V_n - \Delta V_{RE}}$

Figura 18 – Aproximações utilizadas pelo comparador eletrônico

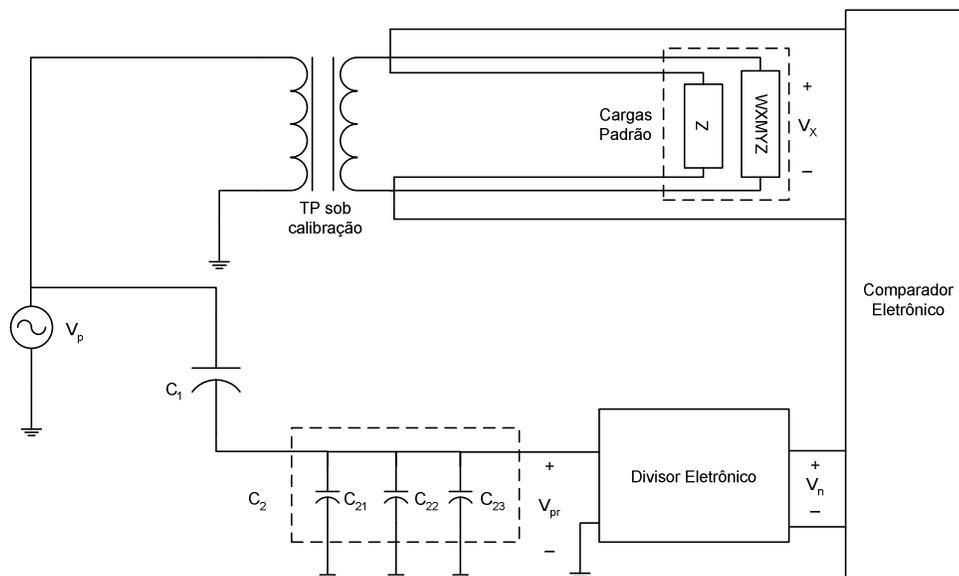
Toda aproximação requer que condições de contorno sejam estabelecidas e cumpridas para que se obtenha o resultado esperado. Nesse caso, a condição é que os sinais não sejam muito diferentes, tanto em magnitude quanto em fase. Para esse equipamento as maiores diferenças devem ser de 10% na magnitude e 1000 min na fase (TETTEX, 1981a).

O transformador deve ser avaliado nas seguintes condições previstas por norma (ABNT, 1992b):

- tensões primárias compreendidas na faixa de 90 % a 110 % da tensão nominal, com frequência nominal;
- para todos os valores de cargas padronizadas, desde vazio até a carga nominal especificada, salvo acordo entre fabricante e comprador.

A utilização de carga se justifica pela necessidade de simular uma situação real na qual o transformador é submetido em campo.

A figura 19 apresenta o diagrama completo do circuito de calibração analisado neste trabalho.



Legenda:

C_1 - capacitor de alta tensão;

C_2 - capacitor de baixa tensão (C_{21} , C_{22} e C_{23} compõe C_2 dependendo de V_p);

V_p - tensão de alimentação primária de ensaio;

V_{pr} - tensão primária reduzida pelo divisor capacitivo;

V_n - tensão secundária padrão;

V_x - tensão secundária do TP a calibrar;

W, X, M, Y e Z – denominação dos valores padronizados de carga para TP.

Figura 19 – Diagrama esquemático do circuito de calibração

Na figura 20 é apresentada a relação dos equipamentos de medição utilizados para realização da calibração.

Função	Descrição	Fabricante
Capacitor Padrão C_1	SC600 Compressed-Gas SF ₆ - 50 pF - 600 kV	Micafil
Capacitor Padrão C_2	C_{21} 3330 Standard Air Capacitor - 10000 pF – 1000 V	Tettex Instruments
	C_{22} 3330 Standard Air Capacitor - 9950 pF – 1000 V	
	C_{23} 3330 Standard Air Capacitor - 2000 pF – 1000 V	
Divisor Eletrônico	4854 Electronic Voltage Divider Standard	
Comparador Eletrônico	2765 Digital Instrument Test Set for Voltage Transformers	
Cargas Padrão	3600 Passive Standard Burdens	

Figura 20 - Equipamentos de medição utilizados na calibração

4.1.2.2 Modelagem da calibração

A partir da figura 19 obtêm-se algumas relações:

$$V_p = k_C \cdot V_{pr} \quad (1)$$

$$V_{pr} = k_E \cdot V_N \quad (2)$$

$$V_p = k_{TR} \cdot V_X \quad (3)$$

onde:

k_C : relação de transformação do divisor capacitivo;

k_E : relação de transformação do divisor eletrônico;

k_{TR} : relação de transformação real do TP;

V_p : tensão de alimentação primária de ensaio;

V_{pr} : tensão primária reduzida pelo divisor capacitivo;

V_N : tensão secundária padrão;

V_X : tensão secundária do TP a calibrar.

O erro de relação estimado pelo comparador eletrônico é dado pela equação

(4).

$$\varepsilon = \frac{V_X - V_N}{V_N} \quad (4)$$

Substituindo (1), (2) e (3) em (4):

$$\varepsilon = \left(\frac{k_E \cdot k_C}{k_{TR}} - 1 \right) \quad (5)$$

Isolando k_{TR} em (5):

$$k_{TR} = \left(\frac{k_E \cdot k_C}{(\varepsilon + 1)} \right) \quad (6)$$

O erro (E) entre a relação de transformação nominal do TP (k_{TN}) e k_{TR} , obtido através da equação (7), é apresentado na equação (8):

$$E = \frac{k_{TR} - k_{TN}}{k_{TN}} \quad (7)$$

$$E = \frac{k_E \cdot k_C}{k_{TN} \cdot (\varepsilon + 1)} - 1 \quad (8)$$

A equação (8) é o modelo matemático que representa o resultado da calibração do TP e é utilizado no item 4.2.1 para a avaliação de incertezas do processo. Nota-se que ele não depende da tensão aplicada ao transformador sob calibração.

4.2 Contribuições específicas à confiabilidade metrológica

Neste item são apresentadas: a avaliação de incertezas da calibração do TP; análise da avaliação de conformidade de transformadores vista a incerteza de medição obtida; ações para redução do nível de incerteza; análise da rastreabilidade do resultado da calibração.

4.2.1 Avaliação da incerteza de medição

A avaliação de incertezas deve ser um processo sistemático para facilitar seu entendimento, execução e identificação de possíveis problemas. Para tanto o trabalho é apresentado na seguinte seqüência: levantamento geral dos fatores de influência, equacionamento da incerteza padrão, apresentação das fontes de incerteza consideradas e desconsideradas e obtenção da incerteza expandida.

4.2.1.1 Levantamento geral de fontes de incerteza e equacionamento da incerteza padrão

Inicialmente é apresentado um levantamento geral das fontes de influência na calibração na figura 21.

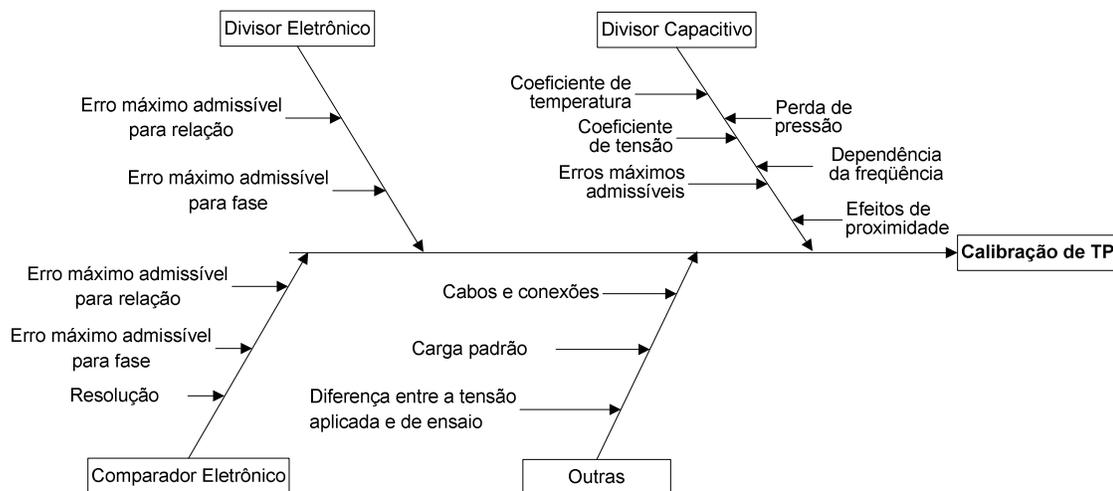


Figura 21 - Levantamento geral das fontes de incerteza

A partir das equações (1), (2) e (3) pode-se definir que $k_T = k_E \cdot k_C$, esta expressão é utilizada para determinar k_E .

