

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**

**Centro Tecnológico**

**Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial**

**Diretrizes para estabelecimento de um método de  
avaliação da conformidade de equipamentos de medição  
de grandezas elétricas**

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

**Autor: Rodrigo Coral, Eng.**

**Florianópolis, outubro de 2004.**

# **Diretrizes para estabelecimento de um método de avaliação da conformidade de equipamentos de medição de grandezas elétricas**

*Rodrigo Coral*

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

**“MESTRE EM METROLOGIA”**

e aprovada em sua forma final pelo

PROGRAMA DE PÓS-CRADUAÇÃO EM METROLOGIA CIENTÍFICA E INDUSTRIAL DA UFSC

Prof. Carlos Alberto Flesch, Dr. Eng.  
Orientador

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

**BANCA EXAMINADORA:**

Prof. Marco Antonio Martins Cavaco, Ph. D.  
Universidade Federal de Santa Catarina

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

Gustavo Daniel Donatelli, Dr. Eng.  
Universidade Federal de Santa Catarina

**Ao meu pai, Zelindo e à minha mãe, Maria das Graças.**

**Aos meus irmãos Sergio e Carini.**

**À minha noiva Patrícia.**

## AGRADECIMENTOS

Ao professor Carlos Alberto Flesch pela orientação neste trabalho e durante minha graduação, a quem muito admiro e respeito.

Aos membros da banca pelas contribuições.

À minha noiva, meus pais e irmãos pelo imenso sacrifício realizado e irrestrito apoio.

Aos professores do Programa de Pós-graduação de Metrologia Científica e Industrial, pela oportunidade a mim concedida de poder ampliar meus conhecimentos.

A todos os colegas de mestrado e Labmetro, em especial André Paz Rosa, Cesar Alberto Penz, Eduardo Leseire Poletto, Jaison Seberino Meis, José Ricardo de Menezes e Patrick Mendes Cardoso, pela grande amizade formada.

Aos meus colegas da “panela” que venho mantendo uma grande amizade desde os tempos de escola técnica.

À UFSC e PósMCI por ter me concedido a oportunidade de realização do mestrado.

À Eletrosul pela oportunidade e pelo apoio concedido.

À Rosana por todo o seu carinho durante os anos de Labmetro e PósMCI.

Por fim, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para que este trabalho pudesse ser concretizado.

**“De pequenas recompensas é que construimos nosso tesouro”.**

Rodrigo Coral e Cesar Alberto Penz,  
em tarde inspirada regada a cerveja.

## RESUMO

Um dos componentes responsáveis pela confiabilidade dos sistemas elétricos de transmissão e distribuição de energia elétrica é a garantia da conformidade dos equipamentos de medição utilizados. Envolvem-se aí uma grande quantidade de equipamentos espalhados geograficamente. Os procedimentos metrológicos empregados no setor, norteados por calibrações simplificadas, estão distantes do que preconiza o estado-da-arte em metrologia e confiabilidade metrológica.

Neste trabalho são analisadas as particularidades do setor e dos equipamentos envolvidos, com ênfase em multímetros e multicalibradores. Em tal cenário são propostos preceitos para implantação de sistemas de avaliação da conformidade.

As diretrizes propostas têm como fundamentação teórica os documentos da *International Organization for Standardization (ISO)*, e estão em perfeita harmonia com a série de normas ISO 9000. Incluem-se considerações adicionais relevantes ligadas à calibração em campo, que é uma necessidade específica das empresas de transmissão de energia elétrica; à automação da calibração e ao estabelecimento dos intervalos entre avaliações da conformidade.

## **ABSTRACT**

The conformity guarantee of measurement equipments is a main activity on reliability assurance of electric energy transmission and distribution systems. In this case there are a great number of equipments spread all over geographically. The metrological procedures in this area using simplified approaches are far from the ones established by the state-of-the-art in metrology.

This dissertation analyzes the particularities of the sector and inherent equipments. Emphasis is given in multimeters and multifunction calibrators. In such scenery, recommendations are established for implantation of conformity assessment systems.

The methodology proposed in this dissertation follows the guides established from the International Organization for Standardization (ISO), and are in perfect harmony with the series of norms ISO 9000. It is also included additional considerations relevant to field calibration, which is very important for companies that transmits electric energy; to automate the calibration process, and to the establishment of intervals between evaluations of conformity.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma do processo de avaliação da conformidade para equipamentos de medição.....	22
Figura 2: Regras para definição dos limites de conformidade com as especificações.....	24
Figura 3: PUMA adaptado para gerenciar a incerteza da calibração.....	25
Figura 4: Resumo dos requisitos da NBR ISO/IEC 17025 responsáveis pela garantia da confiabilidade das calibrações.....	34
Figura 5: Influência da capacidade sobre os limites de comprovação da conformidade.....	39
Figura 6: Atividades previstas para avaliação da conformidade.....	43
Figura 7: Integração do método ao SGM.....	43
Figura 8: Quadro de relacionamento entre classes de equipamento e ações de monitoração.....	47
Figura 9: Comportamento da curva de erro do equipamento.....	48
Figura 10: Definição das condições ambientais para a realização da calibração.....	51
Figura 11: Influência da incerteza do processo de medição das condições ambientais.....	51
Figura 12: Quadro de particularidades na execução da calibração.....	54
Figura 13: Quadro de particularidades na avaliação da incerteza do processo de calibração.....	57
Figura 14: Quadro de documentos e registros dos requisitos exigidos pela ISO 17025 para a obtenção de resultados tecnicamente válidos em uma calibração.....	66
Figura 15: Quadro com as causas das principais fontes de incerteza na calibração de multímetros.....	72
Figura 16: Estrutura da calibração semi-automatizada.....	74
Figura 17: Tensões termoelétricas.....	94
Figura 18: Quadro de coeficientes termoelétricos.....	94
Figura 19: Tensões geradas por campos magnéticos.....	96
Figura 20: Laço de terra.....	97
Figura 21: Injeção de corrente.....	98
Figura 22: Rejeição de modo comum.....	99
Figura 23: Impedâncias de acoplamento.....	100
Figura 24: Ruído eletrostático.....	101
Figura 25: Cobertura eletrostática.....	102
Figura 26: Efeito piezoelétrico.....	103

## LISTA DE ABREVIATURAS

BIPM	Bureau International des Poids et Mesures
Ca	Capacidade do processo de calibração
Cs	Coefficiente de segurança
DMM	Multímetro digital
EA	European Co-operation for Accreditation
$E_{mad}$	Erro máximo admissível
$E_{mav}$	Erro máximo avaliado
FN	Faixa Nominal
GUM	Guia para a Expressão da Incerteza de Medição
$I_{cal}$	Incerteza do processo de calibração
IEC	International Electrotechnical Commission
IFCC	International Federation of Clinical Chemistry
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
LC	Limites de comprovação da Conformidade
LIC	Limite Inferior de comprovação da Conformidade
LSC	Limite Superior de comprovação da Conformidade
LE	Limites de Especificação
LIE	Limite Inferior de Especificação
LSE	Limite Superior de Especificação
NC	Nível da confiança
OIML	International Organization of Legal Metrology
PUMA	Procedimento para o gerenciamento da medição
RBC	Rede Brasileira de Calibração
Re	Repetitividade
SGM	Sistema de Gerenciamento da Medição
SGQ	Sistema de Gestão da Qualidade.
SMP	Sistema de Medição Padrão
Td	Tendência
VIM	Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1	TERMINOLOGIA .....	12
1.2	MOTIVAÇÃO .....	14
1.3	OBJETIVOS DO TRABALHO .....	16
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	17
<b>2</b>	<b>DOCUMENTOS BASE PARA ESTRUTURAÇÃO DE UM MÉTODO DE AVALIAÇÃO DA CONFORMIDADE .....</b>	<b>18</b>
2.1	ISO 10012/2003 – SISTEMA DE GERENCIAMENTO DA MEDIÇÃO .....	20
2.2	ISO 14253-1 – REGRAS DE DECISÃO PARA PROMOVER CONFORMIDADE OU NÃO- CONFORMIDADE COM ESPECIFICAÇÕES .....	23
2.3	ISO 14253-2 – GUIA PARA A ESTIMAÇÃO DE INCERTEZA EM MEDIÇÕES DE GPS, EM CALIBRAÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO E EM VERIFICAÇÃO DE PRODUTOS .....	25
2.4	GUM – GUIA PARA A EXPRESSÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO .....	27
2.4.1	Avaliação da incerteza padrão do Tipo A .....	28
2.4.2	Avaliação das incertezas padrão do Tipo B.....	29
2.4.3	Determinação da incerteza padrão combinada .....	31
2.4.4	Determinação da incerteza expandida .....	32
2.5	ISO/IEC 17025 – REQUISITOS GERAIS PARA COMPETÊNCIA DE LABORATÓRIOS DE ENSAIO E CALIBRAÇÃO.....	33
<b>3</b>	<b>DIRETRIZES PARA ESTABELECIMENTO DO MÉTODO DE AVALIAÇÃO DA CONFORMIDADE .....</b>	<b>36</b>
3.1	DELIMITAÇÕES DA PROPOSTA .....	36
3.1.1	Universo de equipamentos estudados.....	37
3.1.2	Limites de comprovação da conformidade.....	38
3.1.3	Erros, efeitos e características dos equipamentos.....	40
3.2	SISTEMATIZAÇÃO DAS ATIVIDADES .....	42
3.2.1	Definição dos parâmetros de controle .....	44
3.2.2	Elaboração dos procedimentos de calibração.....	49
3.2.3	Avaliação e gerenciamento da incerteza, <i>a priori</i> .....	54
3.2.4	Calibração e comparação dos resultados .....	57
3.2.5	Adequação metrológica.....	61
3.2.6	Atividades para obtenção e demonstração da competência.....	65
3.3	CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS À PROPOSTA .....	67
3.3.1	Calibração em campo .....	67
3.3.2	Automação da calibração .....	73
3.3.3	Intervalos entre as avaliações .....	75

<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>80</b>
4.1	CONCLUSÕES .....	80
4.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	84
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>85</b>
	<b>APÊNDICE .....</b>	<b>92</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Nesta dissertação são estabelecidas diretrizes para o estabelecimento de um método para avaliação da conformidade de equipamentos de medição de grandezas elétricas. Incluem-se também considerações sobre a viabilidade da calibração em campo desses equipamentos, sobre a automação da calibração e sobre os intervalos entre as verificações. As atividades foram propostas a partir das necessidades de uma empresa de transmissão de energia elétrica, onde há grande diversidade de tipos de instrumentos e grande volume de instrumentos semelhantes. Os resultados do trabalho são aplicáveis a qualquer empresa em que tais situações sejam encontradas.

## 1.1 Terminologia

Alguns termos necessários ao perfeito entendimento do trabalho são descritos a seguir. Para os termos metrológicos contidos no texto, predomina o Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia (VIM), adotado no Brasil através da portaria n. 29 de 10 de março de 1995 (INMETRO, 2000). Termos específicos, e empregados poucas vezes no documento, são apresentados na medida com que aparecerem no decorrer do texto.

- **Avaliação da conformidade metrológica** Grupo de operações necessárias, para assegurar que um equipamento de medição está conforme com os requisitos estabelecidos para o seu uso programado (ISO, 2003; ISO/ABNT, 2000b).

- **Calibração** Conjunto de operações que estabelece, sob condições especificadas, a relação existente entre os valores indicados por um equipamento de medição ou sistema de medição ou valores representados por uma medida materializada ou um material de referencia, e os valores correspondentes das grandezas estabelecidos por padrões (INMETRO, 2000 p. 62).
- **Confiabilidade metrológica** A capacidade de um equipamento de medição fornecer resultados confiáveis conforme condições de utilização definidas (SOARES, 1999).
- **Equipamento da transmissão** Termo utilizado neste documento para indicar todos os equipamentos utilizados diretamente nas linhas de transmissão, tais como: transformadores de corrente e tensão, relés de proteção.
- **Equipamento de medição** Instrumento de medição, programa de computador, padrão de medição, material de referência ou dispositivos auxiliares, ou uma combinação deles, necessários para executar um processo de medição (ISO/ABNT, 2000b p. 15).
- **Erro máximo admissível** Valores extremos admissíveis para a estimativa de um ou mais erros, ou combinação deles, que pode ocorrer em uma medição, fornecido por especificações para um determinado equipamento de medição (INMETRO, 2000).
- **Incerteza de calibração** Parâmetro associado ao resultado de uma calibração, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser fundamentalmente atribuídos a um mensurando (INMETRO, 2000 p. 31)
- **Ponto de controle** Indicação especificada em um equipamento de medição ou um valor especificado do mensurando, escolhido para o controle do equipamento (INMETRO, 2000 p. 55).
- **Processo de medição** Conjunto de operações realizadas para determinar o valor de uma quantidade (ISO, 2003 p. 1).

## 1.2 Motivação

A metrologia é atualmente um dos principais pontos que determinam a qualidade nas grandes empresas dos países industrializados. Esse reflexo pode ser observado através dos gastos com medição e atividades relacionadas nesses países, no qual o BIPM estima que podem alcançar a ordem de 6% do produto interno bruto (KOCHSIEK, 1998; MCT, 2001; VINGE, 2003). Na tentativa de melhorar a situação do Brasil, o governo lançou em 2001, o programa de Tecnologia Industrial Básica (TIB), que esboça forte preocupação com o desenvolvimento da metrologia no país (MCT, 2001).

No setor elétrico brasileiro, a preocupação com a metrologia, em seu estado-da-arte, ainda ocorre de forma tímida. No entanto, a desverticalização e a privatização do setor começaram a mudar tal situação, já que as cobranças por serviços de melhor qualidade se intensificaram (ABREU, 1999; CONGOTE, 2001; TONDELLO, 2001).

A qualidade também é exigida na transmissão da energia elétrica, mesmo essa sendo caracterizada como um monopólio natural, na qual a duplicidade das redes não é justificada e a situação característica do mercado inviabiliza a competição (SCHWYTER, 2001 p. 20). A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é o órgão que fiscaliza e obriga que a qualidade dos serviços seja uma meta a ser alcançada pelas empresas desse setor (CONGOTE, 2001). Essa cobrança se dá através da aplicação de multas, que diminuem a receita dessas instituições à medida que a qualidade cai (PASQUA, 2001; TONDELLO, 2001; SIQUEIRA, 2001).

Deste modo, era inevitável que estudos, no intuito de alcançar a confiabilidade metrológica, começassem a ser desenvolvidos nesse setor. Isso, no entanto, não veio ocorrendo ao longo dos últimos anos e em todos os artigos analisados que tratam da

manutenção de equipamentos da transmissão (MAGALHÃES, 1993; MOERBERCK, 1997; NUNES, E., 2001; NUNES, J., 2001; PASQUA, 2001), nenhum esboçou preocupação em relação aos aspectos metrológicos. O que foi observado, em relação às últimas mudanças destinadas à busca da confiabilidade metrológica dos equipamentos de medição, é que elas ficaram limitadas à calibração dos mesmos. De um modo geral, um grande equívoco ocorre aqui, já que calibrar é essencial, porém, insuficiente para garantir tal confiabilidade (FARIAS, 2001; LIRA, 2001; CORAL, 2003; ISO, 2003).

Equipamentos de medição possuem características metrológicas identificadas através de parâmetros como: tendência, repetitividade, linearidade, erro de zero, erro de ganho, histerese e outros. Sobre alguns desses é que os fabricantes especificam o erro máximo admissível do equipamento (FLUKE, 1994). Infelizmente, estas mesmas características podem variar ao longo do tempo, descaracterizando assim os valores disponibilizados pelos fabricantes e exigindo que o comportamento metrológico seja constantemente avaliado. No entanto, não cabe apenas à calibração tal avaliação, ela limita-se apenas em estabelecer a relação existente a indicação de um equipamento e os valores estabelecidos por padrões (INMETRO, 2000 p. 62). Deste modo, atividades complementares são necessárias para que a confiabilidade metrológica exista.

Na prática as empresas de transmissão já percebem a necessidade de terem seus equipamentos de medição avaliados segundo as características metrológicas mais importantes. Um grande problema está em como proceder para a obtenção dessa avaliação da conformidade e, de um modo geral, ter a garantia de que o equipamento se mantém dentro das especificações do fabricante (BÖLÖNI, 1999). Outro problema prático está associado à dificuldade em disponibilizar alguns equipamentos para a calibração. A grande distância geográfica entre os diferentes setores, consome tempo demasiado no transporte dos equipamentos de medição até o laboratório de calibração, o que por vezes é intolerável devido

à importância desses dentro da instituição. Nesse sentido, é necessário o desenvolvimento de estudos para que a calibração seja realizada no campo, permitindo assim a eliminação do tempo ocioso na qual o equipamento está sujeito durante o seu envio até o prestador do serviço de calibração.