A incerteza padrão do erro de relação E é estimada a partir das derivadas parciais da equação (8) em relação a cada uma das variáveis.

$$u^2(E) = u^2(k_C) \cdot \left(\frac{\partial E}{\partial k_C} \right)^2 + u^2(k_E) \cdot \left(\frac{\partial E}{\partial k_E} \right)^2 + u^2(\varepsilon) \cdot \left(\frac{\partial E}{\partial \varepsilon} \right)^2 \quad (9)$$

$$\frac{\partial E}{\partial k_C} = \frac{k_E}{k_{TN} \cdot (\varepsilon + 1)} \quad (10)$$

$$\frac{\partial E}{\partial k_E} = \frac{k_C}{k_{TN} \cdot (\varepsilon + 1)} \quad (11)$$

$$\frac{\partial E}{\partial \varepsilon} = \frac{k_C k_E}{k_{TN}} \cdot \frac{E_L}{(\varepsilon + 1)^2} \quad (12)$$

Para estimativa da contribuição do divisor capacitivo é apresentada na seqüência a sua relação de transformação.

$$k_C = \frac{C_1 + C_2}{C_1} \quad (13)$$

$$u^2(k_C) = u^2(C_1) \cdot \left(\frac{\partial k_C}{\partial C_1} \right)^2 + u^2(C_2) \cdot \left(\frac{\partial k_C}{\partial C_2} \right)^2 \quad (14)$$

$$\frac{\partial k_C}{\partial C_1} = -\frac{C_2}{C_1^2} \quad (15)$$

$$\frac{\partial k_C}{\partial C_2} = \frac{1}{C_1} \quad (16)$$

Para calibrações de transformadores utilizando tensão primária (V_P) de até 40 kV, o divisor eletrônico requer (TETTEX, 1981b):

$$C_2 = C_{23} \quad (17)$$

$$u(C_2) = u(C_{23}) \quad (18)$$

Para tensão primária (V_P) entre 40 kV e 400 kV (TETTEX, 1981b):

$$C_2 = C_{21} + C_{22} \quad (19)$$

$$u^2(C_2) = u^2(C_{21}) + u^2(C_{22}) \quad (20)$$

4.2.1.2 Fontes de incerteza consideradas

As componentes de incerteza relativas aos equipamentos de medição serão estimadas a partir das especificações dos fabricantes. A priori dados de calibrações existentes servirão para avaliação da conformidade desses equipamentos às suas especificações.

a) Divisor eletrônico de tensão 4854 Tettex

As especificações de erro máximo de relação e fase são 0,005% e 0,1 min, respectivamente (TETTEX, 1981b).

As contribuições são consideradas como uniformemente distribuídas e as incertezas padrão são apresentadas nas equações a seguir:

$$\frac{0,005\% \cdot k_E}{\sqrt{3}} \quad (21)$$

$$\frac{0,1 \text{ min}}{\sqrt{3}} \quad (22)$$

b) Comparador eletrônico de tensão 2765 Tettex

As expressões para os erros máximos de relação e fase são as apresentadas nas equações (23) e (24), respectivamente (TETTEX, 1981a). São consideradas como uniformemente distribuídas (distribuição retangular).

$$\pm 0,05 \% \text{ rdg}(\varepsilon\%) \pm 0,05 \% \text{ fs}(\varepsilon\%) \cdot \left(1 + \frac{\text{rdg}(\gamma) \cdot 10}{\text{fs}(\gamma)} \right) \quad (23)$$

$$\pm 0,05 \% \text{ rdg}(\gamma) \pm 0,05 \% \text{ fs}(\gamma) \cdot \left(1 + \frac{\text{rdg}(\varepsilon\%) \cdot 10}{\text{fs}(\varepsilon\%)} \right) \quad (24)$$

Onde:

$\text{rdg}(\varepsilon\%)$ – indicação do erro de relação;

$\text{fs}(\varepsilon\%)$ – faixa de medição de erro de relação do comparador eletrônico;

$\text{rdg}(\gamma)$ – indicação do erro de fase;

$\text{fs}(\gamma)$ – faixa de medição de erro de fase do comparador eletrônico.

Nota-se que os erros máximos na indicação do comparador são dependentes das duas leituras (relação e fase) e das faixas de medição. Não será considerada, no entanto, a recursividade existente entre as duas expressões, isto é, não será tratada a incerteza da incerteza, visto que esta é desprezível.

As indicações do comparador são digitais e sua resolução (Res) será considerada de distribuição retangular e incerteza padrão dada pela equação (25).

$$\frac{Re\ s}{2\sqrt{3}} \quad (25)$$

A resolução depende das faixas de medição utilizadas no comparador como apresentado na figura 22.

<i>Faixa de Medição (fs)</i>		<i>Faixa de Indicação</i>		<i>Resolução</i>	
Erro Relação	Erro Fase	Erro Relação	Erro Fase	Erro Relação	Erro Fase
± 10 %	± 1000 min	± 19,999 %	± 1099,9 min	0,001 %	0,1 min
± 1 %	± 100 min	± 1,9999 %	± 109,99 min	0,0001%	0,01 min

Figura 22 - Relação entre as faixas de medição e resolução

c) Divisor capacitivo

As especificações de fabricante para os erros máximos admissíveis dos capacitores são de 0,5 % para C_1 e 0,02 % para C_{21} , C_{22} , C_{23} . Esses serão considerados com distribuição uniforme e incerteza padrão igual ao erro máximo admissível dividido por raiz de três.

4.2.1.3 Fontes de incerteza não consideradas

Neste item são apresentadas justificativas para a desconsideração de algumas das fontes de influência apresentadas na figura 21. Os fatores de influência são: carga padrão; cabos e conexões; diferença entre a tensão normatizada de ensaio e a tensão aplicada.

A carga padrão na calibração tem função de emular a condição de carga quando o transformador está no campo. A garantia de que a carga padrão está dentro dos limites estabelecidos por normas é suficiente para desconsiderá-la como fonte de incerteza.

Com relação às conexões do transformador sob calibração à carga padrão, foi realizada uma medição da impedância dos cabos utilizados. Essa medição

evidenciou que essa impedância é cerca de um quinze avos do erro máximo das cargas padrão utilizadas. Tal evidência é justificativa para a desconsideração dessa fonte de influência na incerteza de calibração de transformadores.

As conexões do padrão de transformação coletivo apresentado na figura 16 são feitas por cabos com blindagem ativa que minimizam a influência das capacitâncias dos cabos e aumentam sobremaneira a razão de rejeição de modo comum do circuito. As definições de erros máximos para o padrão coletivo de transformação incluem, segundo o fabricante, as influências dos cabos.

Para a quantificação da influência da diferença entre tensão aplicada e tensão normatizada de ensaio seria necessária a avaliação de parâmetros característicos de cada transformador no momento da calibração.

A garantia de que a tensão aplicada na calibração está dentro dos limites de erros definidos pelas referências de ensaios em alta tensão é suficiente para garantia da confiabilidade da calibração.

4.2.1.4 Composição das incertezas

A composição da incerteza padrão da calibração será realizada segundo as equações (9) e (14), utilizando as contribuições definidas anteriormente e mais: indicações de erro de relação e fase do comparador eletrônico; relação de transformação nominal do transformador sob calibração; faixas de medição utilizadas do comparador eletrônico.

Para tanto, foram empregados dados de calibrações de dois transformadores com classes de exatidão distintas, apresentadas na figura 23. Tais calibrações foram realizadas no laboratório de alta tensão de acordo com o processo de medição descrito no item 4.1.2.

Classe de Exatidão	Temperatura de Calibração	Tensão Primária	Tensão Secundária	Relação de Transformação Nominal	Erros Lidos	
					Relação ($\epsilon\%$)	Fase (φ)
1,2 %	21 °C	132 kV	110 V	1200	-0,0675 %	3,26 min
0,3 %	29 °C	132 kV	110 V	1200	-0,0120 %	-1,05 min
Faixas de Medição do Comparador Eletrônico					1 %	100 min

Figura 23 - Dados de calibração para avaliação de incertezas de medição

As temperaturas de calibração estão dentro das condições de utilização dos equipamentos de medição empregados. A utilização da temperatura na avaliação de incertezas é julgada no item 4.2.2.2.

A estimativa da contribuição do divisor capacitivo, independente dos erros de relação e fase lidos no comparador eletrônico, é apresentada na figura 24.

Como a tensão de calibração é maior que 40 kV, deve-se respeitar a condição imposta pela equação (19), onde a capacitância C_2 é composta pela associação em paralelo das capacitâncias C_{21} e C_{22} .

Fonte de Incerteza		u	Derivada Parcial	
			Equação	Valor
C_1		$\frac{0,5\% \cdot 50 \text{ pF}}{\sqrt{3}} = 0,15 \text{ pF}$	(15)	$-\frac{7,98}{\text{pF}}$
C_2	C_{21}	$\frac{0,02\% \cdot 10000 \text{ pF}}{\sqrt{3}} = 1,16 \text{ pF}$	(16)	$\frac{0,2}{\text{pF}}$
	C_{22}	$\frac{0,02\% \cdot 9950 \text{ pF}}{\sqrt{3}} = 1,15 \text{ pF}$		
Incerteza Padrão de k_C		Equação (14)	1,15	

Figura 24 - Estimativa da incerteza padrão de k_C

Para a calibração do transformador de classe de exatidão 1,2 % a estimativa da incerteza expandida é apresentada na figura 25.

Fonte	Grandeza	Equação	Contribuição	Distribuição	Divisor	u	v
Erro Máximo do Comparador Eletrônico	Relação %	(23)	6,97E-06	R	$\sqrt{3}$	4,02E-06	Infinito
	Fase min	(24)	5,20E-02	R	$\sqrt{3}$	3,00E-02	Infinito
Resolução do Comparador Eletrônico	Relação %	(25)	0,0001	R	$2 \cdot \sqrt{3}$	2,89E-07	Infinito
	Fase min	(25)	0,01	R	$2 \cdot \sqrt{3}$	2,89E-03	Infinito
Erro Máximo do Divisor Eletrônico	Relação %	(21)	0,005	R	$\sqrt{3}$	8,66E-05	Infinito
	Fase min	(22)	0,1	R	$\sqrt{3}$	5,77E-02	Infinito
Incerteza Padrão de k_C	Relação %	(14)	1,15	N	-	1,15	Infinito
					V_{eff}	k	
Incerteza Padrão Combinada	Relação	(9)	0,288 %	Incerteza Expandida 95%	Infinito	2	0,58 %
	Fase	Soma Quadrática	0,113 min		Infinito	2	0,23 min

Figura 25 - Estimativa da incerteza expandida para a calibração do transformador classe 1,2%

Para a calibração do transformador de classe de exatidão 0,3 % a estimativa da incerteza expandida é apresentada na figura 26.

Nota-se que para essa avaliação as contribuições referentes à resolução do comparador eletrônico, ao erro máximo do divisor eletrônico e incerteza padrão do divisor capacitivo são as mesmas utilizadas na calibração do transformador de classe de exatidão 1,2 %.

Fonte	Grandeza	Equação	Contribuição	Distribuição	Divisor	u	v
Erro Máximo do Comparador Eletrônico	Relação %	(23)	$5.59 \cdot 10^{-5}$	U	$\sqrt{3}$	$3.22 \cdot 10^{-6}$	Infinito
	Fase min	(24)	$5.06 \cdot 10^{-2}$	U	$\sqrt{3}$	$2.92 \cdot 10^{-2}$	Infinito
Resolução do Comparador Eletrônico	Relação %	(25)	0,0001	R	$2 \cdot \sqrt{3}$	$2,89 \cdot 10^{-7}$	Infinito
	Fase min	(25)	0,01	R	$2 \cdot \sqrt{3}$	$2,89 \cdot 10^{-3}$	Infinito
Erro Máximo do Divisor Eletrônico	Relação %	(21)	0,005	R	$\sqrt{3}$	$8,66 \cdot 10^{-5}$	Infinito
	Fase min	(22)	0,1	R	$\sqrt{3}$	$5,77 \cdot 10^{-2}$	Infinito
Incerteza Padrão de k_C	Relação %	(14)	1,15	N	-	1,15	Infinito
					v_{eff}	k	
Incerteza Padrão Combinada	Relação	(9)	0,288	Incerteza Expandida 95%	Infinito	2	0,58 %
	Fase	Soma Quadrática	0,112		Infinito	2	0,22 min

Figura 26 - Estimativa da incerteza expandida para a calibração do transformador classe 0,3%

Nota-se que os valores de incerteza obtidos para ambos os transformadores são iguais para a relação e muito próximos para a fase. Evidencia-se então a baixa influência dos erros de lidos no comparador eletrônico frente à incerteza expandida das calibrações para os casos apresentados.

Essa situação tende a se repetir para a quase totalidade das possíveis condições de calibração. Somente em casos extremos de erros de relação e fase lidos, a parcela devida ao comparador poderá alterar de forma significativa a incerteza.

4.2.2 Situação atual da avaliação de conformidade e ações para redução da incerteza de medição

Neste item é apresentada a avaliação de conformidade dos transformadores considerando a incerteza de medição estimada anteriormente. A análise tem como

objetivo avaliar a adequação da incerteza de medição da calibração para declaração de conformidade dos transformadores.

Em seguida são apresentadas ações para redução do nível de incerteza de medição visando sua adequação ao processo de avaliação da conformidade.

4.2.2.1 Situação atual da avaliação da conformidade de transformadores de potencial

A figura 27 mostra os resultados das calibrações juntamente com os paralelogramos que definem a classe de exatidão dos transformadores. As incertezas de medição para o deslocamento de fase também estão incluídas. No entanto, não são visíveis por apresentarem valores extremamente baixos frente aos limites impostos pelas classes de exatidão.

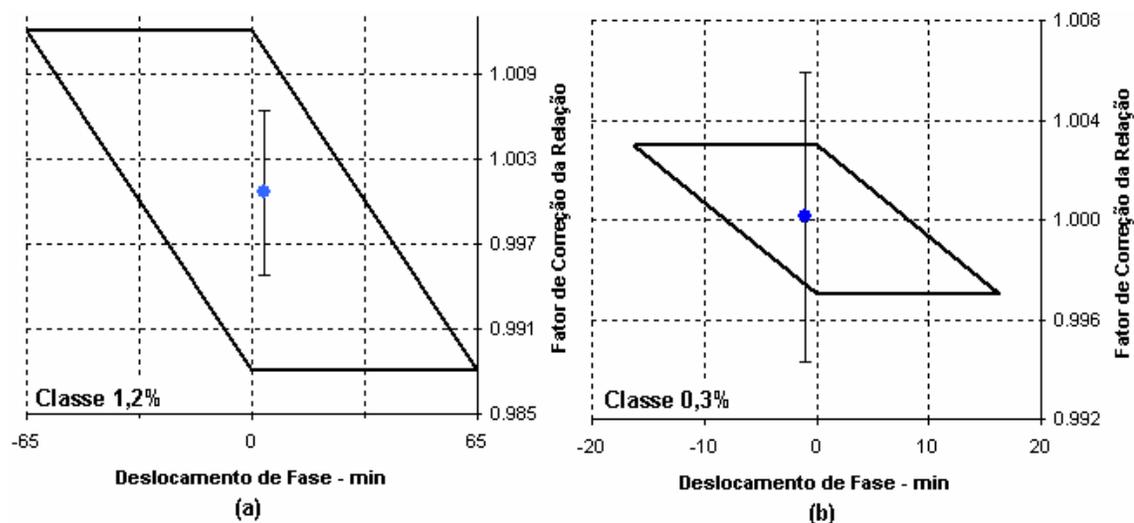


Figura 27 – Resultados da medição inseridos nos paralelogramos das classes

Nota-se que a avaliação de conformidade do transformador de classe 1,2% (figura 27a) pode ser realizada com segurança. O valor da incerteza de medição do

erro de relação não faz com que possam ser atribuídos, para o fator de correção da relação, valores fora dos limites da classe com uma probabilidade maior que 5%¹⁵.

No entanto, para o transformador de classe 0,3% (figura 27b) há uma probabilidade maior que 5%¹⁵ desse estar fora dos limites de conformidade.

Na figura 28 são apresentadas as incertezas de medição máximas, definidas no item 4.1.1, e as estimadas para os transformadores calibrados.

Classe de Exatidão do TP	0,3 %	1,2 %
Incerteza de Medição Máxima para Relação	0,1 %	0,4 %
Incerteza de Medição Estimada para Relação	0,6 %	0,6 %
Incerteza de Medição Máxima para Fase	5,4 min	21,7 min
Incerteza de Medição Estimada para Fase	0,22 min	0,23 min

Figura 28 - Comparação dos valores de incerteza de medição estimados e máximos

Nota-se que os valores das incertezas de medição estimados para a relação são maiores que os limites definidos no item 4.1.1 deste trabalho. Sendo que para a classe 0,3% a incerteza de medição ultrapassa os próprios limites da referida classe, condição que inviabiliza uma avaliação de conformidade segura. O caso referente à classe 1,2% é menos grave, mas ainda merece atenção para redução do nível de incerteza.

Em relação ao erro de fase, a incerteza de medição está em níveis seguros para a avaliação da conformidade dos referidos transformadores.

¹⁵ Os valores de incerteza expandida apresentados nas figuras Figura 25 e Figura 26 têm nível de confiança de 95,45 %. Com essa informação é possível estabelecer o limite de 5% para a probabilidade dos transformadores serem considerados dentro ou fora das classes de exatidão.

4.2.2.2 Ações para redução da incerteza de medição

A análise das componentes de incerteza de medição referentes ao erro de relação revela o divisor capacitivo como o principal agente para o elevado nível de incerteza. Entre as contribuições à incerteza de medição dos capacitores, o erro máximo admissível adotado para C_1 é de 0,5% e se estabelece como responsável pelo elevado valor da incerteza de k_C .