### **1.3 Objetivos do trabalho**

Os objetivos podem ser divididos em:

**a) objetivo geral:**

- estabelecer diretrizes que definam como estruturar um método de avaliação da conformidade de equipamentos de medição de grandezas elétricas, de modo que esse apóie as empresas de transmissão de energia na obtenção da qualidade metrológica;

**b) objetivos específicos:**

- analisar o atual estado-da-arte em metrologia aplicada à garantia da qualidade metrológica e à avaliação da conformidade de equipamentos;
- identificar os principais documentos internacionais de apoio à confiabilidade metrológica;
- estabelecer diretrizes para viabilizar a realização de calibrações fora de ambientes laboratoriais;
- analisar a viabilidade da automação da calibração;
- identificar e propor meios para minimizar as principais fontes de erro e incertezas relativas à calibração dos mais comuns equipamentos de medição de grandezas elétricas.

## 1.4 Estrutura do trabalho

No capítulo 2 são destacados os documentos necessários para a estruturação de qualquer método de avaliação da conformidade de equipamentos. Esses também são utilizados como base para a estruturação das atividades propostas, por esse motivo já aparecem com as devidas adaptações que lhes são cabidas, sendo enfatizado também o porque da utilização da documentação da *International Organization for Standardization* (ISO) para a concepção dessas tais atividades.

No capítulo 3 são apresentadas as delimitações da proposta como: o universo de equipamentos analisados, sistemática de estabelecimento dos limites de conformidade e quais as características importantes dos equipamentos que devem ser analisadas no momento de sua avaliação. É apresentada também a sistematização das atividades, estabelecendo assim um método de avaliação da conformidade de equipamentos de medição de grandezas elétricas, na qual há o relato sobre a abordagem de cada atividade específica, informando o que se deve e o que não se deve observar durante sua estruturação. Por último têm-se considerações sobre: a viabilidade da realização da calibração em campo, a automatização dos processos e a definição do intervalo entre as avaliações.

No capítulo 4 são expostas as conclusões obtidas durante a realização do trabalho, bem como sugestões para trabalhos futuros.

No apêndice A são apresentadas fontes de incertezas relativas à calibração de algumas grandezas elétricas e propostas para avaliação e redução da sua influência.

## **2 DOCUMENTOS BASE PARA ESTRUTURAÇÃO DE UM MÉTODO DE AVALIAÇÃO DA CONFORMIDADE**

A garantia da qualidade pode ser considerada um movimento relativamente novo na indústria (MATTIELLO, 2002 p. 15). Dentro do atual cenário produtivo globalizado ela é uma necessidade para a maximização dos resultados e para o sucesso empresarial (VINGE, 2003). A partir dessa obrigatoriedade, a garantia da qualidade deve ser implementada através da melhoria contínua que é preconizada pelos Sistemas de Gestão da Qualidade (SGQ). A norma ISO 9001:2000 (ISO/ABNT, 2000) é considerada referência mundial na implantação desses SGQ (FLESCH, 2001), e representa, inclusive, barreira técnica para a exportação de produtos aos países industrializados (LHULLIER, 2002). No entanto, seu texto trata com superficialidade os aspectos metrológicos (FLESCH, 2001; HOUTEN, 2000).

A partir da década de 90, uma série de documentos da ISO foram publicados no intuito de promover a qualidade metrológica e a avaliação da conformidade de equipamentos.

Cronologicamente são destacados os principais documentos:

- a) 1993 – o empenho conjunto das conceituadas organizações internacionais: BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP e OIML terminou com a publicação do *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (GUM), traduzido para o português como Guia para a Expressão da Incerteza de Medição em 1997 e tendo sua segunda edição revisada, publicada em agosto de 1998 (BIPM, 1998). O consenso entre essas organizações estabeleceu um marco na metrologia mundial. Onde outrora a avaliação das incertezas de medição ocorria de forma não padronizada, agora é colocado de modo sistematizado, o que permite a comparação dos resultados entre os diferentes

níveis da cadeia metrológica (BARP, 2000). A aplicação desse documento não está restrita aos ambientes laboratoriais. Trata-se de uma metodologia que deve ser aplicada a qualquer cadeia de medição, inclusive as utilizadas na indústria e àquelas utilizadas para a avaliação da conformidade (BIPM, 1998).

- b) 1998 – é lançada a série de documentos ISO 14253. Em suas duas primeiras partes são apresentados requisitos para alcançar a conformidade de equipamentos de medição e a introdução de um novo conceito: o gerenciamento da incerteza de medição (BARP, 2000; BENNICH, 2003).
- c) 1999 – é publicada a norma ISO/IEC 17025 em substituição ao documento ISO/IEC GUIA 25 e a norma européia EM 45001, e adotada no Brasil a partir de 2001. Ela tem entre seus objetivos a apresentação de requisitos, para que a competência de laboratórios de calibração possa ser alcançada. Foi criada de forma que seja adotada internacionalmente e tenha estreita relação com as normas da série ISO 9000 (BRASIL, 2000; GIRÃO, 2001; INMETRO, 2001). Ela deve ser utilizada para que se tenha referência na implementação ou busca por serviços de calibração com qualidade.
- d) 2003 – a nova versão da série ISO 10012 é publicada. Ela substitui as anteriores 10012-1 (ISO/ABNT, 1993) e 10012-2 (ISO/ABNT, 1999) e proporciona maior clareza em todos os aspectos metrológicos e, além de instruir para a utilização do GUM, ela está em perfeita harmonia com o VIM, ao contrário das suas antecessoras. Deste modo é esperado que as constantes interpretações erradas relacionadas a estas últimas (BECKERT, 2002), deixem de existir. Ela também está voltada ao auxílio da série de normas ISO 9000 e apresenta um modelo simplificado para a avaliação da conformidade de equipamentos.

Esses documentos dão a devida sustentação teórica à proposta apresentada para avaliação da conformidade. O conhecimento das informações contidas neles são necessárias

para o perfeito entendimento das idéias apresentadas. Optou-se pela utilização da documentação da ISO, por essa ser uma instituição reconhecida e respeitada internacionalmente e porque, estando a proposta em concordância com esses documentos, certamente estará de acordo com as exigências da norma ISO 9001:2000 (ISO/ABNT, 2000).

Desses documentos foi extraído o que de mais importante neles existe para avaliação da conformidade de equipamentos. Isso é apresentado na seqüência, já com as devidas adaptações e complementações julgadas necessárias para que tais documentos formem a base da estrutura proposta.

## **2.1 ISO 10012/2003 – Sistema de gerenciamento da medição**

A norma ISO 10012/2003 (ISO, 2003) é o mais recente documento da ISO destinado ao gerenciamento dos riscos que as medições promovem durante a realização do produto. Suas antecessoras tinham como base apenas o atendimento aos requisitos das antigas normas da série ISO 9000 (ISO, 1994b,c,d) e serviam, principalmente, como guia para a obtenção dos certificados. Com a substituição dessas últimas pela nova versão ISO 9001:2000 (ISO/ABNT, 2000), os requisitos metrológicos, que já eram tratados de modo superficial, foram simplificados (FLESCHE, 2001; HOUTEN, 2000). Deste modo, a grande necessidade de uma melhor explanação em relação às atividades metrológicas, exigiu a formulação de um documento específico: a norma ISO 10012/2003 (ISO, 2003).

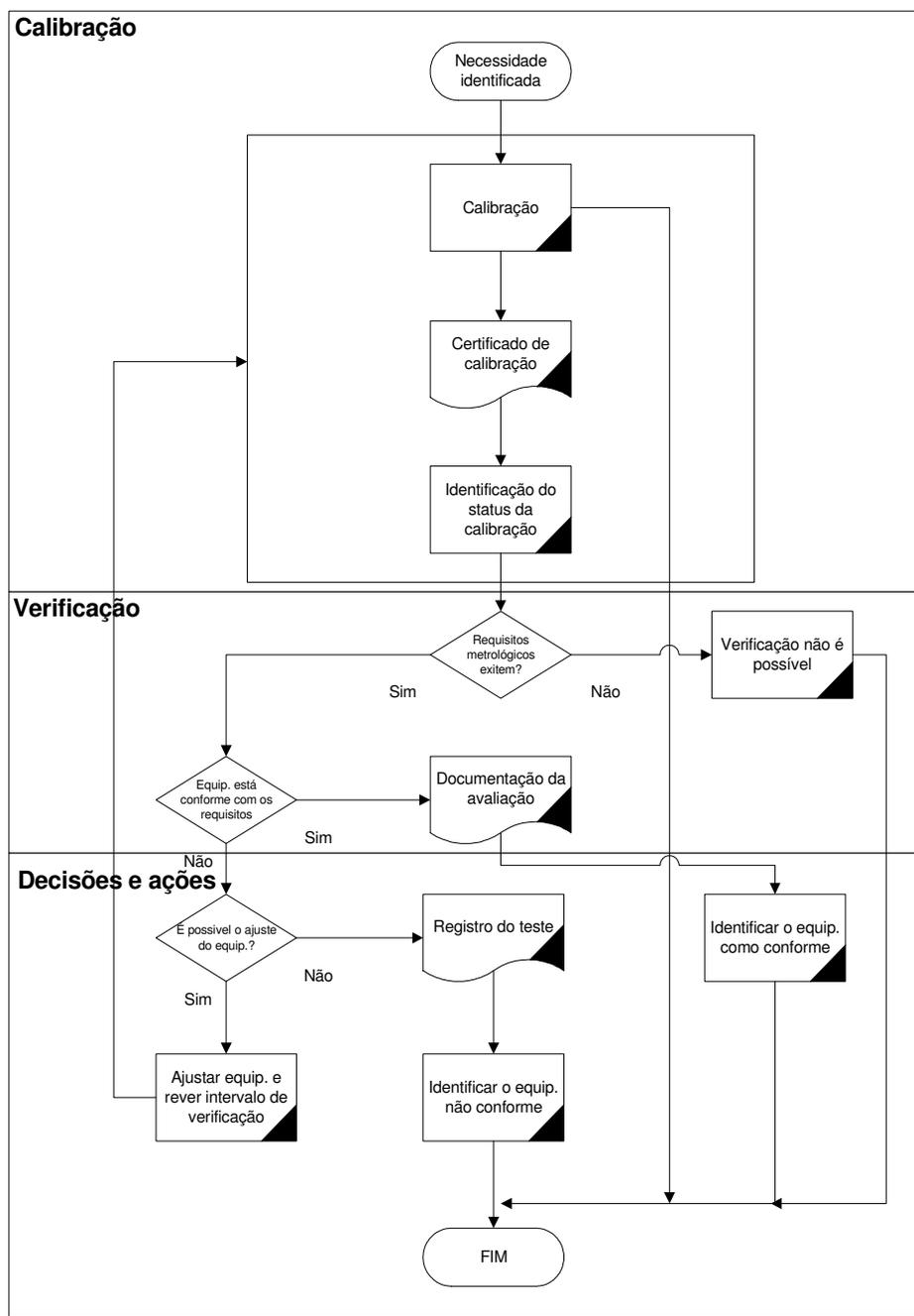
Essa norma apresenta um Sistema de Gerenciamento da Medição (SGM) e é clara quando trata da avaliação da conformidade de equipamentos. Ela deixa evidente que essa avaliação deve ser implementada e apresenta também um método simplificado para sua realização. Embora sucinto e de forma macro, esse modelo apresentado pela norma é utilizado como linha de referência para as idéias propostas. No entanto, mesmo tendo a avaliação da

conformidade como um dos focos, o SGM aborda outros itens que não são tratados na dissertação e que no entendimento do autor são essenciais para o sucesso na implantação de qualquer método de avaliação da conformidade.

Os itens abordados na norma ISO 10012/2003 (ISO, 2003) são:

- a) **Requisitos gerais** – indica que os SGM devem assegurar que os requisitos metrológicos são satisfeitos. Define ainda que os requisitos metrológicos são derivados dos requisitos necessários para a realização do produto, e que o escopo do SGM deve estar em perfeita harmonia com o do SGQ.
- b) **Gerenciamento das responsabilidades** – define que a função metrológica deve ser elaborada pela organização, e que a alta gerência deve assegurar sua viabilidade. As responsabilidades devem estar claramente definidas dentro do SGM. O foco deve ser voltado ao consumidor.
- c) **Gerenciamento dos recursos** – devem ser encontradas as necessidades referentes aos recursos humanos e saná-las. Atividades de treinamento devem fazer parte da função metrológica. Recursos de informação devem incluir procedimentos detalhados das atividades metrológicas, detalhamento dos *softwares* utilizados e registros das informações que afetam diretamente ou indiretamente a qualidade. Os equipamentos de medição destinados aos processos, bem como os respectivos procedimentos, devem ser claramente identificados e controlados.
- d) **Avaliação da conformidade e realização de processos de medição** – avaliação da conformidade deve ser designada e implementada para assegurar que as características dos equipamentos estejam conforme com os requisitos dos processos de medição. Essa avaliação compreende a calibração do equipamento e comparação dos resultados, os quais devem ser identificados em relação à sua real condição metrológica. Os métodos

usados para determinar os intervalos de calibração devem ser descritos e documentados em procedimentos, podendo ser reavaliados quando necessário. O procedimento para avaliação da conformidade proposta na norma é apresentada através do fluxograma da figura 1.



**Figura 1: Fluxograma do processo de avaliação da conformidade para equipamentos de medição.**

Para os processos de medição que estão inseridos no SGM, a norma indica que estes devam ser planejados, validados, implementados, documentados e controlados. Todos os equipamentos de medição, que estão incluídos em um processo, devem ser identificados e verificados quanto suas características metrológicas. As condições de contorno também devem ser identificadas e consideradas.

É indicado o GUM (BIPM, 1998) como principal método para avaliar as incertezas de medição, e deve ser assegurado também que todos os resultados sejam rastreados ao SI (INMETRO, 2000b).

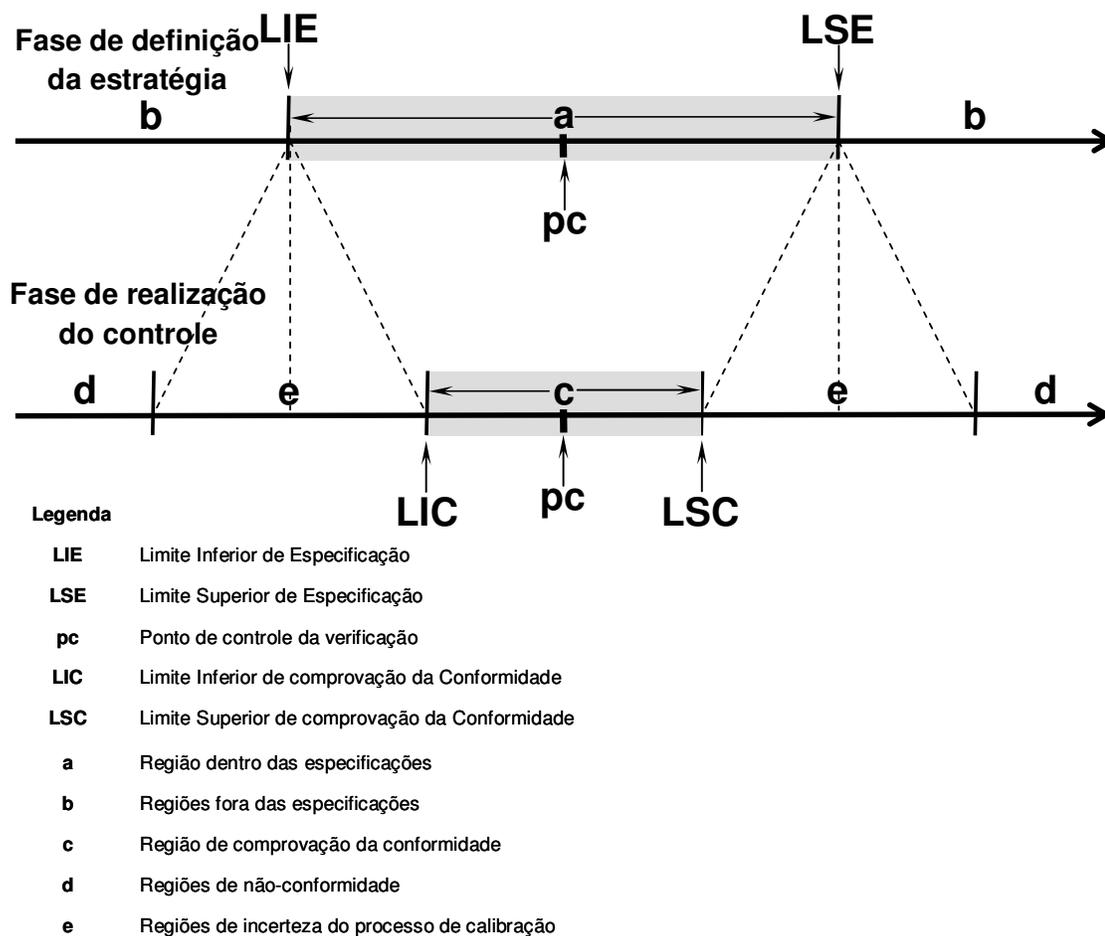
- e) **Análise e melhoria** – devem ser planejadas e implementadas auditorias a fim de monitorar, analisar e melhorar quando necessário o SGM. Dessa forma é assegurada a conformidade com a norma e a contínua melhora do sistema. Devem ser analisados também, as potenciais oportunidades de melhoria dos processos de medição, bem como as ações de correção e de prevenção.