Para reduzir a contribuição do capacitor C_1 foram propostas e desenvolvidas no âmbito desta dissertação as atividades:

- análise do comportamento de capacitores similares através de pesquisa em artigos científicos. Essa pesquisa busca evidenciar que esse comportamento é muito melhor que o definido pelo seu erro máximo admissível;
- avaliação da validade da utilização de um transformador de potencial indutivo padrão existente no laboratório para estimar a contribuição real do capacitor C_1 na incerteza de medição.

a) Caracterização do comportamento do capacitor C_1

Os capacitores que utilizam gás pressurizado como dielétrico são empregados nos ensaios de alta tensão como: padrões em circuitos em ponte para medição de capacitância e fator de dissipação; divisores de potencial para medição de tensão alternada; parte de divisores de tensão de referência para calibração de transformadores para instrumentos (ANDERSON, 1978; LATZEL, 1987a; LATZEL, 1987b).

Esses capacitores baseiam-se no projeto proposto por Schering e Vieweg em 1928. São constituídos, basicamente, de dois eletrodos cilíndricos concêntricos,

sendo o eletrodo externo de alta tensão e o interno de baixa tensão que é conectado aos instrumentos de medição (LATZEL, 1987a; LATZEL, 1987b).

O capacitor em análise neste trabalho utiliza como dielétrico o hexafluoreto de enxofre (SF_6) com pressão interna de 0,35 MPa. O valor nominal da capacitância principal¹⁶ é de 50 pF ajustada em fábrica para uma tolerância de 0,5%. As condições de utilização são: tensão nominal de 600 kV em ambiente com umidade relativa máxima de 75%; faixa de temperatura de $-5\text{ }^\circ\text{C}$ a $45\text{ }^\circ\text{C}$; frequência da tensão aplicada de 50 Hz ou 60 Hz (MICAFIL, 1981a; MICAFIL, 1981b).

Nas avaliações de incerteza apresentadas no item 4.2.1, a tolerância de fabricação do capacitor padrão foi utilizada como especificação de erro máximo admissível do mesmo. Essa conduta é justificada pela inexistência de um histórico de calibrações como evidência do comportamento real do capacitor, assim como dados de fábrica que fornecessem subsídios para tal.

A utilização da tolerância em substituição à característica de erro máximo, inviabiliza o uso do capacitor como padrão nos processos de avaliação da conformidade do erro de relação dos transformadores de potencial abordados neste trabalho.

Na seqüência são apresentadas evidências de que a tolerância de fabricação não retrata o comportamento real do capacitor.

A referência MICAFIL (1981b) - especificação técnica do capacitor - apresenta alguns dados referentes a variações da capacitância frente a alguns fatores: coeficiente de temperatura de $30\text{ }\mu\text{F}/\text{F}\cdot^\circ\text{C}$; coeficiente de pressão interna do

¹⁶ O capacitor utilizado apresenta duas capacitâncias distintas: a principal que é utilizada para compor o divisor capacitivo na calibração analisada; uma segunda capacitância utilizada para medição da tensão aplicada utilizando um divisor interno e um voltímetro adequado (MICAFIL, 1981a; MICAFIL, 1981b).

gás de 2,2 pF/MPa; variação máxima da capacitância, para a tensão nominal aplicada, é menor que 30 $\mu\text{F}/\text{F}$.

Ao contrário de outros capacitores de alta tensão esses são blindados contra interferência eletromagnética (efeito da proximidade com outras estruturas energizadas). A imunidade a efeitos de proximidade é obtida pela utilização de um eletrodo de guarda para proteger o eletrodo de baixa tensão de campos elétricos parasitas (ANDERSON, 1978; LATZEL, 1987a).

A pesquisa nos artigos revela algumas características referentes a esse tipo de capacitor. Tais características são abordadas a seguir.

A principal causa das variações da capacitância pela **temperatura** é relativa às mudanças nas dimensões dos eletrodos e seus suportes. A capacitância pode diminuir ou aumentar dependendo dos coeficientes de dilatação desses componentes do capacitor. Essa dependência com a temperatura pode ser consideravelmente reduzida com o projeto de eletrodos com formas otimizadas e a utilização de materiais com características térmicas adequadas (LATZEL, 1987a; ANDERSON, 1978; NBS, 1988).

A dinâmica da variação da capacitância em função da **temperatura** ambiente é bastante lenta devido ao volume dos capacitores. As referências LATZEL (1987a) e RUNGIS (1981) trazem tempos para alcance de uma condição de regime permanente num período de (3 a 20) horas, dependendo do capacitor.

Dessa forma, a utilização de correções em ambientes com variações rápidas de **temperatura** é difícil pelo desconhecimento da temperatura do capacitor (ANDERSON, 1978; RUNGIS, 1981).

Em aplicações de divisores capacitivos, sendo esses formados por equipamentos diferentes, sugere-se que esses estejam sob as mesmas condições de influência da **temperatura** (ANDERSON, 1978).

Comparação dos valores de capacitância dos padrões de alta e baixa tensão, antes e após o ensaio, pode ajudar a minimizar o efeito da **temperatura** (RUNGIS, 1981; NBS, 1988).

A variação da capacitância como função da **pressão interna** assume dois aspectos básicos: na ocorrência de vazamento do gás; na mudança do volume interno do capacitor devido a alterações na temperatura.

Para os autores dos artigos pesquisados, a capacitância não deve ser corrigida pelo coeficiente de pressão se a variação da **pressão interna** for causada pela mudança de temperatura. Essa consideração é justificada pelo fato do número de moléculas de gás dentro do capacitor ser constante e a diminuição da densidade do gás resultante do aumento de volume causado por alterações de temperatura ser insignificante (ANDERSON, 1978; RUNGIS, 1981; LATZEL, 1987a; NBS, 1988).

Desta forma, a variação da **pressão interna** deverá ser considerada somente se for constatado vazamento do gás (RUNGIS, 1981; LATZEL, 1987a; ANDERSON, 1978; NBS, 1988).

As referências ANDERSON (1978), LATZEL (1987a) e NBS (1988) são unânimes na afirmação de que a influência da **pressão atmosférica** no valor da capacitância é desprezível.

Com referência à influência da **tensão aplicada**, essa se justifica pela excentricidade no alinhamento dos eletrodos causar forças eletrostáticas desbalanceadas. A excentricidade aumenta até que haja um balanceamento entre

as forças eletrostáticas e mecânicas atuantes nos suportes dos eletrodos. (ANDERSON, 1978; RUNGIS, 1981; LATZEL, 1987b).

O aumento da capacitância se comporta, aproximadamente, como uma função quadrática da **tensão aplicada** (ANDERSON, 1978; RUNGIS, 1981; LATZEL, 1987b; NBS, 1988).

Os artigos RUNGIS (1975) e GUANGGAN (1990a) apresentam algumas considerações sobre a **tensão aplicada** nos capacitores por longos períodos de tempo. Tais considerações evidenciam a ocorrência de variações no valor da capacitância causadas pelo aquecimento originário da energia elétrica enquanto o capacitor é submetido à tensão de ensaio.

Com referência à influência da **freqüência** da tensão aplicada, o artigo de LATZEL (1987a) evidencia que o capacitor é um sistema mecânico e pode ser excitado para ressonância através de sua freqüência natural f_0 .

Quando a **freqüência** da tensão se aproxima de f_0 , inicia-se uma ressonância mecânica dos eletrodos resultando em um comportamento ressonante da variação da capacitância.

No entanto, a influência do efeito ressonante em ensaios utilizando 50 Hz ou 60 Hz pode ser desprezada. Fato esse devido ao comportamento de capacitores acima de 100 kV que apresentam sua **freqüência** crítica $f_0/2$ bem abaixo dessas freqüências (LATZEL, 1987a).

As referências ANDERSON (1978), RUNGIS (1981), LATZEL (1987a) e GUANGGAN (1990b) fazem algumas considerações referentes à influência do **posicionamento** do capacitor.

Os experimentos apresentados por esses artigos revelam uma influência do ângulo de rotação do capacitor em relação ao ponto de apoio (chão). Os dados

apresentados pelos artigos indicam variações menores do que $5 \mu\text{F}/\text{F}$ para ângulos de rotação próximos de 12° .

A garantia de que o capacitor seja utilizado num ambiente onde o **posicionamento** seja adequado permite a desconsideração dessa fonte de influência.

A análise dos artigos revela que o comportamento de capacitores que utilizam gás como dielétrico é muito melhor que a tolerância de fabricação de 0,5%. Desta forma, pode-se justificar a possibilidade de redução dessa especificação através do experimento apresentado no próximo item.

b) Estimativa da real contribuição do capacitor à incerteza de medição

Para estimar a real contribuição do capacitor C_1 à incerteza de medição são utilizados dados de uma calibração realizada no transformador de potencial padrão disponível no laboratório.

O transformador de potencial padrão utilizado para avaliação do capacitor C_1 é o modelo 4820 da Tettex Instruments, e possui as seguintes características: tensões primárias de 50 kV e 100 kV; tensão secundária de 100 V para as nominais primárias; erro máximo admissível para relação de $\pm 0,02\%$; erro máximo admissível para fase de ± 1 min (TETTEX, 2001).

O transformador possui um certificado de ensaio, datado de julho de 2001, que é utilizado como evidência do seu comportamento apesar de não apresentar as avaliações das incertezas presentes no ensaio (TETTEX, 2001).

O circuito de calibração utilizado é similar ao apresentado na figura 19, onde o transformador sob calibração é o padrão 4820 da Tettex Instruments não submetido às cargas padrão. Desta forma, o equacionamento básico é idêntico ao exposto

anteriormente. No entanto, o que se avalia é a incerteza do divisor capacitivo para posteriormente estimar a contribuição do capacitor C_1 .

A partir da equação (4) é obtida a definição de k_C representada na equação (26), onde k_{TP} é a relação de transformação do TP padrão:

$$k_C = \left(\frac{k_{TP}}{k_E \cdot (\varepsilon + 1)} \right) \quad (26)$$

As contribuições à incerteza de k_E e k_{TP} são obtidas a partir dos erros máximos admissíveis. Quanto ao comparador eletrônico são utilizados o erro máximo admissível, a avaliação do Tipo A dos dados de calibração apresentados na figura 29 e a sua resolução.

Tensão aplicada	Leitura	Erro de relação (%)	Erro de fase (min)
100 kV	1	0,0015	0.05
	2	0,0017	0.05
	3	0,0016	0.04
	4	0,0016	0.05
	5	0,0016	0.05
	6	0,0016	0.05
	7	0,0016	0.05
	8	0,0016	0.05
	9	0,0014	0.04
	10	0,0016	0.04
	Média	0,00158	0,05
	Desvio padrão	$7,88811 \cdot 10^{-5}$	$4,83 \cdot 10^{-3}$

Figura 29 - Dados da calibração do TP Tettex

Para estimativa da incerteza de k_C é utilizada a equação (27), os cálculos são apresentados na figura 30.

$$u^2(k_C) = u^2(k_{TP}) \cdot \left(\frac{\partial k_C}{\partial k_{TP}} \right)^2 + u^2(k_E) \cdot \left(\frac{\partial k_C}{\partial k_E} \right)^2 + u^2(\varepsilon) \cdot \left(\frac{\partial k_C}{\partial \varepsilon} \right)^2 \quad (27)$$

Fonte	Coefficiente de Sensibilidade	Contribuição	Distribuição	Divisor	u
Erro Máximo do Comparador Eletrônico	$\left(\frac{\partial k_C}{\partial \varepsilon}\right)^2 = 159989,76$	$5,1 \cdot 10^{-4}$	R	$\sqrt{3}$	$2,9 \cdot 10^{-4}$
Resolução do Comparador Eletrônico	$\left(\frac{\partial k_C}{\partial \varepsilon}\right)^2 = 159989,76$	0,0001%	R	$2 \cdot \sqrt{3}$	$2,9 \cdot 10^{-5}$
Avaliação Tipo A	$\left(\frac{\partial k_C}{\partial \varepsilon}\right)^2 = 159989,76$	$7,9 \cdot 10^{-5}$	N	-	$7,9 \cdot 10^{-5}$
Erro Máximo do Divisor Eletrônico	$\left(\frac{\partial k_C}{\partial k_E}\right)^2 = 25599,18$	0,005%·2,5	R	$\sqrt{3}$	$7,3 \cdot 10^{-5}$
Erro Máximo do TP Padrão	$\left(\frac{\partial k_C}{\partial k_{TP}}\right)^2 = 0,16$	0,02%·1000	R	$\sqrt{3}$	0,12
Aplicando a equação (27), tem-se $u(k_C) = 0,13$ com $V_{\text{eff}} = 10^{16}$					

Figura 30 – Nova estimativa da incerteza padrão de k_C

A equação (28), para determinação de C_1 , é obtida da equação (13) e utilizada para avaliação da incerteza padrão de C_1 através da equação (29).

$$C_1 = \frac{C_2}{k_C - 1} \quad (28)$$

$$u^2(C_1) = u^2(k_C) \cdot \left(\frac{\partial C_1}{\partial k_C}\right)^2 + u^2(C_2) \cdot \left(\frac{\partial C_1}{\partial C_2}\right)^2 \quad (29)$$

Para estimar a incerteza de C_1 através da equação (29) são utilizados o erro máximo de C_2 e o valor de k_C que é determinado pela equação (26) para as seguintes condições: $k_{TP(\text{NOMINAL})} = 1000$; $k_{E(\text{NOMINAL})} = 2,5$; $\varepsilon = 0,00158\%$, que é a média das leituras dos erros de relação apresentados na figura 29. Tem-se então o valor de $k_C = 399,99$.

Na figura 31 são apresentados os cálculos para estimativa da incerteza padrão do capacitor C_1 .

Fonte	Coefficiente de Sensibilidade	Contribuição	Distribuição	Divisor	u
Incerteza Padrão de k_c	$\left(\frac{\partial C_1}{\partial k_c}\right)^2 = 0,016$	0,12998	N	-	0,13
Erro Máximo Admissível de C_2	$\left(\frac{\partial C_1}{\partial C_2}\right)^2 = 6,3 \cdot 10^{-6}$	0,02%·19950	R	$\sqrt{3}$	2,31
Aplicando a equação (29) tem-se $u(C_1) = 0,01702$ pF ou 0,034%					

Figura 31 - Estimativa da incerteza padrão de C_1

4.2.3 A nova situação da avaliação da conformidade de transformadores de potencial

A utilização da incerteza padrão de C_1 , apresentada na figura 31, nas avaliações de incertezas das calibrações dos transformadores de classe de exatidão 0,3 % e 1,2 % expostas anteriormente resulta nos dados da figura 32.

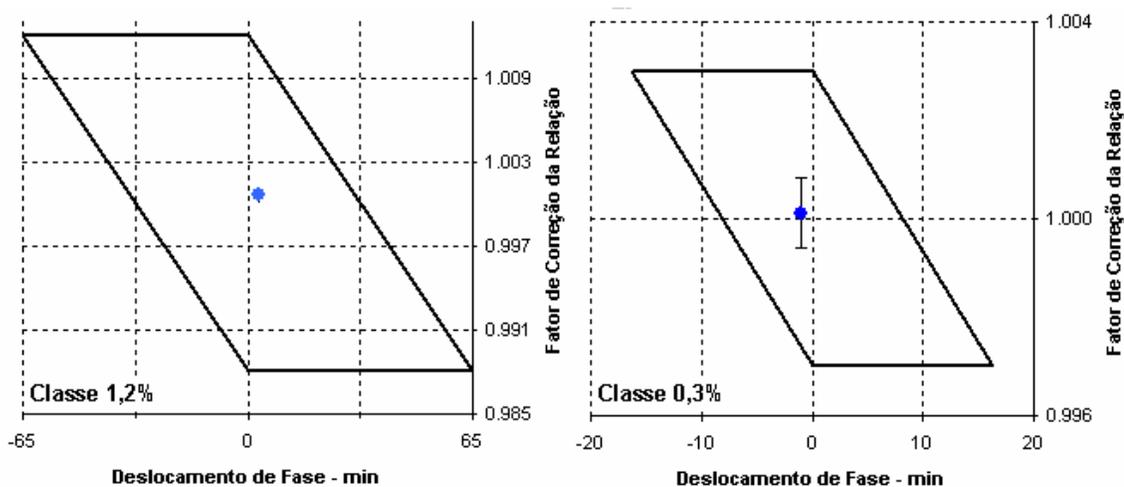


Figura 32 - Resultados da medição inseridos nos paralelogramos das classes para nova contribuição de C_1

As avaliações de incerteza para os dois casos seguem os mesmos cálculos apresentados no item 4.2.1.4, mas considera como contribuições do capacitor C_1 : a incerteza padrão estimada no item 4.2.2.2; o coeficiente de tensão aplicada apresentado no mesmo item.

Na figura 33 são apresentados os valores de incertezas estimados neste trabalho evidenciando a melhora significativa após as ações relativas ao capacitor padrão C_1 .

Classe de Exatidão do TP	0,3 %	1,2 %
Incerteza de Medição Máxima para Relação	0,1 %	0,4 %
Incerteza de Medição Estimada para Relação	0,6 %	0,6 %
Nova Incerteza de Medição Estimada para Relação	0,06 %	0,06 %

Figura 33 - Novos valores de incerteza para calibração de transformadores

A redução dos valores de incerteza estimada contribui de forma expressiva à avaliação da conformidade dos transformadores de potencial analisados neste trabalho.

4.2.4 Rastreabilidade

Como apresentado no item 3.2.2 a rastreabilidade dos resultados de medição garante credibilidade e segurança ao laboratório executor de ensaios. A garantia da rastreabilidade desses resultados é dependente de uma série de requisitos, como os definidos nos documentos ILAC (1994) e EA (1995), que são:

- cadeia ininterrupta de comparações a padrões nacionais ou internacionais para grandeza em questão;
- incerteza de medição avaliada segundo métodos consensados;

- cada etapa da cadeia de comparações deve estar documentada e de acordo com procedimentos disseminados e consensados;
- cada laboratório realizador das etapas da cadeia de comparações deve demonstrar sua competência técnica. Tal demonstração é assegurada pela acreditação do laboratório em questão;
- a cadeia de comparações deve terminar num padrão primário para concretização da grandeza em questão;
- programa de calibração periódica dos equipamentos de medição utilizados na atividade.