## **2.2 ISO 14253-1 – Regras de decisão para promover conformidade ou não-conformidade com especificações**

A norma ISO 14253-1 (ISO, 1998) é um documento que trata especificamente do estabelecimento de regras para situações em que uma clara decisão de conforme ou não-conforme exista. Apresenta também como deve ser abordada a incerteza da calibração durante a fase de avaliação da conformidade, e indica o GUM (ISO, 1998) para obtenção dessa incerteza. Neste trabalho essas regras são utilizadas como princípios básicos para o estabelecimento da conformidade dos equipamentos.

Essas regras definem que durante a fase de definição da estratégia devem ser definidos os pontos de controle (ver terminologia) e seus respectivos limites de especificação (LE).

Entre esses LE é formada a região, dentro das especificações, na qual idealmente deveria ser aquela que determina a conformidade do equipamento. Infelizmente, na fase de controle da conformidade, as incertezas da calibração geram regiões de dúvidas. Conseqüentemente a região de comprovação da conformidade fica dependente dessa estimativa da incerteza, e reduzida em relação àquela formada pelos LE, como apresentado na figura 2.



**Figura 2: Regras para definição dos limites de conformidade com as especificações.**

Na figura 2 deve ser observado que nos extremos da região de comprovação da conformidade dois novos limites são formados. A esses será dado o nome de limites de comprovação da conformidade (LC).

## 2.3 ISO 14253-2 – Guia para a estimação de incerteza em medições de GPS, em calibração de equipamentos de medição e em verificação de produtos

O documento ISO 14253-2 (ISO, 1999) fornece suporte à norma ISO 14253-1 (ISO, 1998), e introduz o conceito de gerenciamento da incerteza de medição através do *Procedure for Uncertainty Management (PUMA)*. É um procedimento prático e iterativo que não se contrapõe aos conceitos apresentados no GUM.

A figura 3 apresenta o PUMA, em sua concepção de gerenciamento da incerteza em um procedimento de medição, adaptado para procedimento de calibração. Ele é utilizado na proposta para gerenciar a incerteza da calibração, *a priori*.

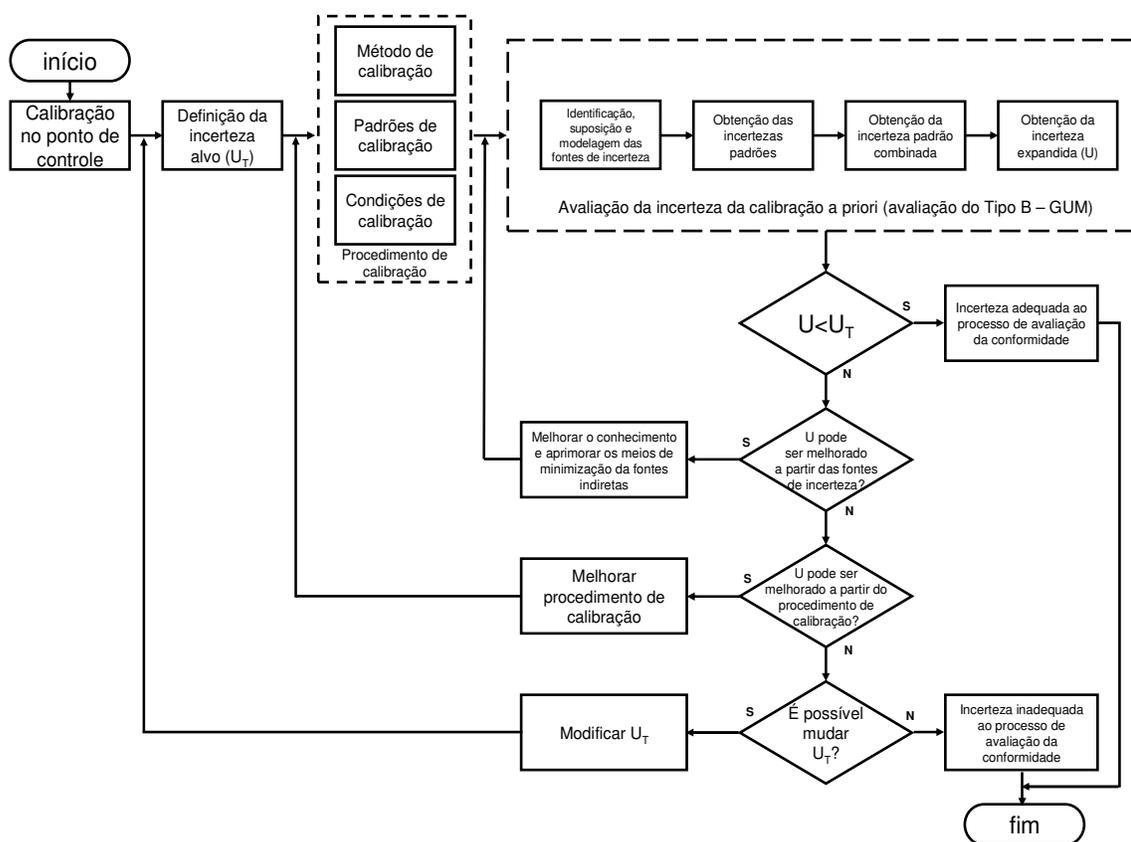


Figura 3: PUMA adaptado para gerenciar a incerteza da calibração.

Nesta adaptação do PUMA, as interações para o gerenciamento tem seu início a partir da intenção de se calibrar um distinto ponto de controle do equipamento, e segue com o roteiro (figura 3):

- a) estabelecer a incerteza alvo ( $U_T$ ), que deve inicialmente ser escolhida a partir de sua definição que é: a incerteza considerada ótima para a calibração no ponto de controle (ISO, 1999);
- b) estabelecer o procedimento de calibração, definido através do método, dos padrões utilizados e das condições de calibração;
- c) avaliar a incerteza expandida , *a priori*, para o processo de calibração ( $U$ ), contemplando assim uma interação;
- d) comparar  $U$  em relação à  $U_T$ ,
  - se  $U$  é aceitável ( $U < U_T$ ), então a incerteza da calibração é adequada ao processo de avaliação da conformidade e as interações do PUMA terminam;
  - se  $U$  não é aceitável ( $U > U_T$ ), o processo interativo continua;
- e) verificar se  $U$  pode ser melhorado a partir do conhecimento e da modelagem das fontes de incerteza;
- f) realizar nova avaliação da incerteza;
- g) quando as possibilidades de minimizar  $U$  começarem a ficar escassas, analisar possíveis mudanças no procedimento de calibração;
- h) se mudanças no procedimento de calibração são possíveis, realizar nova avaliação da incerteza;
- i) quando as possibilidades de minimizar  $U$  ficarem escassas, analisar a possibilidade de alterar  $U_T$ ;

- j) se  $U_T$  não pode ser modificado e  $U$  não for aceitável ( $U < U_T$ ), então a incerteza da calibração é inadequada ao processo de avaliação da conformidade e as interações do PUMA terminam.

## **2.4 GUM – Guia para a expressão da incerteza de medição**

O documento internacional conhecido como GUM (BIPM, 1998) estabelece as regras gerais para avaliação e expressão da incerteza de medição em seus vários níveis de exatidão e para a maioria dos campos de medição física. Tais regras não trazem instruções detalhadas sobre processos específicos, sobre o estabelecimento de quais parâmetros avaliar em uma medição e também não discute como fazer uso da incerteza avaliada. Ele sugere ainda a criação de documentos ou normas para o tratamento desses problemas particulares. Tais documentos ou normas podem ser versões simplificadas dele, como o NIS 3003 (NAMAS, 1995), a IEC 60-2 (IEC, 1996), a EA-4/02 (EA, 1999; INMETRO, 1999), ou a ISO 14253-2 (1999).

Em uma calibração, tenha ela o intuito de buscar a conformidade de equipamentos ou não, é essencial que sejam avaliadas as incertezas no conjunto de operações que relacionam as características metrológicas de um equipamento aos valores obtidos de padrões. Também é importante que essa avaliação ocorra por meios amplamente reconhecidos, como os citados no GUM (BIPM, 1998). Nesse sentido, são apresentadas a seguir informações de como proceder para avaliação da incerteza da calibração.

### 2.4.1 Avaliação da incerteza padrão do Tipo A

Fontes de incerteza avaliadas pelo método Tipo A são aquelas adquiridas através da análise estatística de uma série de observações repetidas. Para avaliar a incerteza padrão do Tipo A deve-se realizar o seguinte procedimento:

- a) calcular a variância experimental da série de observações:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})^2}{n-1} \quad (2.1)$$

onde,

$s^2$  – é a variância experimental, encontrada a partir de  $n$  medições;

$I_i$  – é a  $i$ -ésima indicação de um equipamento de medição;

$\bar{I}$  – é a média das  $i$ -ésimas indicações;

$n$  – é o número de medições realizadas em cada ponto de controle durante a calibração;

- b) com  $s^2$  calculado, é obtida então a variância experimental para a média das indicações, na qual sua melhor estimativa é dada por (2.2):

$$s^2(\bar{I}) = \frac{s^2}{n} \quad (2.2)$$

onde,

$s^2(\bar{I})$  – é a variância do Tipo A.

$s^2$  – é a variância experimental, encontrada a partir de  $n$  medições;

$n$  – é o número de medições realizadas em cada ponto de controle durante a calibração;

c) logo, a incerteza padrão do Tipo A pode ser estimada pela raiz quadrada de  $s^2(\bar{I})$ .

$$u = \sqrt{s^2(\bar{I})} \quad (2.3)$$

onde,

$u$  – é a incerteza padrão do Tipo A.

$s^2(\bar{I})$  – é a variância do Tipo A.

#### 2.4.2 Avaliação das incertezas padrão do Tipo B

Avaliação da incerteza do Tipo B é aquela adquirida de uma análise realizada *a priori*. Diversas fontes de incerteza podem compor uma avaliação desse tipo. Porém, cada uma delas é baseada nas informações obtidas sobre sua provável contribuição de incerteza em relação ao processo de calibração em questão, assumindo assim uma distinta função distribuição de probabilidade. Tal conjunto de informações pode ser obtido, dentre outras fontes relevantes, das seguintes referências:

- a) especificação dos fabricantes dos equipamento utilizados na calibração;
- b) investigação teórica das fontes de influência do processo de calibração;
- c) dados de medições prévias, como a calibração dos padrões;
- d) experiência ou conhecimento geral do comportamento dos instrumentos;
- e) incertezas relacionadas a dados de referência extraídos de manuais ou normas.

O uso adequado dessas informações para a obtenção das incertezas padrão do Tipo B, requer o discernimento baseado na experiência e no conhecimento geral. É importante reconhecer também, que esse tipo de avaliação pode ser tão confiável e importante quanto a do Tipo A.

Dentre as muitas funções de densidade de probabilidades que uma fonte de incerteza do Tipo B pode assumir, as mais comuns são a normal e a retangular. Para determinar a incerteza padrão de uma fonte de incerteza Tipo B, deve-se encontrar o valor correspondente do desvio padrão da função distribuição de probabilidade dela. Logo, o valor encontrado corresponderá ao da incerteza padrão.

Em geral, fontes de incerteza do Tipo B, são adotadas como tendo uma distribuição normal quando se tem confiança de que a probabilidade assim está distribuída. Dessa maneira, ela é declarada ser um múltiplo do desvio padrão dessa função normal, denominado fator de abrangência ( $k$ ). Também é comum ser dada em termos do nível da confiança e do número de graus de liberdade desse.

Na primeira situação, facilmente é obtida a incerteza padrão, que é o valor mencionado para a fonte de incerteza dividida por  $k$ , como apresentado na equação (2.4). Na segunda situação é necessário encontrar o valor de  $k$  correspondente ao nível da incerteza e aos graus de liberdade declarados, e então calcular o valor da incerteza padrão. O GUM apresenta tabelas para a obtenção desses valores de  $k$ .

$$u(x_j) = \frac{U_B}{k} \quad (2.4)$$

onde,

$u(x_j)$  – é o valor obtido para a incerteza padrão do Tipo B de uma determinada fonte de incerteza  $x_j$  normalmente distribuída;

$U_B$  – é o valor da incerteza do Tipo B declarada para a fonte  $x_j$ ;

$k$  – é o fator de abrangência.

Fontes de incerteza do Tipo B tendo uma distribuição retangular, comumente são adotadas quando apenas os limites da incerteza são conhecidos, caso típico da maioria das especificações dos fabricantes. É comum também adotar essa distribuição para expressar segurança em relação a dados, não confiáveis, que indiquem uma fonte de incerteza com distribuição normal (BALDO, 2003; BIPM, 1998).

Quando uma fonte de incerteza é tida como retangular, sua incerteza padrão corresponde ao valor do limite declarado para ela dividido por raiz quadrada de três (2.5):

$$u(x_j) = \frac{U_B}{\sqrt{3}} \quad (2.5)$$

onde,

$u(x_j)$  – é o valor obtido da incerteza padrão do Tipo B para um fonte de incerteza  $x_j$  retangularmente distribuída;

$U_B$  – é o valor da incerteza do Tipo B declarada para a fonte  $x_j$ .

### 2.4.3 Determinação da incerteza padrão combinada

Por medidas práticas é apresentado aqui apenas o cálculo para a determinação da incerteza padrão combinada ( $u_c$ ), para grandezas não correlacionadas e expressas na mesma unidade da indicação do equipamento. Essa situação é a mais comum encontrada em uma calibração no ambiente de atuação para qual o trabalho foi desenvolvido. Situações adversas a essa, devem tomar o GUM como referência para a obtenção de  $u_c$ .

Quando de acordo com os requisitos acima,  $u_c$  pode ser calculado através da propriedade da soma das variâncias (2.6):

$$u_c = \sqrt{\sum_{j=1}^N u^2(x_j)} \quad (2.6)$$

onde,

$u_c$  – é a incerteza padrão combinada;

$u(x_j)$  – é a incerteza padrão para cada  $j$ -ésima fonte de incerteza  $x_j$ ;

$N$  – é o número de fontes de incerteza atribuídas à avaliação.

#### 2.4.4 Determinação da incerteza expandida

Depois de obtido  $u_c$ , é então indicada a incerteza expandida ( $U$ ) através da equação (2.7). Encontrada a partir de uma determinada probabilidade de abrangência dada através do nível da confiança desejado.

$$U = \pm k.u_c \quad (2.7)$$

onde,

$U$  – é a incerteza expandida;

$k$  – é o fator de abrangência (correspondente ao fator  $t$  da distribuição  $t$ -Student).

No entanto,  $k$  depende dos graus de liberdades efetivos da avaliação da incerteza, e do nível da confiança pretendido para a  $U$ . Para a obtenção dos graus de liberdade efetivos é utilizada a equação de Welch-Satterhwaite (BIPM, 1998):

$$v_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum_{j=1}^N \frac{u^4(x_j)}{v_j}} \quad (2.8)$$

onde,

$u_c$  – é a incerteza padrão combinada;

$u(x_j)$  – é a incerteza padrão para cada j-ésima fonte de incerteza  $x_j$ ;

$v_{eff}$  – é o número de graus de liberdade efetivo para avaliação da incerteza;

$v_i$  – é o número de graus de liberdade da incerteza padrão para cada j-ésima fonte de incerteza  $x_j$ .

$N$  – é o número de fontes de incerteza atribuídas à avaliação.

Deve ser lembrado que para a fonte de incerteza do Tipo A,  $v$  é o valor de  $n-1$  medições realizadas. No caso das fontes de incerteza do Tipo B, quando não declarado o valor dos graus de liberdade, admite-se que no momento em que valor foi declarado para essa fonte, optou-se pela segurança ou havia o completo conhecimento sobre a sua distribuição de probabilidade, e portanto adota-se um valor infinito para  $v$ . Com  $v_{eff}$  determinado e o nível da confiança escolhido, o valor de  $k$  pode ser obtido pela operação inversa da distribuição *t-Student*, e então pode ser avaliada a incerteza expandida através da equação (2.7).

## **2.5 ISO/IEC 17025 – Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração**

Apenas o atendimento aos requisitos dos SGQ, como os da norma ISO 9000/2000 (ISO/ABNT, 2000), ou aos dos SGM, como os da norma ISO 10012/2003 (ISO, 2003), não

são suficientes para que os resultados das calibrações sejam metrologicamente confiáveis (ISO/ABNT, 2001; ISO, 2003). Neste ponto, a norma NBR ISO/IEC 17025 (ISO/ABNT, 2001), que especifica os requisitos gerais para que se obtenha tal competência no momento da realização das calibrações, supre essa deficiência.

Como a calibração é indispensável para avaliação da conformidade, torna-se obrigatório o uso desta norma. O quadro da figura 4 apresenta de forma resumida, os requisitos técnicos necessários para que um laboratório obtenha confiabilidade metrológica na realização de suas calibrações.

Item	Título	Resumo
<b>5.1</b>	<b>Generalidades</b>	Apontam quais os itens da norma, na qual são responsáveis pela garantia da confiabilidade das calibrações (5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, e 5.8). Salaria também que a avaliação da incerteza de medição difere consideravelmente entre ensaios e calibrações.
<b>5.2</b>	<b>Pessoal</b>	O laboratório deve assegurar a competência de todo pessoal envolvido em cada processo da calibração, bem como, a devida supervisão.
<b>5.3</b>	<b>Acomodações e condições especiais</b>	O laboratório deve assegurar, que as condições ambientais não inviabilizem os resultados, mesmo quando a calibração for realizada fora do ambiente controlado. Elas devem ser monitoradas e documentadas.
<b>5.4</b>	<b>Métodos de calibração e validação dos métodos</b>	
5.4.1	Generalidades	O laboratório deve ter métodos e procedimentos apropriados, desde o manuseio do equipamento, até as técnicas de análise estatística dos dados, principalmente, onde as instruções possam comprometer os resultados.
5.4.2	Seleção dos métodos	O laboratório deve utilizar métodos que atendam as necessidades, preferencialmente os publicados em normas e textos técnicos, e quando necessário devem ser complementados. Deve assegurar as condições de operação para esses métodos, antes mesmo de implementar a calibração. Se os métodos forem alterados, a situação deve ser revista.
5.4.3	Métodos desenvolvidos pelo laboratório	Eles devem ser uma atividade planejada, e deve ser designada a pessoas capazes. Devem ser constantemente atualizados na medida que prossegue o seu desenvolvimento.
5.4.4	Métodos não normalizados	Quando um método não normalizado for utilizado, esse deve ser validado.

**Figura 4: Resumo dos requisitos da NBR ISO/IEC 17025 responsáveis pela garantia da confiabilidade das calibrações.**

Item	Título	Resumo
5.4.5	Validação de métodos	É a confirmação, por exame e fornecimento de evidências, de que os requisitos especificados para um determinado uso, são satisfeitos. Pode ser realizada através, de avaliação sistemática dos fatores que influenciam o resultado, de avaliação da incerteza dos resultados na base científica ou prática, entre outros. A faixa e a exatidão, podem ser definidas por métodos avaliados (exemplo: a incerteza, limites de detecção, limites de repetitividade, entre outros.), e são pertinentes ao uso pretendido. Deve haver um equilíbrio entre custos, riscos e possibilidades técnicas.
5.4.6	Estimativa da incerteza de medição	Os laboratórios que realizam suas próprias calibrações devem fazê-las sobre procedimentos documentados. O rigor para a estimativa da incerteza, depende de fatores como: requisitos do cliente, ou na existência de limites nos quais são baseadas as decisões de conformidades. Todos os componentes importantes devem ser considerados.
5.4.7	Controle de dados	Os cálculos e a transferência de dados devem ser verificados de maneira apropriada.
<b>5.5</b>	<b>Equipamentos</b>	O laboratório deve estar aparelhado para o desempenho correto das calibrações. Se algum equipamento fora do controle permanente for utilizado, os requisitos da norma devem ser aplicados a ele. Esses devem ser capazes de alcançar a exatidão requerida. Devem ser mantidos, todos os registros pertinentes a eles. Deve ser retirado de uso todo equipamento fora dos limites de especificação. Eles devem ser protegidos contra ajustes indevidos.
<b>5.6</b>	<b>Rastreabilidade da medição</b>	
5.6.1	Generalidades	Todo equipamento de medição, na qual tenha efeito significativo sobre a exatidão ou validades do resultado, deve ser calibrado.
5.6.2	Requisitos específicos	
5.6.2.1	Calibração	Deve ser assegurado, que as calibrações realizadas pelo laboratório, sejam rastreáveis ao SI (INMETRO, 2000b). Quando utilizados serviços externos, buscar laboratórios que demonstrem sua competência (os que satisfaçam os requisitos da norma, ou credenciados segundo a mesma), e a capacidade de medição pretendida (incluindo a incerteza).
<b>5.8</b>	<b>Manuseio dos itens de calibração</b>	O laboratório deve ter procedimentos para o manuseio dos itens sob calibração, incluindo as providencias necessária para a integridade dos mesmos. Deve haver um sistema de identificação, que possibilite a subdivisão em grupos, se necessário. No ato do recebimento, deve ser registrada a condição real, e quando houver dúvida sobre as condições descritas, ou sobre o serviço solicitado, o cliente deve ser contatado para informações adicionais.
<b>5.9</b>	<b>Garantia da qualidade dos resultado de calibração</b>	O laboratório deve ter procedimentos para monitorar a validade das calibrações realizadas. Os resultados devem ser registrados de forma que as tendências sejam detectáveis e, quando praticáveis, deve ser aplicada técnica estatística para a análise crítica dos resultados.
<b>5.10</b>	<b>Apresentação dos resultados</b>	Os resultados devem incluir todas as informações padrões de um certificado, bem como, todas as informações solicitadas pelo cliente. Quando a calibração for sub contratada, o registro do laboratório executante deve existir.

**Figura 4 (continuação): Resumo dos requisitos da NBR ISO/IEC 17025 responsáveis pela garantia da confiabilidade das calibrações.**

### **3 DIRETRIZES PARA ESTABELECIMENTO DO MÉTODO DE AVALIAÇÃO DA CONFORMIDADE**

Neste capítulo é descrita uma seqüência lógica de atividades, estruturando assim um método (HOUAISS, 2002), o qual promove meios para obtenção da conformidade de equipamentos de medição de grandezas elétricas. Ele atua como um documento da qualidade, destinado a informar sobre a boa prática laboratorial necessária para que ocorra uma avaliação eficiente. Considerações adicionais também são expostas neste capítulo.

É esperado que quando as atividades estejam devidamente implementadas junto ao sistema de gerenciamento da medição (SGM), os equipamentos avaliados possam ter seu erro máximo admissível ( $E_{\text{mad}}$ ) garantido metrologicamente.

São descritos aqui os meios para que o laboratório responsável pelas avaliações tenha seus serviços compatíveis às exigências dos documentos base (BIPM, 1998; ISO/ABNT, 2001; ISO, 1998; 1999; 2003). Junto a essa base documental, informações adicionais provenientes de publicações diversas e do conhecimento prévio de situações reais, formam o proposto a seguir.

#### **3.1 Delimitações da proposta**

Nos parágrafos que se seguem são apresentadas considerações a respeito das delimitações da proposta.

### 3.1.1 Universo de equipamentos estudados

O universo de equipamentos estudados pode ser dividido em dois grupos:

a) **calibradores de grandezas elétricas:**

- por formarem um grupo de padrões de trabalho, na qual fornece rastreabilidade à maioria das calibrações internas realizadas nas empresas de transmissão, fato que obriga a constante avaliação das suas características metrológicas;

b) **multímetros:**

- por existirem em uma quantidade e variedade bastante grande em empresas do setor elétrico, o que engloba grande parte dos instrumentos de medição dessas instituições;
- por serem utilizados constantemente em processos considerados críticos para a qualidade do serviço oferecido por empresas do setor elétrico;
- devido a sua construção, que é obtida da união de vários instrumentos, a qual permite a implementação do método quando esses estiverem em sua configuração individual;
- por tipicamente existirem equipamentos de diferentes níveis de exatidão neste grupo, transformando por vezes alguns instrumentos em padrões de calibração.

Como calibradores de grandezas elétricas se diferenciam significativamente dos multímetros, e como esses últimos existem em uma variedade de tipos bastante grande dentro do ambiente de atuação, os equipamentos devem ser divididos em classes para facilitar o controle. Em FLESCHE (2003) é sugerido que essa divisão ocorra de três formas distintas: padrões de calibração, equipamentos utilizados em processos e equipamentos gerais. Os meios de comprovação da conformidade também podem variar conforme a classe em que cada equipamento está situado (FLESCHE, 2003).

### 3.1.2 Limites de comprovação da conformidade

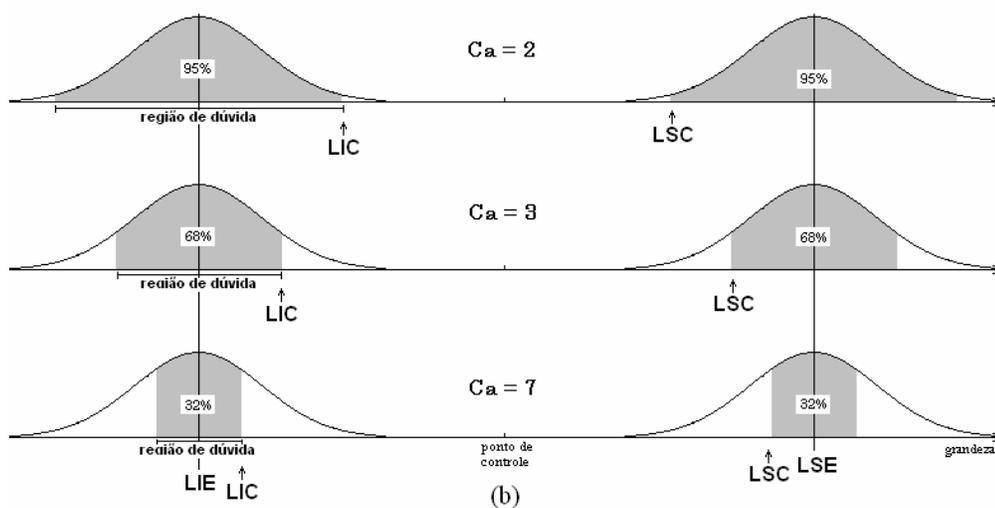
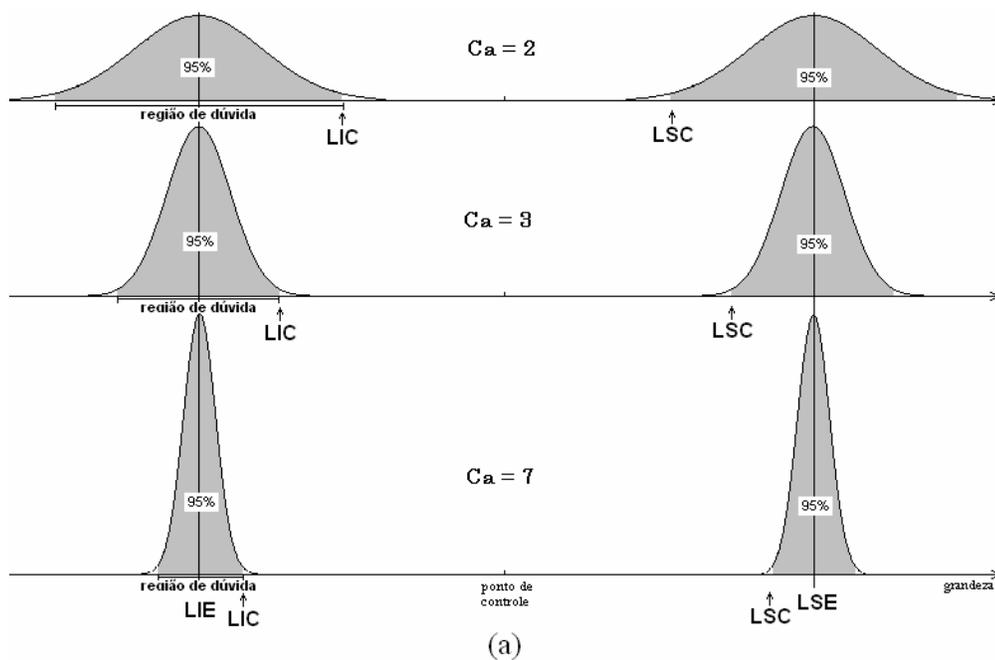
Para a definição dos limites de comprovação da conformidade (LC) é seguido o seguinte roteiro:

- a) para cada equipamento serão definidos pontos de controle;
- b) para cada ponto de controle deve ser identificado o seu respectivo  $E_{\text{mad}}$ , que é uma característica do equipamento apresentada pelo fabricante nos manuais;
- c) sobre cada  $E_{\text{mad}}$  serão estipulados os limites de especificação (LE);
- d) a partir dos LE e da incerteza da calibração surgirão os LC.

Na seção 2.2 pode ser observado que o intervalo entre os LC é inversamente proporcional à incerteza da calibração. Para a razão existente entre a região dentro das especificações (região “a” figura 2) e duas vezes a incerteza de calibração (região “e” figura 2), é dado o nome de capacidade do processo de calibração ( $C_a$ ).

Intuitivamente,  $C_a$  indica quão melhor é o sistema de medição padrão (SMP) utilizado durante o processo de calibração em relação aos LE definidos para o ponto de controle do equipamento (figura 5 – a). Nesse sentido, quanto maior for o valor de  $C_a$ , maiores serão as chances de um equipamento realmente conforme passar pela avaliação da conformidade, e menores serão as dúvidas sobre essa avaliação. Por outro lado, quanto maior for  $C_a$ , maiores também serão os custos envolvidos na calibração.

Se analisado sobre outro parâmetro,  $C_a$  também é influenciado pelo nível da confiança (NC) apresentado para a incerteza da calibração (figura 5 – b). Nesse sentido, quanto maior for o valor de  $C_a$ , maiores também serão as chances de um equipamento realmente não-conforme passar pela avaliação da conformidade, porém, menores serão os custos envolvidos na calibração.



Legenda:

Ca - Capacidade do processo de calibração  
 LIE - Limete Inferior de Especificação  
 LSE - Limite Superior de Especificação  
 LIC - Limite Inferior de comprovação da Conformidade  
 LSC - Limite Superior de comprovação da Conformidade

**Figura 5: Influência da capacidade sobre os limites de comprovação da conformidade.**

O NC exprime qual o valor da confiança pretendida para o resultado da calibração. Deste modo, espera-se que depois de especificá-lo, todo o intervalo de incerteza em torno do valor desse resultado, abranja a fração desejada da função distribuição de probabilidade estimada para ele (BIPM, 1998).

### 3.1.3 Erros, efeitos e características dos equipamentos

Na proposta, um equipamento pode ser tratado como um sistema de medição independente, na qual apenas um único instrumento é necessário para realizar uma medição específica. Deste modo, estará correto afirmar que o erro da indicação dos equipamentos, assim tratados, ocorre devido aos efeitos aleatórios e sistemáticos, e que esses efeitos dão origem as componentes de erro aleatórias e sistemáticas, respectivamente (BIPM, 1998).

O erro aleatório, que é designado como o resultado de uma medição menos a média de um infinito número de medições do mesmo mensurando (INMETRO, 2000 p. 33), presumivelmente é originado de uma variação regida por uma função distribuição de probabilidade (BIPM, 1998). No entanto, como somente um número finito de medição pode ser realizado, é possível apenas determinar uma estimativa desse erro (INMETRO, 2000). Aos valores dos limites dessa estimativa é dado o nome de repetitividade ( $Re$ ). Neste trabalho o termo repetitividade deve ser entendido como uma característica própria dos equipamentos, e indicará a aptidão desse em fornecer indicações muito próximas, em repetidas aplicações de um mesmo mensurando (INMETRO, 2000 p. 57).