No caso deste trabalho, vistos os requisitos apresentados acima, a rastreabilidade dos resultados das calibrações de transformadores de potencial necessita de algumas ações para sua garantia.

No caso dos equipamentos de medição, utilizados na calibração de transformadores, há disponibilidade de calibração para:

- divisor eletrônico – a calibração disponível no mercado brasileiro atende as necessidades para avaliação da conformidade de transformadores de potencial utilizados em sistemas de transmissão;
- capacitores a ar (C_{21} , C_{22} , C_{23}) – a calibração disponível no mercado brasileiro atende as necessidades para avaliação da conformidade de transformadores de potencial utilizados em sistemas de transmissão;
- capacitor padrão (C_1) – a calibração disponível no mercado brasileiro é para tensão máxima até 200 kV, sendo que o capacitor C_1 tem tensão nominal de 600 kV.

A calibração do transformador de potencial padrão, utilizado na avaliação do capacitor padrão, está disponível no mercado brasileiro para sua tensão nominal de 100 kV.

Há evidência de duas necessidades para garantia da rastreabilidade do resultado da calibração: avaliação do capacitor padrão C_1 , visto que esse é comparado com um transformador de potencial padrão com tensão nominal de um sexto de sua tensão nominal; garantia de que o comparador eletrônico de tensão esteja funcionando dentro de suas especificações.

No caso de C_1 a cadeia de comparações a padrões nacionais e internacionais é prejudicada pelo nível de tensão disponível para calibração no Brasil. Outros fatores importantes são os riscos decorrentes do transporte do capacitor até o laboratório responsável pela calibração.

Nesse caso, as propostas de ações para garantia da confiabilidade metrológica de equipamentos de medição apresentadas no item 3.3.2.3 contribuem significativamente.

No caso do comparador eletrônico de tensão com a calibração não disponível no mercado sugere-se:

- calibração do conjunto transformador de potencial padrão mais comparador eletrônico;
- implementação de um método para calibração desse equipamento, por exemplo o proposto por HILLHOUSE (1984), utilizando uma fonte de tensão, um resistor variável e um capacitor.

A dependência no estabelecimento de referências metrológicas, por outras instituições, na disseminação da rastreabilidade de resultados de ensaios e calibrações pode ser amenizada com ações como as propostas nos itens 3.3.2.3c e

3.3.2.4b. Tais ações são baseadas, principalmente, na experimentação para avaliação e determinação do comportamento dos equipamentos de medição utilizados nos ensaios.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho se propôs a sistematizar uma abordagem dos ensaios em alta tensão de equipamentos do sistema de transmissão de energia elétrica visando garantir a qualidade dos resultados por esses obtidos.

Para o estabelecimento de um sistema que atingisse seus fins foram utilizadas referências que cobriram a atividade de ensaio em seus variados aspectos: técnicas em alta tensão; gestão laboratorial; garantia da qualidade metrológica; atendimento aos requisitos do cliente.

As conclusões e considerações finais são apresentadas sob dois aspectos: os relativos à confiabilidade de ensaios em alta tensão em geral; os relacionados à avaliação de conformidade e confiabilidade na calibração de transformadores de potencial.

5.1 Aspectos relativos à confiabilidade de ensaios em alta tensão

Na seqüência são apresentadas as principais conclusões sobre o estudo realizado neste trabalho visando a garantia da confiabilidade dos ensaios em alta tensão:

- os documentos utilizados para balizamento do sistema de garantia da confiabilidade metrológica cobriram as necessidades dos ensaios em alta tensão;
- a terminologia metrológica, estabelecida pelo Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM) e pelo Guia para a Expressão da Incerteza de Medição (ISO-GUM) é pouco difundida nos documentos referentes aos

ensaios de alta tensão e equipamentos utilizados no sistema de transmissão de energia elétrica;

- de uma forma geral não há uniformização de termos metrológicos entre as normas de garantia da qualidade e as normas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) referentes a esses equipamentos;
- a realização do estudo de caso e a análise detalhada das informações resultantes possibilitaram a identificação de uma gama considerável de dificuldades reais envolvidas na implementação do sistema metrológico na área de ensaios de alta tensão;
- as ações estabelecidas e executadas para garantia da confiabilidade metrológica apresentaram resultados satisfatórios. Tais resultados foram constatados no capítulo 4 referente à calibração e avaliação da conformidade de transformadores de potencial;
- o levantamento das componentes de incerteza envolvidas no processo de medição exige pessoal com conhecimentos de metrologia, de instrumentação, de estatística e do ensaio propriamente dito;
- dentre as vantagens da aplicação do Guia para a Expressão da Incerteza de Medição - ISO-GUM, cita-se a padronização do método, que possibilita de comparação de resultados. Por exemplo, a comparação de dados históricos viabiliza a análise e melhoria de processos de medição;
- a verificação de características metrológicas de equipamentos, sistemas ou processos de medição, se revelou uma atividade extremamente importante para garantia da confiabilidade metrológica dos ensaios em alta tensão;

- a experiência prática dos laboratórios se mostrou de suma importância para a confiabilidade metrológica dos ensaios, vista a situação em que alguns equipamentos de medição não são calibrados por indisponibilidade de serviço;
- a questão das especificações de equipamentos de medição é um problema generalizado na metrologia. Em relação à alta tensão poderia haver maior engajamento por parte dos fabricantes no detalhamento do comportamento dos equipamentos, vista a susceptibilidade desses aos fatores de influência;
- o desenvolvimento e aplicação de análises como as realizadas por este trabalho contribuem significativamente na avaliação da conformidade e conhecimento do comportamento dos equipamentos utilizados nos sistemas de transmissão de energia elétrica. A partir de ações como esta, mudanças de pequena amplitude nos parâmetros característicos dos equipamentos podem ser identificadas com incerteza assegurada e consideradas no acompanhamento da vida útil desses;
- um ganho bastante significativo se dá também em relação aos sistemas de diagnóstico de equipamentos da transmissão, isto é, ao comportamento dos equipamentos de medição utilizados nos ensaios. Esse fato decorre da sistematização e utilização de conceitos e métodos adequados para análise dos processos de medição apresentados nos ensaios. Isso é verdade tanto em relação às grandezas de interesse, como tensão ou corrente, quanto aos outros fatores que influenciam no comportamento desses equipamentos;

- vista a alta susceptibilidade às condições ambientais e o alto custo de instalações laboratoriais que as controlem, os laboratórios têm de ter conhecimentos para lidar com tal fato, sob pena de comprometer a confiabilidade metrológica;
- os esforços das entidades responsáveis por manter referências metrológicas para os ensaios em alta tensão estão caminhando para o estabelecimento dessas referências, que futuramente poderão cobrir as necessidades reais das empresas usuárias desses serviços. Essas referências são, por exemplo, os padrões de relação de transformação de alta tensão e alta corrente e padrões de capacitância e fator de dissipação dielétrica;
- há necessidade de criação de programas de comparação interlaboratorial pelas entidades de referência metrológica, para incentivo ao desenvolvimento dessa área da metrologia elétrica.

5.2 Aspectos relativos à confiabilidade metrológica da calibração de transformadores de potencial

A aplicação dos conceitos metrológicos possibilitou a adequação da incerteza de medição em níveis que possibilitam a avaliação da conformidade de transformadores de potencial.

A análise das especificações do capacitor padrão de alta tensão resultou num valor de incerteza de medição que comprometia a avaliação da conformidade. O procedimento de gerenciamento de incertezas de medição (PUMA), apresentado no item 3.3.2.2c, foi utilizado com sucesso no processo de redução dos níveis de incerteza na calibração de transformadores. A partir de um processo de medição

definido, a busca de maiores informações acerca de um dos equipamentos de medição possibilitou a adequação da incerteza de medição.

A confiabilidade do resultado da calibração pode ser garantida mesmo havendo impossibilidades de calibração de alguns equipamentos de medição. Essa constatação é resultado do grande acúmulo de experiência do laboratório juntamente com a utilização de técnicas e métodos metrologicamente adequados.

5.3 Propostas para trabalhos futuros

Foram identificados os seguintes temas para realização de futuros trabalhos:

- **realização de estudos de outros ensaios realizados em equipamentos de sistemas de transmissão de energia elétrica:** aplicação dos conceitos e métodos utilizados neste trabalho para garantia de que os referidos equipamentos sejam postos em campo com suas características asseguradas. Tais ensaios são, por exemplo: fator de dissipação dielétrica; descargas parciais; calibração de transformadores de corrente; resposta em frequência; ensaios com tensões e correntes impulsivas;
- **avaliações experimentais no capacitor padrão:** as informações sobre o comportamento do capacitor padrão, utilizadas neste trabalho, foram retiradas de publicações científicas. Visando estimar o comportamento do referido capacitor frente a diversos fatores de influências - tensão aplicada, temperatura, frequência da tensão, variação da pressão interna – sugere-se o desenvolvimento de experimentos;
- **formação de um banco de dados sobre o comportamento dos equipamentos de medição:** elaboração de um programa de avaliação de equipamentos de medição por meio de experimentação de seus

parâmetros através de ações como as apresentadas no item 3.3.2.3c. Tal programa buscaria a formação de um banco de dados referente a esses parâmetros. Esse por sua vez possibilitaria um conhecimento detalhado do comportamento dos equipamentos.