Segundo o VIM (INMETRO, 2000), a  $Re$  pode ser expressa quantitativamente em termos das características da dispersão das indicações, no entanto, alguns documentos (ISO 1993; 1994; ASTM, 1998; API 1984, 1994, HBM, [ca. 1990]) apresentam definições diferentes entre si para a obtenção do valor da repetitividade. Porém, mesmo divergindo em relação à formula de cálculo, os documentos da ISO, AMST e API convergem para a probabilidade de 95% como aquela indica o limite para expressar esse valor de  $Re$ .

Neste trabalho é adotada a equação (3.1) como aquela que determina o valor da repetitividade:

$$Re = t_{95\%} \cdot s \quad (3.1)$$

onde

$t_{95\%}$  - é o coeficiente de *Student* para a probabilidade de 95% para n-1 medições;

$s$  - é o desvio padrão experimental das indicações de um instrumento aplicadas a um mesmo mensurando.

O erro sistemático, que é designado como a média que resultaria de um infinito número de medições do mesmo mensurando menos o valor verdadeiro do mensurando (INMETRO, 2000 p. 33), do mesmo modo que o erro aleatório, ele pode apenas ser estimado. Para essa estimativa, que é obtida através da média das indicações, é dado o nome de tendência ( $T_d$ ), e que também é uma característica própria do equipamento de medição.

Segundo SOARES (1998), essas duas características ( $Re$  e  $T_d$ ) devem ser consideradas no momento da avaliação da conformidade. No entanto, em quase a totalidade dos certificados de calibração, mesmo os da RBC, não existe meio de ser obtida a  $Re$ . Tal fato deve-se a não apresentação das características de dispersão obtida durante a calibração, que é comumente avaliada como parte integrante da incerteza. Essa situação pode ser contornada, se no contrato de calibração for exigido a apresentação dos valores da estimativa da  $T_d$ , do desvio padrão experimental da dispersão das indicações, do número de medições realizadas e da avaliação do Tipo B da incerteza da calibração.

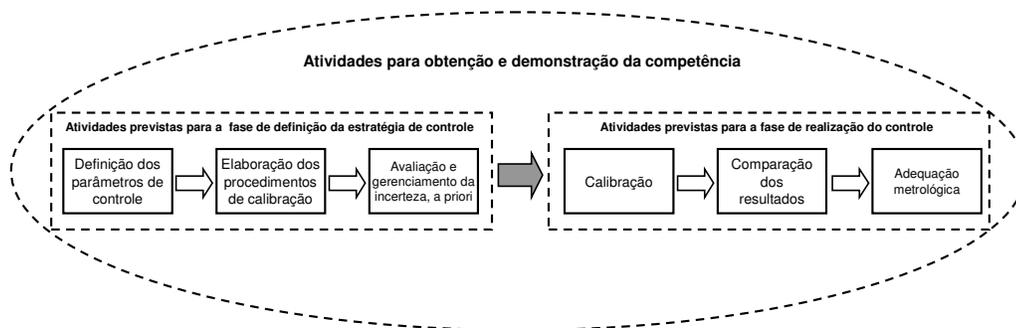
É proposta deste documento, que tanto a  $T_d$  quanto a  $Re$  sejam as características avaliadas para a constatação da conformidade quando o equipamento for tratado como um sistema de medição independente. Porém, durante a realização dos estudos foi constatado que multímetros digitais (DMM) possuem características de resposta bastante típicas. Basicamente a resposta de um DMM apresenta variações de ganho, *offset* e linearidade

(FLUKE, 1994; GOEKE, 1988), as quais são atribuídas aos efeitos sistemáticos. Essa constatação indica que DMM repetem muito bem, ficando por vezes o valor da  $R_e$  abaixo do próprio valor da resolução do seu mostrador. Deste modo, não há dispersão de valores significativa entre poucos e muitos ciclos de calibração em um mesmo ponto de controle (SARAIVA, 1996; CORAL, 2003), situação que pode ser utilizada na simplificação do processo de avaliação desse tipo de equipamento.

Deve ser atentado também, que a proposta pode ser extrapolada para avaliação da conformidade de uma medida materializada, que é um dispositivo destinado a fornecer, de modo permanente durante o seu uso, um ou mais valores de uma dada grandeza (exemplos: resistores e indutores padrão, décadas resistivas e indutivas) (INMETRO, 2000 p 36). Nesse tipo de equipamento a  $R_e$  não é uma característica significativa, pois quando sob condições de repetitividade, que é caracterizada por medições em um curto espaço de tempo (INMETRO, 2000 p. 57), o valor de uma medida materializada pode ser considerado fixo e invariável. Assim, não existe necessidade da avaliação da  $R_e$  para a comprovação da conformidade de uma medida materializada.

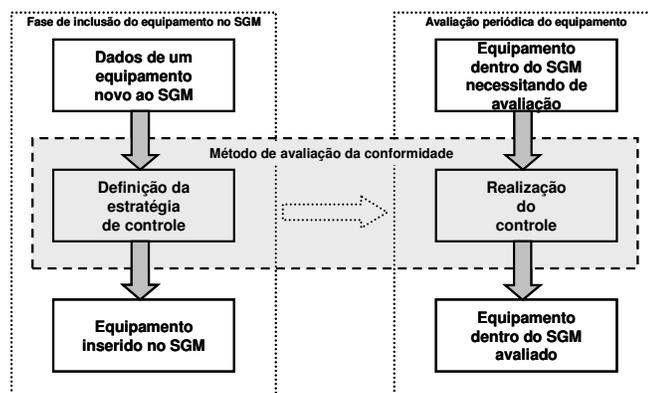
### **3.2 Sistematização das atividades**

Para a sistematização das atividades, dois grupos principais foram propostos. No primeiro grupo são descritas as atividades necessárias à fase de definição da estratégia de controle do equipamento. No segundo grupo são indicadas as atividades necessárias à realização do controle do equipamento. Além desses dois grupos principais, existem ainda as atividades para obtenção e demonstração da competência do resultado da avaliação da conformidade, as quais estão ligadas a todas as etapas do processo (figura 6).



**Figura 6: Atividades previstas para avaliação da conformidade**

A divisão em fases de definição da estratégia e de realização do controle visa dar versatilidade na implementação da proposta junto aos SGM, já que para a realização do primeiro grupo de atividades não existe a necessidade da disposição física do equipamento. Assim, quando esse for inserido no SGM, a fase de definição da estratégia de controle é realizada uma única vez e atualizada quando necessário. Já a fase de realização do controle deve ser realizada periodicamente (figura 7).



**Figura 7: Integração do método ao SGM.**

Essa divisão de atividades também dá oportunidade para a criação de um mecanismo de gerenciamento dos equipamentos, na qual esses podem ser divididos em grupos específicos segundo características semelhantes entre eles. Assim ocorrendo, quando um equipamento for incluído em um desses grupos, ele herdará a estratégia de controle definida para este específico. Essa situação é bem favorável quanto aplicada a multímetros, devido à quantidade de instrumentos semelhantes encontrada nas empresas de transmissão de energia elétrica.

### 3.2.1 Definição dos parâmetros de controle

A definição dos parâmetros de controle do equipamento dá início à fase de definição da estratégia de controle. A partir deles, a elaboração dos procedimentos para a calibração, a avaliação da incerteza e o gerenciamento dela podem ocorrer. Tais decisões não precisam aparecer nos procedimentos destinados à realização da calibração, porém, cada uma delas deve ser devidamente documentada nos registros da avaliação da conformidade.

O primeiro parâmetro a ser selecionado é a classe em que o equipamento está inserido. Indo ao encontro do que foi apresentado em FLESCHE (2003), é prevista a divisão dos equipamentos em classes. Baseado na exatidão e na sua importância dentro da empresa de transmissão de energia elétrica, uma das seguintes classes deve ser adotada para os equipamentos:

- a) **padrões de trabalho** – equipamento utilizado rotineiramente para calibrar outros equipamentos de medição. Devem ser calibrados por padrões de referência (INMETRO, 2000 p. 61). Podem sofrer verificações, exigida na norma NBR ISO/IEC 17025 (ISO, 2001) através do item 5.5.10, mas apenas no intuito de averiguar o seu funcionamento, pois possuem exatidão muito boa para que verificações sejam válidas no momento da avaliação de sua conformidade. São exemplos de equipamentos incluídos nessa classe: os calibradores de grandezas elétricas utilizados na calibração em campo e multímetros de 6 ½ dígitos ou mais;
- b) **equipamentos de uso em processos** – qualquer equipamento que seja utilizado para o controle da qualidade da energia transmitida, seja de modo direto, como os que ficam constantemente conectados às linhas de transmissão, ou indireto, como aqueles utilizados para ajustar os equipamentos da transmissão. Equipamentos utilizados na tarifação também fazem parte desta classe. Geralmente são equipamentos com boa

exatidão e têm-se os seguintes exemplos dos contidos nesta classe: multímetros de 4 ½ e 5 ½ dígitos, eventualmente multímetros de 3 ½ dígitos;

- c) **equipamentos de uso geral** – equipamentos utilizado em trabalhos corriqueiros e que não interferem na qualidade do serviço oferecido pela empresa de transmissão. Geralmente possuem baixa exatidão, e têm-se como exemplo geral os multímetros de 3 ½ dígitos;
- d) **equipamentos de uso na segurança pessoal** – são equipamentos de medição em que seu uso é indispensável para a segurança dos indivíduos durante a execução de um serviço que ofereça risco à vida, como aqueles realizados na manutenção de linhas de transmissão energizadas. Para avaliar essa classe específica deve-se seguir os procedimentos adotados para os equipamentos de uso em processos.

A partir da classe do equipamento deve-se escolher o tipo de calibração que será realizada para monitorar a conformidade. Ela está dividida neste trabalho de três modos distintos, conforme características próprias de avaliação da incerteza e local de realização.

Essa subdivisão ocorre da seguinte forma:

- a) **calibração em laboratório** – aquela realizada dentro de ambientes monitorados e controlados, na qual a minimização das fontes de incertezas ocorrem com grande empenho para a realização de uma calibração. A atuação sobre o ambiente e o histórico das calibrações do padrão podem proporcionar redução da incerteza especificada pelos fabricantes. A avaliação da incerteza da calibração deve ocorrer de forma plena, e o máximo empenho deve ser aplicado no intuito de alcançar valores mínimos dentro das condições apresentadas.
- b) **calibração em campo** – aquela que ocorre fora de ambientes controlados. Porém, com os limites das condições ambientais especificados e monitorados durante a realização.

Este tipo de calibração também pode ser caracterizado por um controle parcial do ambiente, como por exemplo: a atuação sobre a temperatura e não sobre a umidade relativa. O histórico das calibrações dos padrões, dificilmente pode se utilizado para reduzir a incerteza especificada pelo fabricante, no entanto, serve para avaliar a conformidade deles em relação a tais especificações. Essa última afirmação garante que a rastreabilidade seja alcançada durante a realização de uma calibração em campo.

A avaliação da incerteza da calibração em campo deve ocorrer com o mesmo empenho que a realizada em laboratório. Porém, as condições apresentadas, como a falta de controle sobre determinadas grandezas de influência, tendem a elevar os valores da incerteza em relação à praticada em laboratório.

O estudo de um grande número de fontes possíveis de incerteza torna-se necessário. É apresentada no apêndice A desta dissertação uma série de considerações sobre fontes de incertezas específicas da metrologia elétrica.

- c) **verificação** – tal termo é colocado neste documento devido ao vocabulário cotidiano utilizado nos laboratórios de metrologia de um modo geral. Ele aqui tem seu significado diferenciado daquele utilizado na metrologia legal, que é documentado em um vocabulário específico com última versão datada de 2003 (INMETRO, 2003), e regulamentado pela portaria número 102 de 10 de junho de 1988 (BRASIL, 1988). Aqui o termo é utilizado para expressar que a calibração é realizada de forma simplificada, na qual a avaliação da incerteza é levada aos seus limites de pior caso.

Esse tipo de calibração pode ser utilizado para avaliar a conformidade de um grupo restrito de equipamentos, que são aqueles tidos como de uso geral. Para esses não existe a necessidade da realização de uma calibração demasiadamente aprimorada, na qual o esmero em relação à avaliação da incerteza possa ser justificado economicamente. Tal consideração é feita, pois esses equipamentos possuem exatidão

muito inferior em relação aos padrões de calibração e não participam ativamente na obtenção da qualidade serviços oferecidos.

Na proposta apresentada para a verificação é prevista apenas a avaliação do Tipo B da incerteza. Isso se deve ao fato de que em uma empresa de transmissão de energia, a grande maioria dos equipamentos de uso geral são do tipo DMM ou apresentam características de resposta semelhante. Essas características são marcadas por baixos valores de  $R_e$ , o que justifica tanto não consideração dessa no momento da avaliação da conformidade quanto a não avaliação do Tipo A da incerteza.

Todos os três tipos de calibração devem estar em conformidade com os requisitos da norma NBR ISO/IEC 17025 (ISO/ABNT, 2001), deste modo há comprovação da competência desse serviço.

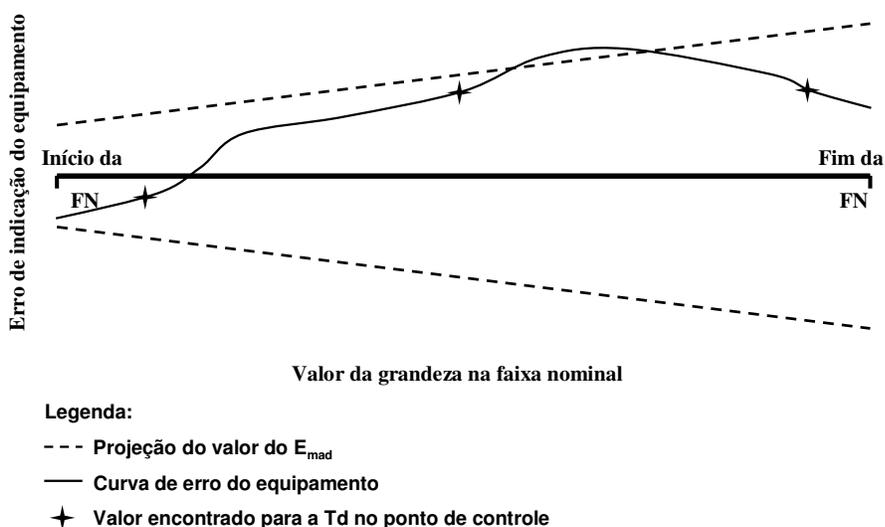
O quadro da figura 8 apresenta quais os tipos de calibrações recomendadas para cada classe de equipamentos de medição, isso segundo critérios técnicos e de custo benefício.

<b>Tipo de equipamento</b>	<b>Ação de monitoração recomendada</b>
Padrões de trabalho	Calibração em laboratório
Equipamentos de uso em processo	Calibração em laboratório ou campo
Equipamentos de uso geral	Verificação
Equipamentos de uso na segurança pessoal	Calibração em laboratório ou campo

**Figura 8: Quadro de relacionamento entre classes de equipamento e ações de monitoração.**

Na seção 3.1 foi estabelecido um roteiro para a definição dos LC, e indica que sobre os valores do  $E_{mad}$  serão estabelecidos os LE. No entanto, o  $E_{mad}$  não pode ser adotado como o próprio LE, pois derivas ocorrem nos equipamentos, e essas devem ser consideradas entre os intervalos de avaliação. Tal característica, marcada pela variação no tempo, projeta os valores de  $T_d$  encontrados na calibração em um instante de tempo  $t_1$ , e que podem inicialmente estar dentro dos valores do  $E_{mad}$ , em valores fora desses limites em um instante de tempo  $t_2$ . Mas

não apenas essa característica inviabiliza a adoção do  $E_{mad}$  como LE, outros fatores também o fazem. O elevado custo da calibração impede a especificação de um grande número de pontos de controle ao longo de toda a faixa nominal (FN) dos equipamentos. Logo, isso pode mascarar erros como linearidade, zero e ganho. O gráfico da figura 9, exemplifica melhor essa situação, e pode-se concluir, que mesmo em um equipamento, na qual os pontos de controle se mantêm dentro dos limites de  $E_{mad}$ , determinados segmentos da curva de erro podem estar fora deles.



**Figura 9: Comportamento da curva de erro do equipamento.**

Como o  $E_{mad}$  não pode ser adotado como LE, é proposta a adoção de um coeficiente de segurança ( $C_s$ ) para compensar essa situação. Assim, mesmo não estando definidos os pontos de controle, é necessário definir o valor de  $C_s$  nesta fase das atividades. Alguns documentos internacionais como a norma alemã DIN 16005 (DIN, 1981) para manômetros, e o documento europeu EA-10/15 (EA, 2001) para DMM, já propõe o uso desse coeficiente, e estabelecem seu valor em 0,8 e 0,7 respectivamente.

A equação (3.2) será utilizada para o estabelecimento dos LE:

$$LE = E_{mad} \times Cs \quad (3.2)$$

onde,

$LE$  – é o limite de especificação para o ponto de controle;

$E_{mad}$  – é o erro máximo admissível do equipamento no ponto de controle;

$Cs$  – é o valor para o coeficiente de segurança, que deve ficar entre zero e um.

A sugestão é que para DMM o valor de  $Cs$  fique em 0,7, como estabelecido no documento EA-10/15 (EA, 2001), e que esse valor seja mantido para calibradores de grandezas elétricas, por esses terem características de resposta influenciadas pelos mesmos efeitos que os DMM (FLUKE, 1994).

Outros dois parâmetros utilizados para o estabelecimento dos LC, e que também devem ser especificados durante a fase de definição da estratégia de controle, são o nível da confiança (NC) e a capacidade do processo de calibração ( $Ca$ ). A sugestão é que seja utilizado durante a calibração, o NC apresentado para o  $E_{mad}$ , e caso o fabricante não forneça ou ele seja demasiadamente pequeno, propõe-se adotar 95%. Para  $Ca$  a sugestão é que o valor fique em torno de 3.

### **3.2.2 Elaboração dos procedimentos de calibração**

Um procedimento de medição é um conjunto de operações, descritas de forma específica, utilizadas na execução de medições particulares (INMETRO, 2000 p. 24). Quando essas medições particulares são realizadas dentro de uma calibração, essa definição pode ser utilizada para definir um procedimento de calibração.

A verificação, como definida na seção 3.2.1 também é uma calibração e, portanto, as considerações apresentadas nesta seção também devem ser estendidas a esse tipo específico de calibração.

Em um procedimento de calibração devem estar especificados os seguintes parâmetros:

- a) **Padrão de calibração** – o padrão utilizado durante a calibração deve estar indicado no procedimento para que não exista dúvidas no momento da execução. Deve ser escolhido de modo que a incerteza propagada pelo padrão ( $IP_{\text{padrão}}$ ) atenda a equação (3.3), satisfazendo assim a capacidade programada.

$$IP_{\text{padrão}} < \frac{LE}{Ca} \quad (3.3)$$

onde,

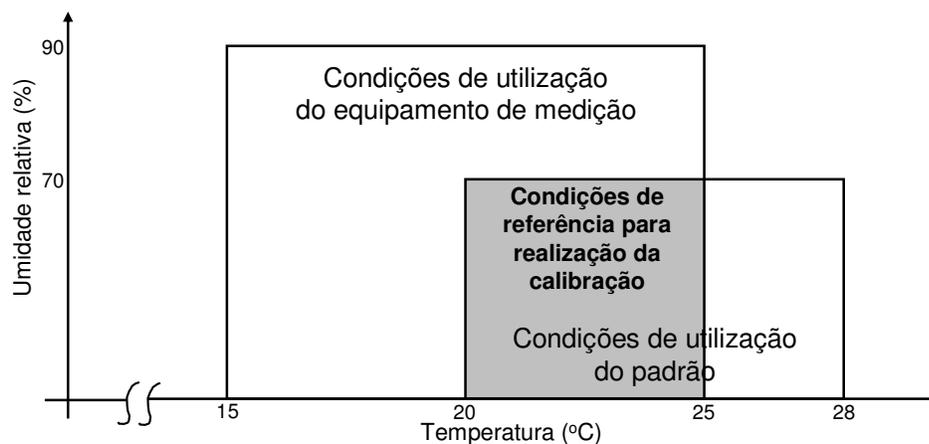
$IP_{\text{padrão}}$  – é a incerteza propagada pelo padrão;

LE – é o limite de especificação do equipamento no ponto de controle;

Ca – é a capacidade definida para o processo de calibração.

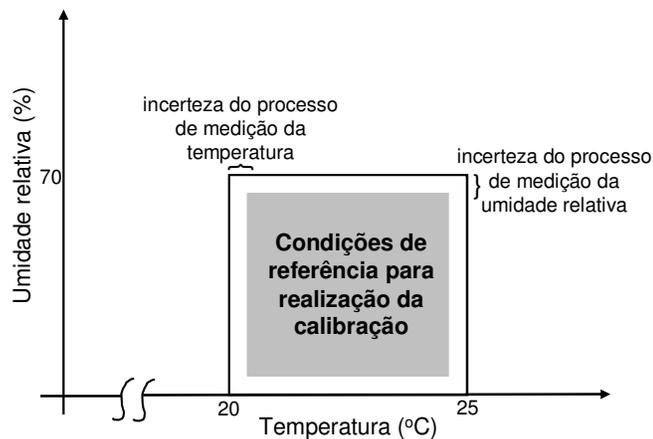
- b) **Método utilizado** – o método de calibração é uma seqüência lógica de operações, descrita genericamente, utilizadas na execução da medição (INMETRO, 2000 p. 24). Deve especificar o tipo adotado (direto ou indireto), conter esquemas de ligações e informações pertinentes à topologia utilizada no processo de calibração. A incerteza do processo de calibração ( $I_{\text{cal}}$ ) é influenciada diretamente por essa escolha.
- c) **Condições ambientais** – é importante que os limites ambientais sejam especificados antecipadamente à calibração, e monitorados no momento de sua realização. Esses valores são obtidos através da intersecção das condições de utilização do padrão, que

são aquelas para as quais as características metrológicas dele se mantêm (INMETRO, 2000 p. 49), e das condições de utilização do equipamento de medição (figura 10).



**Figura 10: Definição das condições ambientais para a realização da calibração.**

Através dessa intersecção são asseguradas as condições para a avaliação do equipamento e aquelas necessárias para a garantia da rastreabilidade. Deve ser lembrado que o sistema de medição utilizado para monitorar essas condições ambientais, também apresentam incertezas em suas medições e essas devem ser consideradas. A figura 11 demonstra tal situação, na qual a incerteza de medição das condições ambientais reduz os limites programados para a realização da calibração.



**Figura 11: Influência da incerteza do processo de medição das condições ambientais.**

É essencial que os equipamentos utilizados para a monitoração das condições ambientais tenham sua conformidade avaliada periodicamente.

- d) **Grandezas a serem avaliadas** – deve ser deixado claro no procedimento qual a grandeza que será avaliada durante a calibração. Isso é necessário pois muitas vezes um equipamento de medição possui configuração de medição de diferentes grandezas, caso dos multímetros que pode medir tanto corrente elétrica, como tensão e resistência. Essa definição deve tomara conforme a política apresentada pela empresa, e os custos envolvidos na calibração. Mas se uma determinada configuração de grandeza de um equipamento não estiver sendo utilizada, ou não influenciar na qualidade final do produto oferecido pela empresa, não existe, *a priori*, necessidade da sua avaliação.
- e) **Faixas nominais (FN)** – da mesma forma que um equipamento pode apresentar configurações de medição para diferentes grandezas, cada uma dessas configurações pode apresentar diferentes FN e com distintas incertezas associadas. Logo, a definição de quais dessas faixas que serão avaliadas deve ocorrer pelos mesmos objetivos estabelecidos na definição das grandezas.
- f) **Características a serem monitoradas** – deve ser colocado de forma clara quais as características que devem ser monitoradas durante o processo de calibração (Td e/ou Re). São definidas segundo a classe e tipo de equipamento.
- g) **Pontos de controle** – no procedimento de calibração há a necessidade de que sejam especificados os pontos de controle. Eles devem ser estabelecidos de forma a considerar particularidades específicas de cada equipamento, que podem incluir tanto as características de construção quanto as necessidades da avaliação da conformidade. Fatores como os custos de calibração também devem ser considerados. A norma NIT-DICLA-004 (INMETRO, 2002) recomenda o mínimo de 3 pontos de controle bem distribuídos em cada FN (10%, 50% e 95% por exemplo) para os equipamentos de

medição grandezas elétricas. Documentos de referência específicos podem ser utilizados para a definição do número de pontos de controle, como EA-10/15 (EA, 2001), que apresenta complemento à NIT-DICLA-004, no que diz respeito a multímetros digitais.

São previstos três tipos distintos de calibração, os quais devem ser realizados dependendo do tipo e da classe do equipamento. Cada tipo de calibração apresenta particularidades que devem ser observadas no momento da elaboração do procedimento e também durante a realização da mesma. O quadro da figura 12 faz o cruzamento dessas particularidades com a classe do equipamento e seu tipo (medida materializada ou sistema de medição independente).

Essas particularidades envolvem:

- a) **Características metrológicas** – como apresentado na seção 3.1.3, é proposto que a  $T_d$  seja a característica estimada para a calibração das medidas materializadas e para aqueles equipamentos tidos como de uso geral. Para os considerados sistemas de medição independente, a proposta é que a  $T_d$  e  $R_e$  sejam as características estimadas durante a calibração.
- b) **Qualificação pessoal mínima exigida para os que realizam a calibração** – a decisão do nível de qualificação dos responsáveis pela calibração é um problema da política da instituição, e não deste trabalho. Porém, é recomendado que para a execução de uma calibração os indivíduos devem estar muito mais treinados, e com conhecimentos apurados sobre o processo, do que aqueles que realizam apenas a verificação.
- c) **Acomodações e condições ambientais** – esse parâmetro é aquele que diferencia a calibração realizada em laboratório daquela em campo. No primeiro caso citado devem ser mantidos os registros do controle e da monitoração. No segundo caso apenas os

registros da monitoração devem ser mantidos, mesmo que o ambiente seja caracterizado pelo controle parcial, como por exemplo, para o conforto térmico pessoal. A norma NBR ISO/IEC 17025 (ISO/ABNT, 2001), em seu item 5.3.1, aceita apenas o registro da monitoração das condições ambientais, desde que as condições de referência, que são aquelas prescritas para a realização do ensaio de desempenho do equipamento (INMETRO, 2000 p. 50), sejam mantidas.

		Tipo de calibração			
		Laboratório	Campo	Verificação	
Tipo de equipamento	Medida materializada	Padrão	C.M. – Td Q.P. – Nível elevado A.C.A. – Monit. e control.	-----	-----
		processo	C.M. – Td Q.P. – Nível elevado A.C.A. – Monit. e control.	C.M. – Td Q.P. – Nível elevado A.C.A. – Monit.	-----
		Uso geral	-----	-----	C.M. – Td Q.P. – Nível básico A.C.A. – Monit.
	Sist. de medição independente	Padrão	C.M. – Td e Re Q.P. – Nível elevado A.C.A. – Monit. e control.	-----	-----
		processo	C.M. – Td e Re Q.P. – Nível elevado A.C.A. – Monit. e control.	C.M. – Td e Re Q.P. – Nível elevado A.C.A. – Monit.	-----
		Uso geral	-----	-----	C.M. – Td Q.P. – Nível básico A.C.A. – Monit.

C.M.: Característica metrológica; Q.P.: Qualificação do pessoal; A.C.A.: Acomodações de condições ambientais.

Figura 12: Quadro de particularidades na execução da calibração.

### 3.2.3 Avaliação e gerenciamento da incerteza, *a priori*

Avaliar e gerenciar algumas parcelas que compõem a incerteza do processo de calibração ( $I_{cal}$ ), antecipadamente à realização da mesma, têm por objetivo verificar e solucionar problemas a respeito da capacidade ( $C_a$ ) exigida. Essas atividades realizadas *a*

*priori* evitam a realização da calibração sem que haja condições mínimas apropriadas para que se consiga atingir os valores pretendidos. Elas estabelecem ainda se o laboratório terá capacidade suficiente de realizar o serviço de calibração. Propõe-se que se siga as recomendações do PUMA (ISO, 1999), apresentadas neste trabalho na seção 2.3, para o gerenciamento da incerteza, e recomendações do GUM (ISO, 1998), apresentadas na seção 2.4, para sua avaliação.

A determinação *a priori* da incerteza da calibração é usualmente caracterizada por uma combinação de parcelas de incerteza padrão do Tipo B. Logo, devem ser seguidas as recomendações apresentadas nas seções 2.4.2, 2.4.3 e 2.4.4, para obtenção de seu valor.

A incerteza alvo ( $U_T$ ) exigida no PUMA (ISO, 1999), é estabelecida a partir de dois parâmetros da estratégia de controle. Ela corresponde à máxima incerteza admitida para o processo de calibração, e é obtida através da equação (3.4):

$$U_T = \frac{LE}{Ca} \quad (3.4)$$

onde,

$U_T$  – é a incerteza alvo para o ponto de controle;

$LE$  – é o limite de especificação no ponto de controle;

$Ca$  – é a capacidade definida para o processo de calibração.

Ao final da etapa de avaliação e gerenciamento, *a priori*, restará um valor de incerteza expandida para cada ponto de controle do equipamento. Sobre cada um desses valores reflete uma incerteza padrão do Tipo B que irá compor a  $I_{cal}$ . Desta forma existe motivo para que esses valores não sejam descartados. A incerteza padrão do Tipo B poderá ser combinada com

a incerteza padrão do Tipo A ou não, isso dependendo do tipo de equipamento e da sua classe, conforme apresentado na seqüência.

Quando o valor determinado *a priori* é combinado com a incerteza padrão do Tipo A, essa última é obtida da dispersão dos valores encontrados durante a execução da calibração, e corresponde à parcela de incerteza proveniente da variabilidade do SMP. Logo, para sua obtenção deve ser seguido as recomendações apresentadas na seção 2.4.1 deste trabalho.

Para a maioria dos casos admitidos nesta proposta, avaliar a conformidade não requer que incerteza padrão do Tipo A componha a incerteza do processo de calibração ( $I_{cal}$ ). Esses casos são aceitáveis porque para uma calibração, no momento de se estimar da  $Re$  do equipamento, não é possível separar aquela proveniente do SMP desse valor. Assim, a variabilidade natural do SMP já é considerada no valor atribuído para a  $Re$  do equipamento de medição, deste modo, seria uma redundância considerá-la novamente na  $I_{cal}$ . Também são admitidos outros casos em que a incerteza do Tipo A não componha a  $I_{cal}$ , quando os equipamentos de medição possuem boa  $Re$ , como os DMM. A resposta desses equipamentos é caracterizada por baixos valores de  $Re$ , ficando muitas vezes abaixo da própria resolução, fato que impossibilita sua estimativa, deste modo, há justificativa técnica e econômica para que não exista uma avaliação da incerteza padrão do Tipo A (ver seções 3.1.3 e 3.2.1).

As alíneas a seguir apresentam as particularidades para a determinação da  $I_{cal}$ , e a figura 13 mostra o cruzamento dessas particularidades com o tipo e classe de cada equipamento.

- a) avaliação da  $I_{cal}$  apenas com parcelas de incerteza padrão do Tipo B – situação admitida para os equipamentos tidos como sistemas de medição independentes e para todos aqueles incluídos na classe de uso geral. Aqui o valor da avaliação determinada *a priori* corresponde ao próprio valor de  $I_{cal}$ ;

- b) avaliação da  $I_{cal}$  com parcelas de incerteza padrão do Tipo A e do Tipo B – essa situação fica restrita às medidas materializadas, na qual a  $Re$  não é uma característica típica desses equipamento (ver seção 3.1.3). Logo, a variabilidade encontrada na calibração deve ser atribuída ao SMP, e essa deve então compor a  $I_{cal}$  como a parcela correspondente à incerteza padrão do Tipo A.

			Tipo de calibração		
			Laboratório	Campo	Verificação
Tipo de equipamento	Medida materializada	Padrão	$I_{cal}$ obtida através de parcelas do Tipo A e do Tipo B	-----	-----
		processo	$I_{cal}$ obtida através de parcelas do Tipo A e do Tipo B	$I_{cal}$ obtida através de parcelas do Tipo A e do Tipo B	-----
		Uso geral	-----	-----	$I_{cal}$ obtida apenas através de parcelas do Tipo B
	Sistema de medição independente	Padrão	$I_{cal}$ obtida apenas através de parcelas do Tipo B	-----	-----
		processo	$I_{cal}$ obtida apenas através de parcelas do Tipo B	$I_{cal}$ obtida apenas através de parcelas do Tipo B	-----
		Uso geral	-----	-----	$I_{cal}$ obtida apenas através de parcelas do Tipo B

Figura 13: Quadro de particularidades na avaliação da incerteza do processo de calibração.

### 3.2.4 Calibração e comparação dos resultados

Encerrada a fase de definição de estratégias, tem início a fase de controle da conformidade do equipamento. O controle deve ser feito periodicamente, e começa pela realização da calibração, tendo em vista que essa é a ferramenta pela qual se estimam as características do equipamento que determinam, através de comparação, o resultado de sua conformidade.