- **simulação de arranjos para montagem de circuitos para realização de ensaios:** o arranjo físico dos equipamentos de medição e equipamento sob ensaio tem forte influência no funcionamento do circuito e conseqüentemente no resultado do ensaio. Sugere-se a aplicação de *softwares* de simulação de campos elétricos e magnéticos para definição de configurações ideais de montagem dos circuitos de ensaio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6820**: Transformador de potencial indutivo – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1992a. 22 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6855**: Transformador de potencial indutivo – especificação. Rio de Janeiro, 1992b. 16 p.

ANDERSEN, Bjarne; BARKER, Carl. A new era in HVDC? **IEE Review**, v. 46, Issue 2, March, 2000.

ANDERSON, W. E.; DAVIS, R. S.; MOORE, W. J. M. An international comparison of high voltage capacitors calibrations. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**. v. 97, n. 4, July/Aug 1978. 7 p.

BERGMAN, A. In-situ calibration of voltage transformers on the Swedish national grid. **Eighth International Conference on Metering and Tariffs for Energy Supply**, July, 1996.

BERGMAN, A., et al. Demonstration of traceability in high voltage tests by means of a record of performance. **Electra**, December, 2001. 5 p.

BERLIJN, S, et al. **Today's problems with the evaluation methods of full lightning impulse parameters as described in IEC 60060-1**. Disponível em: <http://www.unics.uni-hannover.de/schering/PDF/werle_ish_eu_99.pdf> Acesso em: 27/05/04

BIPM, et al. **Guia para a expressão da incerteza de medição**. 2 ed. Tradução por INMETRO et al. de "Guide to the expression of uncertainty in measurement". Rio de Janeiro: INMETRO, ago. 1998. 120p.

CARNEIRO, João Carlos. Aspectos de confiabilidade de equipamentos elétricos de alta tensão constatados na inspeção e ensaios de recebimento em fábrica: subsídios para avaliação da qualidade do produto e suas conseqüências para o fornecimento de energia elétrica. **XV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**, Foz do Iguaçu, 1999. 6 p.

CLAUDI, Albert; LOPPACHER, Matthias. **New methods for improving the reliability of non-destructive high voltage impulse testing**. Haefely Trench AG, Switzerland, 1998. 10 p.

CLAUSS, Uwe; MAUCKSCH, Stefan. Calibration of high-voltage test equipment. **HV Testing, Monitoring and Diagnostics Workshop**, Virginia, 2000. 5 p.

CONMETRO – CONSELHO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. Dispõe sobre a alteração do termo “Credenciamento” para “Acreditação” para expressar reconhecimento de competência de organismos de avaliação da conformidade no âmbito do Sinmetro. Resolução n.º 05, de 10 de dezembro de 2003.

COUTO, Paulo R. G.; OLIVEIRA, Jackson da Silva; CINELLI, Leonardo Rodrigues. Algumas considerações sobre as metodologias de cálculo da estimativa da incerteza de medição citadas no EM GUM 95. **3º. Metrosul Congresso Sul-americano de Metrologia**, Curitiba, 2002. 6 p.

COX, M. G.; HARRIS, P. M. GUM supplements. **CIE Expert Symposium on Uncertainty Evaluation**, Austria, 2001a. 12 p.

COX, M. G.; HARRIS, P. M. Measurement uncertainty and the propagation of distributions. **10th International Metrology Congress**, France, 2001b. 6 p.

COX, M.; DANTON, M.; HARRIS, P.; RIDLER, N. The evaluation of uncertainties in the analysis of calibration data. **Proceedings of the 16th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference**, v. 2, 1999. 6 p.

DAR – DEUTSCHER AKKREDITIERUNGS RAT. **Introducing the concept of uncertainty of measurement in testing in association with the application of the standard ISO/IEC 17025**. Berlin, 2002. 6 p.

EA - EUROPEAN COOPERATION FOR ACCREDITATION OF LABORATORIES. **Traceability of measuring and test equipment to national standards**. 1995. 16 p. Disponível em: < <http://www.european-accreditation.org/pdf/EA-4-07.pdf>>. Acesso em: 16 de setembro de 2004.

FITZPATRICK, Gerald J.; KELLEY, Edward F. Comparative high voltage impulse measurement. **Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology**, v. 101, no. 5, 1996.

FLESCH, C. A. **Estruturação de um sistema de simulação de instrumentos de medição**. Florianópolis, 2001 156 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.

FLESCH, C. A. **Sistema de gerenciamento da confiabilidade metrológica**. Documento de referência para adequação das ações relativas a confiabilidade metrológica. Projeto CETRAM, UFSC/ELETROSUL. 2003, 12 p.

FLUKE Corporation. **Calibration: philosophy in practice**. Fluke Corporation, 2 ed. 1994.

GIÁGIO, Marco Antônio. **Gerenciamento técnico e econômico de laboratório de calibração credenciado**. Florianópolis, 2001 94p. Dissertação (Mestrado em Metrologia Científica e Industrial) – Programa de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina.

GOCKENBACH, Ernst. Testing and monitoring as basis of the dielectric diagnostic. **Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering**. August, 1999. 5 p.

GUANGGAN, G. BAOWANG Z.; The establishment of 10 kV to $500/\sqrt{3}$ kV power frequency voltage ratio national standard system and study of the calibration method. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. IM-43, p. 671-675, 1994.

GUANGGAN, Gao. The effect of the electric field of the grounded electrode on the capacitance of compressed-gas capacitors. **CPEM '90 – Conference on Precision Electromagnetic Measurements**, 11-14 June 1990b. 1 p.

GUANGGAN, Gao; DAMING, Xu. Experimental study of the voltage coefficient of precise compressed-gas capacitor. **CPEM '90 – Conference on Precision Electromagnetic Measurements**, 11-14 June 1990b. 2 p.

HALL, A. C. Nemas accreditation for high voltage measurements and tests. **IEEE Colloquium at The National Grid Company**, London, 1997. 4 p.

HÄLLSTRÖM, J.; CHEKUROV, Y.; ARO, M. Calculable voltage impulse calibrator for calibration of impulse digitizers. **Conference on Precision Electromagnetic Measurements**. June, 2002. 6 p.

HASS, D. D. **Dielectric sensing of ceramic particle suspensions**. 1996. 99 f. M.S. Thesis, University of Virginia.

HILLHOUSE, D. L.; PETERSONS, O.; SZE, W. C. A simplified system for calibration of coupling capacitor voltage transformers. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**. v. 103, n. 5, May 1984. 7 p.

HINGORANI, N.G. High-voltage DC transmission: a power electronics workhorse. **IEEE Spectrum**, v. 33, issue 4, April 1996. 9 p.

HUGHES, R. C., et al. Traceability of measurement in high voltage tests. **Electra**, Aug, 1994. 6 p.

HYLTÉN-CAVALLIUS, Nils. **High voltage laboratory planning**. Aseas-Heafely, 1986. 309 p.

IEC – INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60-1**: High voltage test techniques – Part 1: General definitions and test requirements. 2 ed. Nov 1989.

IEC – INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60-2**: High voltage test techniques – Part 2: Measuring systems. 2 ed. Nov 1994.

IEC – INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60-2**: High voltage test techniques – Part 2: Measuring systems – Amendment 1. Mar 1996.

IEEE – INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std 3:** Recommended practice in the selection of reference ambient conditions for test measurements of electrical apparatus. New York, 1982. 18 p.

IEEE – INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std 4:** Standard Techniques for High-Voltage Testing. New York, 1995. 139 p.

IEEE – INSTITUTE OF ELECTRICALS AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Standard 1122:** Digital Recorders for Measurements in High Voltage Impulse Tests. New York, 1987. 22 p.

IEEE – INSTITUTE OF ELECTRICALS AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Standard C57.13:** Requirements for instrument transformers. New York, 1993. 81 p.

ILAC - INTERNATIONAL LABORATORY ACCREDITATION COOPERATION. **Traceability of measurements.** 1994. 53 p. Disponível em: <<http://www.ilac.org/downloads/ilac-g2.pdf>>. Acesso em: 16 de setembro de 2004.

INMETRO – INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia** – Versão Brasileira do “*Vocabulary of basic and general terms in metrology*” 2ª ed. Brasileira, Brasília, 2000.

INMETRO – INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Diretrizes estratégicas para a metrologia brasileira 2003-2007.** CBM – Comitê Brasileiro de Metrologia, Rio de Janeiro, 2003.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10012:** Measurement management systems – Requirements for measurement processes and measuring equipment. 1ª. Ed. Apr 2003.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14253-1:** *Geometrical product Specifications (GPS) – Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment. Part 1 Decision rules for Proving Conformance or Non-conformance whit Specifications.* 1a. ed. nov.1998. 14 p.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14253-2:** *Geometrical product Specifications (GPS) – Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment. Part 2 Guide to the estimation of Uncertainty in GPS Measurement, in Calibration of Measuring Equipment and in Product Verification.* 1a. ed. Dec.1999. 72 p.