Com a calibração realizada e os resultados em mãos, para a constatação da conformidade serão comparados os erros máximos do equipamento, avaliados durante a calibração ( $E_{mav}$ ), com os respectivos limites de especificação (LE). Desta forma, se a desigualdade apresentada pela equação (3.5) for satisfeita, para cada ponto de controle do equipamento, esse será considerado conforme (FLESCHE, 2003; 2001), e também uma boa expectativa de que suas especificações estarão mantidas até a próxima avaliação.

$$E_{mav} \leq LE \quad (3.5)$$

onde,

$E_{mav}$  – é o erro máximo avaliado do equipamento de medição no ponto de controle;

LE – é o módulo do limite de especificação do equipamento de medição no ponto de controle.

O termo erro máximo avaliado ( $E_{mav}$ ) foi extraído de FLESCHE (2001), e indica os valores extremos obtidos da combinação das características encontradas na calibração e suas respectivas incertezas. Como nesta proposta de avaliação tanto as características metrológicas dos equipamentos quanto a incerteza do processo de calibração ( $I_{cal}$ ) são obtidas de modo particular, dependendo do tipo e classe de equipamento, no momento da obtenção de  $E_{mav}$  também existem particularidades.

Dentro dessas particularidades, têm-se os seguintes meios para a obtenção de  $E_{mav}$ :

a) Obtenção do  $E_{mav}$  para a classe de equipamentos de uso geral:

$$E_{mav} = Td + I_{cal} \quad (3.6)$$

onde,

$Td$  – é o módulo da tendência do equipamento no ponto de controle;

$I_{cal}$  – é o módulo da incerteza do processo de calibração, obtida a partir da avaliação Tipo B.

b) Obtenção do  $E_{mav}$  para equipamentos do tipo medidas materializadas:

$$E_{mav} = Td + I_{cal} \quad (3.7)$$

onde,

$Td$  – é o módulo da tendência do equipamento no ponto de controle;

$I_{cal}$  – é o módulo da incerteza do processo de calibração, obtida a partir de avaliações Tipo A e Tipo B.

c) Obtenção do  $E_{mav}$  para equipamentos do tipo sistemas de medição independente

$$E_{mav} = Td + Re + I_{cal} \quad (3.8)$$

onde,

$Td$  – é o módulo da tendência do equipamento no ponto de controle;

$Re$  – é o módulo do valor encontrado para a repetitividade do equipamento no ponto de controle;

$I_{cal}$  – é o módulo da incerteza do processo de calibração, obtida a partir da avaliação Tipo B.

Nesta proposta de comparação dos resultados, o critério de aceitação do equipamento está de acordo com a norma ISO 14253-1 (ISO, 1998; FLESCHE, 2001; 2003). Assim, quando  $E_{mav}$  for menor que LE pode-se afirmar, com um determinado nível de confiança (NC), que as características do equipamento estão dentro dos limites de comprovação da conformidade (LC) (figura 2, seção 2.2).

Deve ser salientado que nesse critério que a  $I_{cal}$  é abordada como um parâmetro que determina a não-conformidade dos equipamentos. Deste modo é adotado uma postura conservadora em relação à região de dúvida formada por essa incerteza, já que ali a conformidade não pode ser definida (ISO, 1998; ILAC, 1996).

Com as atividades de calibração e a comparação dos resultados realizadas, é necessário que o registro dessas atividades sejam efetuados. Esses registros são previstos pela norma NBR ISO/IEC 17025 (ABNT/ISO, 2001). Eles devem conter informações sobre como ocorreu a realização das atividades, para que essas possam ser reproduzidas sobre mesmas condições.

Dois são os meios propostos para esse registro:

- a) marcas da conformidade – que são selos anexados ao equipamento que indicam visualmente seu estado metrológico e os procedimentos de referência utilizados durante sua avaliação;
- b) relatório de calibração ou certificado de calibração – que são relatórios que apresentam informações detalhadas da calibração, incluindo os procedimentos e os dados de medição.

É proposto que tanto a marca da conformidade quanto o relatório de calibração sejam registros efetuados para os equipamentos de uso em processo e para os padrões de trabalho. Deste modo, a confiança de que o equipamento está conforme com as especificações, no momento de sua utilização, é demonstrado pela marca da conformidade, e os relatórios de calibração formarão o banco de dados que representará o histórico das informações ao longo da vida útil do equipamento.

Para os equipamentos de uso geral, apenas o registro através de marcas da conformidade é suficiente para exprimir que o equipamento foi avaliado e que estava em perfeitas condições de uso no momento dessa avaliação. O registro dos resultados da calibração através de relatórios, para a formação do histórico de um equipamento que não é utilizado na garantia da qualidade do serviço oferecido por uma empresa de transmissão, pode ser considerado dispensável. Mesmo assim, a norma NBR ISO/IEC 17025 (ABNT/ISO, 2001) não é desrespeitada. Através do seu item 5.10.1, o qual indica que para clientes internos o resultado de uma calibração pode ser relatado de forma simplificada (ABNT/ISO, 2001 p. 16), tal situação é admitida.

### **3.2.5 Adequação metrológica**

Para que um equipamento de medição possa ser novamente utilizado em seu processo de medição mantendo as mesmas especificações, depois de detectada a ocorrência de uma não-conformidade, é necessário que ele seja ajustado. Com a realização desse tipo de operação as especificações voltam a valer, as medições desse voltam a ter rastreabilidade e os processos de medição voltam a ter meios para obter confiabilidade metrológica (FLUKE, 1994). No entanto, o ajuste do equipamento não é a única forma possível de fazer com que isso ocorra.

Três são os meios de adequação metrológica apresentados neste trabalho:

- a) **ajuste do equipamento:** operação sobre o equipamento destinada a fazer com que ele tenha desempenho compatível com os limites especificados (INMETRO, 2000 p. 46). Atua no *hardware* e/ou *software* no intuito de compensar no instrumento os desvios ocorridos ao longo do tempo;
- b) **ajuste das especificações:** operação sobre os limites de especificação destinada a fazer com que esses tenham valores compatíveis com os desvios do equipamento ao longo do tempo. Desta forma, o valor de  $E_{mad}$  é aumentado de modo que a rastreabilidade seja garantida durante o uso do equipamento;
- c) **troca do equipamento:** operação na qual o descarte do equipamento não-conforme é realizado, seguindo-se com a substituição por um outro conforme.

O ajuste do equipamento, se comparado com sua troca, pode ser considerado o meio mais barato de fazer com que esse volte a fornecer medições dentro das suas especificações de  $E_{mad}$ . Tal atividade não deve ser confundida com a regulagem ou o reparo. A regulagem é realizada a partir de recursos disponíveis no próprio equipamento para o usuário (INMETRO, 2000 p. 46), de forma que esse possa colocá-lo em condições iniciais de uso. Já o reparo é a operação destinada a fazê-lo voltar a funcionar, e sempre que for realizado deve ser seguido do ajuste.

Em equipamentos mais antigos o ajuste é executado através do *hardware* por meios de componentes eletrônicos variáveis, como potenciômetros e similares. Tais componentes são susceptíveis ao desgaste quando muito exigidos, logo, sujeitos a perder sua funcionalidade com o tempo, o que poderá impedir a realização de novos ajustes. Nos equipamentos mais novos é possível a realização de tal atividade por meio de *softwares* internos, os quais compensam os desvios através de correções diretamente na indicação. Esse tipo de ajuste

evita a degradação dos componentes eletrônicos variáveis, porém, com o tempo os desvios podem alcançar valores extremos não mais viáveis de compensação por *software*, o que exigirá a atuação através do *hardware* (BARTLEY, 1998; FLUKE, 1994). Mesmo equipamentos considerados de baixa exatidão já podem ser encontrados com esse tipo de suporte e devem ser preferidos no momento da aquisição. Quando houver interface de comunicação, a automação do ajuste por *software* pode ser possível, o que representa considerável ganho de tempo.

Quando um ajuste é aplicado em um equipamento, esse deve ser protegido para que os ajustes indevidos não sejam também realizados, senão, que pelo menos que possam ser identificados. Essa proteção atende o item 5.5.12 da norma NBR ISO/IEC 17025 (ABNT/ISO, 2001).

Mesmo que o ajuste do equipamento seja considerado a forma mais barata para a retomada dos valores de  $E_{\text{mad}}$ , essa ainda pode ser uma atividade cara. Os custos elevam-se à medida que a exatidão também aumenta, exigindo inclusive uma quantidade cada vez maior de equipamentos auxiliares para a sua execução (FLUKE, 1994).

Para os padrões de trabalho, além do auto custo do ajuste, existe também a dificuldade em se conseguir padrões de calibração que satisfaçam a capacidade ( $C_a$ ) determinada para o processo de calibração. Isso porque o  $E_{\text{mad}}$  dos padrões de trabalho estão muito próximos dos níveis de incerteza apresentados para o seu processo de calibração. Logo, o que se tem é um valor de  $E_{\text{mav}}$  da mesma ordem do  $E_{\text{mad}}$  do padrão de trabalho, isso devido à grande parcela proveniente da  $I_{\text{cal}}$ . Tal fato impede muitas vezes a constatação da conformidade dos padrões de trabalho, porém, essa não é uma indicação de que esses equipamentos estão desajustados ou com mau funcionamento.

Em ambos os casos, quando o ajuste do equipamento é uma atividade demasiadamente cara ou o valor do  $E_{\text{mav}}$  tem um valor muito próximo dos LE, a solução pode estar no ajuste das especificações.

O ajuste das especificações baseia-se na sobre-estimação do valor do  $E_{\text{mad}}$  apresentado pelo fabricante do equipamento avaliado, o qual é o parâmetro que representa a incerteza propagada por ele em uma medição. Logo, é admitido que os efeitos aleatórios e sistemáticos, estimados durante a calibração, bem como a  $I_{\text{cal}}$ , sejam incorporados às especificações desse equipamento. Assim, o  $E_{\text{mav}}$  passará a compor a incerteza nas futuras medições e o  $E_{\text{mad}}$  é descartado, dessa maneira a cadeia de rastreabilidade não é quebrada.

Nessa opção de ajuste os efeitos sistemáticos não são compensados, mas sim admitidos como uma parcela da incerteza repassada pelo próprio equipamento. Essa situação é considerada, pois, na prática a correção dos efeitos sistemáticos é pouco usual.

O ajuste das especificações parece ser uma opção bastante econômica, porém, deve ser lembrado que quando é admitida a sobre-estimação do valor do  $E_{\text{mad}}$  todos os processos de medição na qual o equipamento faz parte, devem ser reavaliados (CASSIAGO, 1997). Logo, os custos reais dessa sobre-estimação podem aparecer mais adiante, nos processos de medição que utilizam esse equipamento.

A grande ressalva em relação a esse tipo de ajuste é que a constatação da conformidade nesta proposta parte da confirmação dos valores de  $E_{\text{mad}}$ . Com isso, julga-se, de forma implícita, que as demais características do equipamento se mantêm. Por esse motivo o ajuste das especificações não é aconselhável para qualquer equipamento. Fica limitado basicamente aos padrões de trabalho, que por sua vez devem ter um excelente programa de acompanhamento. A opção por esse meio também exige que tal acompanhamento seja monitorado por pessoas com elevado nível de conhecimento de metrologia e das condições de uso do equipamento.

A última forma de adequação metrológica apresentada é a troca do equipamento. Essa situação deve ser admitida quando o custo de manutenção do equipamento, para mantê-lo dentro das especificações, é maior que o próprio valor dele. Em geral isso ocorre quando o equipamento encontra-se seriamente danificado.

### **3.2.6 Atividades para obtenção e demonstração da competência**

Para que exista a constatação de que um equipamento está conforme ou não com as especificações, é indispensável que esse passe pelo processo de calibração. Nesse sentido, o atendimento dos requisitos da norma NRB ISO/IEC 17025 (ISO/ABNT, 2001) é essencial para que o resultado da avaliação da conformidade não seja colocado em dúvida quanto à sua validade. Os resultados de uma calibração devem expressar confiança quanto sua veracidade, de modo que a comparação desses valores possa também expressar confiança no momento de determinar se um equipamento está conforme ou não.

Além dos requisitos apresentados na seção 2.5, existem também os requisitos atribuídos à gerência do laboratório responsável pela calibração. Esses são fortemente voltados à parte administrativa dos laboratórios. Eles estabelecem diretrizes para definição da política institucional, e são necessários para que o laboratório demonstre que tem um sistema de qualidade implementado. Os requisitos da gerência não devem e não podem ser descartados, e envolvem todas as etapas relacionadas com avaliação da conformidade. A análise dos requisitos de gerência fogem ao escopo do presente.

Através do quadro da figura 14, são apresentadas considerações a respeito dos itens técnicos, indicando o que deve ser documentado e registrado. Nessa trabalho o entendimento do termo documento é: a informação e o meio na qual essa está contida

(ISO/ABNT, 2000b p. 13); e do termo registro é: o documento que fornece as evidências das atividades realizadas (ISO/ABNT, 2000b p. 13).

Item	Elaborar documentos com:	Elaborar registros com:
5.2 Pessoal	-as necessidades de formação e de treinamento do pessoal.	-a formação e os cursos realizados.
5.3 Acomodações e condições ambientais	-o procedimento de monitoração e controle, quando praticável, das acomodações e condições ambientais durante a calibração.	-os dados.
5.4 Métodos de calibração e validação	-as normas e documentos de referência publicados por instituições idôneas;	-a constante atualização dos métodos;
	-o método de calibração desenvolvido pelo laboratório, quando for o caso;	-as atualizações do método; -a comunicação a todos os interessados; -a validação do método
	-o procedimento para a estimação da incerteza de medição.	-as fontes de incerteza avaliadas (memorial descritivo); -o método utilizado para a avaliação da incerteza da calibração;
5.5 Padrões utilizados na calibração	-a necessidade de calibração;	-histórico de calibração;
	-pessoal apto para a utilização;	-as pessoas que fazem uso;
	-avaliação da conformidade;	-relatórios da conformidade;
	-o procedimento de compensação dos desvios;	-as atualizações a cada calibração;
	-método de proteção contra ajustes.	-através de lacres de proteção.
5.6 Rastreabilidade da medição	-a indicação que as unidades devem ser rastreadas ao SI;	
	-que quando utilizados laboratórios externos para a calibração dos padrões, que eles possam demonstrar que satisfazem os requisitos da norma;	
	-a necessidade de verificações intermediárias.	
5.8 Manuseio de itens de calibração	-o procedimento de recebimento, manuseio e armazenamento de um equipamento recebido para a realização da calibração.	-anormalidades do equipamento no recebimento; -condições de armazenamento.

**Figura 14: Quadro de documentos e registros dos requisitos exigidos pela ISO 17025 para a obtenção de resultados tecnicamente válidos em uma calibração.**

Deve ser entendido que na NBR ISO/IEC 17025 (ISO/ABNT 2001) os requisitos apresentam de forma implícita ou obrigatória, as necessidades e expectativas do mínimo que deve ser seguido, documentado e registrado (ISO/ABNT, 2000b p. 7). Ela não estabelece como uma calibração deve ser realizada, isso é uma tarefa que deve ser conciliada ao uso pretendido dos dados que serão obtidos dessa tarefa e, portanto, foge ao escopo da norma. Porém, ela fornece subsídios para que além da comprovação da competência, tenha-se:

- a) melhoria contínua do serviço de calibração;
- b) formação de base documental do que é necessário, do que foi aplicado e do que foi obtido na calibração, na qual serve de respaldo para possíveis problemas de confiabilidade dos resultados.

### **3.3 Considerações adicionais à proposta**

Nos parágrafos que se seguem são expostas algumas considerações adicionais, de modo que possam dar apoio à implementação das atividades propostas e à estruturação do método de avaliação da conformidade.

#### **3.3.1 Calibração em campo**

Na seção 3.2.1 foi definido que a calibração de alguns equipamentos poderia ser realizada fora de ambientes laboratoriais. Tal situação foi admitida para facilitar a implantação das atividades de avaliação em uma empresa de transmissão de energia elétrica. Nesse tipo específico de instituição, a alocação dos inúmeros equipamentos ocorre de maneira muito particular. Devido à descentralização dos setores, que podem ser separados geograficamente entre si por muitos quilômetros, cada um deles é equipado com a

instrumentação necessária para manter a qualidade da energia transmitidas na sua área de atuação. Porém, é considerado inviável economicamente, que para cada região exista um laboratório responsável pelas calibrações, pelo controle da conformidade e pelo ajuste dos equipamentos. Assim, é usual que a responsabilidade sobre essas atividades fique centralizada em um único laboratório. Deste modo, é necessário que os padrões de trabalho, juntamente com todo o aparato para a realização da calibração e do ajuste, sejam levados até esses setores para que então ocorra o controle da conformidade.