ISO/ABNT INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **NBR ISO 10012-1:** Requisitos de garantia da qualidade para equipamento de medição – Parte 1: Sistema de comprovação metrológica para equipamento de medição. Tradução: Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro: ABNT, NOV. 1993.

ISO/ABNT INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **NBR ISO/IEC 17025:** Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração. Tradução: Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro: ABNT, JAN. 2001.

ISO/ABNT. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **NBR/ISO 9000: Sistemas de gestão da qualidade – Fundamentos e Vocabulário.** Tradução: Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro: ABNT, dez. 2000.

KATANCEVIC, Aleksandar. Challenging opportunities for incoming engineers in HVDC transmission technology. **IEEE Power Engineering Society Winter Meeting**, New York, 2002. 6 p.

KESSEL, Wolfgang. **ISO/BIPM Guide: uncertainty of measurement.** Germany, 1999. Disponível em: <http://www.metrodata.de/papers/resistor_em.pdf>. Acesso em: 30 de junho de 2004.

KIND, Dieter. **An introduction to high-voltage experimental technique.** Vieweg, 1978. 212 p.

KUFFEL, E; ABDULLAH, M. **High voltage engineering.** London, 1970. 337 p.

LATZEL, H. G., SCHON, K. Precise capacitance measurements of high-voltage compressed gas capacitors. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. IM-36, p. 381-384, 1987a.

LATZEL, H. G., WANG, L. A voltage-doubling method for measuring the voltage dependence of compressed gas capacitors. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. IM-36, p. 730-734, 1987b.

LUCAS, J. Rohan. **High voltage engineering.** Sri Lanka, 2001. Disponível em: <<http://hot-streamer.com/TeslaCoils/OtherPapers/JR-Lucas/>>. Acesso em: 02 de fevereiro de 2004.

MAGALHÃES, C. H. N., et al. Influência da manutenção sobre a confiabilidade de sistemas de potência. **XII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**, Recife, 1993. 6 p.

MAURIS, Gilles; LASSERRE, Virginie; FOULLOY, Laurent. A fuzzy approach for the expression of uncertainty in measurement. **Measurement 29**, Elsevier Science Ltd., 2001. 13 p.

MCT – MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **Programa de tecnologia industrial básica e serviços tecnológicos para a inovação e competitividade.** Brasília, 2001 100p. Coordenação de Política Tecnologia Industrial, Governo Federal.

MEDEIROS FILHO, S. **Medição de energia elétrica.** 3 ed. Guanabara. Rio de Janeiro, 1990.

MICAFIL. Operating Manual. **Standard capacitor SC 200, 400, 600, 1000.** Switzerland, 1981a. 11 p.

MICAFIL. Technical specification. **Standard capacitor SC 600.** Switzerland, 1981b. 1 p.

MORGAN, J. D. High voltage testing. **IEEE Potentials**, 1988. 5 p.

MOTTA, Sergio Brandão da; COLOSIMO, Enrico Antônio. Impactos da manutenção e dos custos da não confiabilidade de equipamentos sobre as receitas de serviços de transmissão de energia elétrica. **XVII Seminário Nacional de produção e Transmissão de Energia Elétrica**, Uberlândia, 2003. 6 p.

NBS – NATIONAL BUREAU OF STANDARDS. **A calibration service for voltage transformers and high-voltage capacitors**. Washington, 1988. 36 p.

NIKOLOPOULOS, P. N.; TOPALIS, F. V. Accurated method of representation of high voltage systems and its application in high-impulse-voltage measurements. **IEE Proceedings**, v. 136, no. 2, 1989.

NPL – NATIONAL PHYSICAL LABORATORY. **Final work programme – direct current and low frequency, RF and microwave electromagnetic metrology**. London, 2000. 74 p.

OLIVEIRA FILHO, Orsino. **Metrologia na alta tensão**. Mensagem recebida por <cep@labmetro.ufsc.br> em 18 dezembro 2003a.

OLIVEIRA FILHO, Orsino. Qualificação de sistemas de medição utilizados em ensaios de alta tensão. **I Encontro Nacional de Laboratórios de Alta Tensão**, Curitiba, 1995. 6 p.

OLIVEIRA FILHO, Orsino; SILVA, Márcio Thelio F.; AZEVEDO, Luiz Carlos. Estabilidade e periodicidade de calibração de sistemas de medição de alta tensão. **Metrologia 2003 – Congresso Brasileiro de Metrologia**, Recife, 2003b. 4 p.

OLIVEIRA, Patrícia Cals de. **Análise de transformadores de corrente para medição**. Rio de Janeiro, 2001, 127p. Dissertação (Mestrado em Metrologia para Qualidade Industrial) – Programa de Pós-graduação em Metrologia Qualidade Industrial, Pontifícia Universidade Católica.

ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA. **mapa do sistema interligado nacional: rede de operação**, 2003. 1 mapa: 89 x 89 cm. Escala: 1:5 000 000.

ORFORD, G. R. Measurement uncertainties. **IEE Colloquium on Contribution of Instrument Calibration to Product Quality** – Part 2. April, 1995.

PASQUA, M. C.; CAVICHIOLI N. R. Um enfoque de qualidade na programação da manutenção no novo contexto do setor elétrico. **XVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**, Campinas, 2001. 6 p.

ROBERTS, I. A. UKAS accreditation in an HV laboratory: A management perspective. **IEE Colloquium on Accreditation for High Voltage Measurements and Tests**. Feb. 1997. 5 p.

RUNGIS, J.; BROWN, D. E. Experimental study of factors affecting capacitance of high-voltage compressed-gas capacitors. **IEE Proceedings**, v. 128, May, 1981. 5 p.

RUNGIS, J.; BROWN, D. E. Voltage induced capacitance fluctuations in a compressed gas, high voltage capacitor. **Journal of Physics E: Scientific Instruments**, v. 8, 1975. 2 p.

RUNGIS, J.; LI, Yi; McCOMB, T. R. Uncertainties of impulse voltage measurements at NML, CSIRO and INMS, NRC. **Conference on Precision Electromagnetic Measurements**. June, 2002. 6 p.

RYAN, Hugh M. **High voltage engineering and testing**. London, 1994. 728 p.

SANTOS, Enio Cezar Campesatto dos. Uma contribuição ao gerenciamento da indisponibilidade com enfoque na manutenção de equipamentos de subestações. **XVII Seminário Nacional de produção e Transmissão de Energia Elétrica**, Uberlândia, 2003. 7 p.

SCHON, Klaus. Traceability of high voltage measurements. **2º Seminário Internacional de Metrologia Elétrica**, Curitiba, 1996. 12 p.

SERMARINI, André Luis. Aspectos técnicos e gerenciais de manutenção em instalações elétricas: Estudo de caso da manutenção preventiva centrada em confiabilidade. **XVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**, Campinas, 2001. 6 p.

SETTLES, J. L. et all. **The analytical and graphical determination of complete potential transformer characteristics**. AIEE Transformers Committee, Feb. 1961.

SIQUEIRA, Iony P. Impactos da manutenção na disponibilidade e performance de sistemas elétricos de potência. **XVI Seminário Nacional de produção e Transmissão de Energia Elétrica**, Campinas, 2001. 6 p.

SOARES, JR. L. **Confiabilidade metrológica no contexto da garantia da qualidade industrial: Diagnóstico e Sistematização de Procedimentos**. Florianópolis, 1999 120p. Dissertação (Mestrado em Metrologia Científica e Industrial) – Programa de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina.

STILLMAN, Roger. Accreditation in high voltage testing. **IEE Colloquium on Accreditation for High Voltage Measurements and Tests**. Feb. 1997. 4 p.

TANG, Hong; BERGMAN, Anders. Development and evaluation of high resolution measuring system for a switching impulse measurement. **Conference on Precision Electromagnetic Measurements**, 2000.

TETTEX INSTRUMENTS. Test Certificate. Standard voltage transformer. Switzerland, 2001. 2 p.

TETTEX INSTRUMENTS. Instruction Manual. **Digital instrument test sets for current and voltage transformers**. Switzerland, 1981a. 15 p.

TETTEX INSTRUMENTS. Instruction Manual. **Electronic voltage divider standard**. Switzerland, 1981b. 14 p.

TURZENIECKA, Danuta. Errors in the evaluation of the coverage factor as a criterion of applications of approximate methods of evaluation of expanded uncertainty. **Measurement 27**, Elsevier Science Ltd., 2000. 7 p.

WECK, Karl-Heinz. Quality of high-voltage research and testing. **Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering**, 1999. 4 p.

ZHANG, Yi Xin; TONELO, Oscar. Computer controlled impulse test & measurement system. **IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference**, Belgium, 1996. 6 p.

ZINGALES, Giuseppe. Air humidity measurements for H.V. tests. **Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering**, 1999. 3 p.