Junto com a proposta de calibração em campo, duas dificuldades iniciais são encontradas:

- a) a não localização de suporte teórico que trabalhe a realização da calibração em campo de equipamentos de medição de grandezas elétricas;
- b) a necessidade de se atuar em locais em que há falta de controle sobre determinadas condições de influência.

Durante o desenvolvimento desta dissertação, nenhum documento que tratasse da calibração em campo de grandezas elétricas foi encontrado. No entanto, a norma NBR ISO/IEC 17025 (ABNT/ISO, 2001) admite essa situação, desde que as condições e acomodações ambientais encontradas não invalidem os resultados da calibração. Logo, pode ser afirmado que esses são fatores que determinam a confiabilidade dos resultados de uma calibração.

Segundo FLUKE (1994), que é um dos mais renomados fabricantes do mercado, equipamentos de medição de grandezas elétricas tendem a ser muito menos sensíveis ao ambiente do que equipamentos de medição de outras grandezas. Isso se deve muito ao avanço tecnológico dos componentes eletrônicos, que constantemente mostram-se menos susceptíveis as condições ambientais. O fato histórico de não existir consenso entre os países, no momento

de determinar as condições de referência para a comparação dos dados de calibração das grandezas elétricas, também pode ter contribuído para isso. Tais condições podem variar muito entre os países, e provavelmente influenciou para que os fabricantes desenvolvessem equipamentos robustos para atender essa larga faixa solicitada.

O fato de que equipamentos de medição de grandezas elétricas serem pouco sensíveis à variação do ambiente, e de que alguns padrões possuem uma larga faixa de condições de trabalho, fortalecem a idéia de que a calibração em campo, para avaliação da conformidade de determinados equipamentos, é possível.

São apresentadas agora considerações para a implementação das atividades de calibração em campo. Os estudos ficaram restritos aos multímetros digitais (DMM), porque além do relato oferecido na seção 3.1.1, tal grupo é maioria na classe dos equipamentos utilizados em processos, classe essa que admite a calibração em campo. Porém, as considerações aqui apresentadas são colocadas de modo generalista, e podem ser estendidas a outros equipamentos que atendam às mesmas condições de trabalho dos DMM.

Por a calibração em campo se tratar de uma atividade itinerante, a facilidade para realização do serviço de calibração em campo, bem como a utilização da mínima quantidade possível de equipamentos, deve ser uma meta. Nesse sentido, a utilização de padrões de trabalho do tipo multicalibradores parece ser o mais recomendável. Além de esses serem perfeitamente utilizáveis no campo, permitem a ligação direta do equipamento ao padrão. Essa topologia de ligação é denominada de método direto, porque o padrão fornece o valor da grandeza que se deseja fazer a comparação diretamente no equipamento sobre calibração, logo, deve ser preferida pela facilidade de implementação.

Dentre as vantagens dos multicalibradores estão:

- a) condições de trabalho bastante largas, que pode variar em  $10^{\circ}\text{C}$  na temperatura e até 90% na umidade relativa;
- b) internamente possui reguladores de tensão, o que deixa sua operação praticamente independente de sua fonte de alimentação, permitindo inclusive variações de até  $\pm 10\%$  em relação a sua tensão nominal, fato que possibilita a ligação direta na rede local sem problemas;
- c) exigem uma quantidade mínima, ou até mesmo dispensam a utilização de equipamentos auxiliares para a calibração através do método direto;
- d) alguns deles, como Fluke 5101b e Waveteke 9100, são projetados especificamente para fornecer valores de grandezas e níveis de incerteza adequados aos DMM utilizados em campo.

No que depende dos multicalibradores, a calibração em campo pode ser considerada perfeitamente adequada. Porém, em uma calibração qualquer, muito mais fatores são considerados do que apenas o padrão utilizado. Existe também a necessidade de se identificar, minimizar e avaliar outras fontes de incerteza, e que podem ser tão significativas quanto o padrão. Nas calibrações realizadas em laboratório, a minimização de determinadas fontes de incerteza muitas vezes são realizadas através do controle do ambiente, já naquela realizada em campo, isso não pode ocorrer deste modo.

No apêndice A desta dissertação, é apresentado um levantamento de uma série de fontes de incerteza relativas à calibração de tensão e corrente elétrica. Em uma calibração realizada no ambiente laboratorial, onde existe a blindagem eletromagnética e há o controle sobre a temperatura e a umidade relativa, algumas dessas fontes são tidas como insignificantes e, portanto, desconsideradas no momento da avaliação da incerteza do

processo de calibração ( $I_{cal}$ ). Outras aparecem como ruídos, logo, admitidas como uma variabilidade natural do SMP e então avaliadas como uma parcela da incerteza padrão do Tipo A.

Constata-se, no entanto, que avaliar determinadas fontes de incerteza fica praticamente inviável, como por exemplo, a interferência causada por campos magnéticos. Através da equação (3.9) pode ser observado que a intensidade dessa interferência magnética é dada pela variação da densidade de fluxo magnético e também pela variação da área formada pelos cabos de ligação, ambas no tempo. A tentativa de medição desses dois parâmetros, torna praticamente inviável a avaliação isolada dessa fonte de incerteza no momento da calibração. O que pode ocorrer na determinação da  $I_{cal}$  é sua consideração como parte integrante da incerteza padrão do Tipo A. Porém, algumas situações de calibração apresentadas neste trabalho impedem avaliações do Tipo A, logo, essa fonte de incerteza deve ser minimizada ao máximo para que não venha a comprometer a confiabilidade do processo de avaliação da conformidade.

$$V_{\vec{\beta}} = \vec{\beta} \frac{\partial A}{\partial t} + A \frac{\partial \vec{\beta}}{\partial t} \quad (3.9)$$

onde,

$V_{\vec{\beta}}$  – é a tensão introduzida pelo ruído magnético;

$A$  – é a área formada pelos condutores de ligação entre o padrão e o DMM;

$\vec{\beta}$  – é a densidade de fluxo magnético;

$\frac{\partial A}{\partial t}$  – é a variação da área no tempo;

$\frac{\partial \vec{\beta}}{\partial t}$  – é a variação da densidade de fluxo magnético no tempo.

Em situações de campo a minimização dessa e de outras fontes de incerteza deve ocorrer através do esmero no momento da preparação e realização do serviço de calibração. É observado também através do apêndice A, que pequenos cuidados podem minimizar muito algumas fontes de incerteza. Elas, em geral, estão vinculadas aos meios de ligação entre o padrão e o equipamento sobre calibração, os quais devem ser alvo de cuidados especiais.

O quadro da figura 15 apresentado por KEITHLEY (1992), que é um renomado fabricante de equipamentos elétricos, indica as principais fontes geradoras de incerteza na calibração de corrente, tensão e resistência elétrica, devidas tanto ao ambiente quanto às características de ligação. São apresentadas também as faixas na qual essas causas têm maior significância para a calibração.

Grandeza	Faixa de calibração	Causas e fontes de incerteza
Tensão elétrica	< 1 $\mu$ V	Tensões termo elétricas
		Interferência magnética
Corrente elétrica	< 1 $\mu$ A	Isolação
		Correntes de <i>bias</i>
		Acoplamento eletrostático
Resistência elétrica	< 100 m $\Omega$	Vibração e deformação dos cabos
		Resistência de ligação
	> 1 G $\Omega$	Tensões termo elétricas
		Interferência magnética
		Casamento de impedâncias
		<i>Offset</i> de corrente
		Acoplamento eletrostático

**Figura 15: Quadro com as causas das principais fontes de incerteza na calibração de multímetros.**

Através das informações expostas no quadro da figura 15 é observado que para a maioria dos DMM utilizados no campo, que geralmente são de  $3^{1/2}$  e  $4^{1/2}$  dígitos, as faixas na qual existe maior significância das incertezas na calibração, não são usuais para a medição cotidiana utilizando esses equipamentos, ou mesmo nem existem neles. Logo, se as fontes de incerteza provenientes do ambiente são consideradas de pouca significância, e que pequenos cuidados na preparação e realização do serviço de calibração podem minimizá-las muito, então a calibração em campo pode ser considerada válida para avaliar a conformidade dos equipamentos. Porém, a não existência de condições de referência fixa para a calibração e utilização do equipamento, impede muitas vezes que o histórico seja utilizado para compensar os desvios ao longo do tempo. Assim, esse tipo de calibração só pode ser utilizada para outros fins, como por exemplo a diminuição dos valores de  $E_{\text{mad}}$  apresentados pelo fabricante, se ficar constatado que as condições ambientais não têm grande influência sobre as derivas do equipamento.

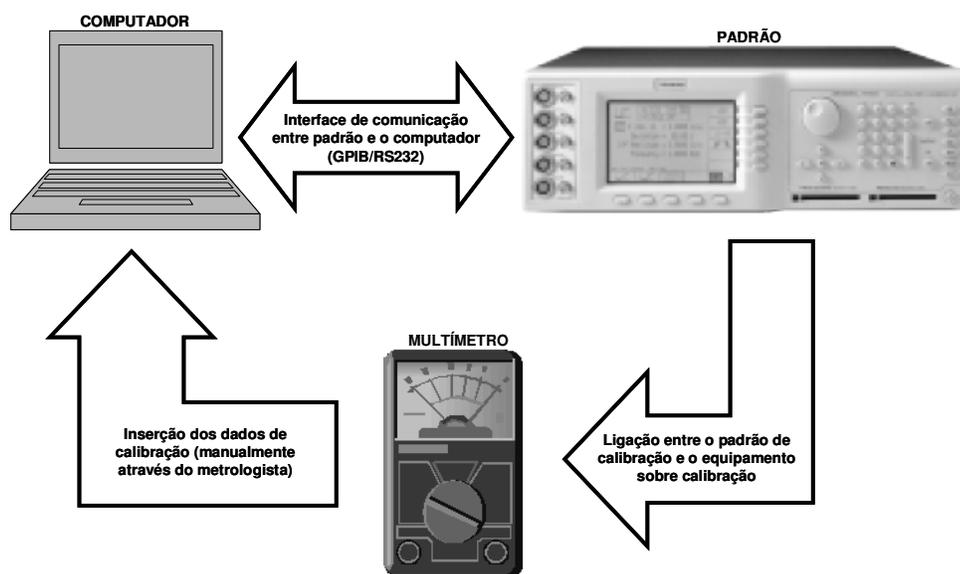
### **3.3.2 Automação da calibração**

A automação da calibração pode trazer inúmeras vantagens na aplicação da proposta, entre elas podem ser citadas (FLUKE, 1994; CORAL, 2003; NACIMENTO, 2002, 2003; VASCONCELOS, 2003):

- a) consistência nas medições;
- b) aumento da produtividade do serviço de calibração;
- c) possibilidade de atuação sobre um maior número de pontos de controle;
- d) documentação automatizada;
- e) rápida decisão sobre a conformidade dos equipamentos;

f) redução dos custos ao longo prazo.

O maior empecilho em utilizar a automação para aumentar a eficiência desta proposta é que ela está focada em equipamentos utilizados no campo, e esses dificilmente possuem interfaces de comunicação. Isso deve-se ao fato de que as instituições não atentam para a economia gerada ao longo prazo com automatização da calibração, logo, o processo de compra de equipamentos não prioriza sua aquisição com interfaces de comunicação. Mesmo assim a automatização não pode ser descartada. Processos semi-automatizados, que são calibrações na qual o comando do padrão se dá através do computador e a inserção dos dados de calibração através do metrologista (figura 16), já representam avanço em relação ao processo normal (NASCIMENTO, 2002, 2003; CORAL, 2003).



**Figura 16: Estrutura da calibração semi-automatizada.**

A automação não deve ficar limitada somente ao processo de calibração, ela também deve ser incluída em outros processos que envolvem o método proposto. A atuação integrada com a decisão de conformidade dos equipamentos, a geração de banco de dados e relatórios, a adequação metrológica e até mesmo a revisão de parâmetros da estratégia de controle, também podem correr.

### 3.3.3 Intervalos entre as avaliações

Durante o detalhamento das atividades, os meios para a determinação do intervalo entre as avaliações da conformidade dos equipamentos não foram abordados. Porém, é sabido que a definição desse intervalo é necessário. Presumivelmente o intervalo entre as calibrações deve ser igualado ao intervalo entre as avaliações (ISO, 2003). A grande quantidade de fatores que se relacionam para determinar os intervalo entre as verificações, impede a elaboração de uma sistemática aplicável universalmente (ISO, 1998, NOVASKI, 2003). No entanto, dois critérios básicos não podem deixar de ser ponderados no momento de sua definição. Desta forma um ponto ótimo entre esses critérios deve ser encontrado (ISO, 1998):

- a) o risco de um equipamento não-conforme estar em uso deve ser tão pequeno quanto possível;
- b) os custos exigidos para a comprovação devem ser mantidos no mínimo.

O documento número 10 da *International Organization of Legal Metrology* (OIML), apresentado no anexo A da norma ISO 10012-1 (ISO, 1998), apresenta alguns métodos para a seleção inicial dos intervalos de avaliação e para o ajuste desses. Tais métodos são apresentados a seguir.

Para a decisão inicial deve ser utilizada a intuição técnica, que nada mais é do que uma estimativa feita por alguém com experiência em medições e no equipamento, e que leva em consideração os seguintes fatores:

- a) recomendação do fabricante;
- b) extensão e severidade de uso;
- c) influência do ambiente;
- d) exatidão pretendida da medição.

A partir da definição inicial, uma análise crítica deve ser estabelecida, pois somente a determinação pela intuição técnica não é considerada suficientemente confiável. Os seguintes métodos de ajuste do intervalo são apresentados pelo documento da OIML (ISO, 1998):

- a) ajuste automático ou escalonado – na qual o intervalo subsequente é estendido caso o equipamento seja considerado dentro das especificações, e voltando ao intervalo inicial após a realização de um ajuste;
- b) gráfico de controle – na qual o intervalo é definido a partir da projeção das tendências do equipamento;
- c) histórico – na qual a divisão de equipamentos em grupos é estabelecida, a partir da quantidade de equipamentos não-conformes nesse grupo é ajustado o intervalo;
- d) tempo em uso – na qual o intervalo é definido pelo tempo que o equipamento foi efetivamente utilizado;

Em todos esses métodos apresentados existe a dificuldade de manter um fluxo de trabalho constante para o serviço de calibração (ISO, 1998), situação pouco aceitável nas empresas de transmissão de energia elétrica. A importância da instrumentação exige meios para a realização da calibração no campo, logo, para viabilidade desta também é exigido um fluxo de calibração constante entre os diferentes equipamentos. A adoção do coeficiente de segurança ( $C_s$  – seção 3.2.1) pode ser tida como solução para esse problema. Uma vez adotado  $C_s$ , o fluxo da calibração pode ser mantido, já que em vez de ajustar de forma desigual o intervalo de avaliação para os equipamentos, pode-se ajustar o próprio valor de  $C_s$ .

Dessa forma é estabelecido um método diferenciado daqueles apresentados pelo documento da OIML (ISO, 1998). Tal método, assim como aqueles que envolvem o ajuste do intervalo, também pondera os dois critérios básicos de risco e custo, apresentados no início

desta seção. Porém, o aqui proposto compreende essencialmente o ajuste do Cs, definido nesse trabalho na seção 3.2.1, e não no intervalo entre as calibrações.

As etapas incluídas nesse método são:

- a) Definição de um intervalo considerado como adequado para a avaliação da conformidade. Deve ser definido para um grupo de equipamentos semelhantes, e levar em consideração:
  - os mesmos fatores apresentados no documento da OIML (ISO, 1998) para a definição do intervalo inicial entre as verificações;
  - características próprias da empresa de transmissão de energia elétrica, como a dificuldade de acesso ao grupo de equipamentos;
- b) Definição do Cs inicial. Deve ser definido individualmente para cada equipamento e levar em consideração:
  - informações do fabricante;
  - características próprias do equipamento;
  - normas e documentos de referência;
- c) Ajuste do Cs. Deve ser realizado individualmente e levar em consideração os seguintes aspectos do equipamento:
  - tempo em uso;
  - histórico de calibrações;
  - severidade de uso;
  - exatidão;
  - importância dentro da instituição.

Vale lembrar que  $C_s$  atua de forma inversamente proporcional à segurança que se deseja estabelecer para o equipamento. Assim, quanto maior a segurança pretendida, para que um equipamento se mantenha dentro das especificações entre dois intervalos consecutivos de avaliação, menor deve ser o valor de  $C_s$ , que pode variar entre zero e um (ver equação 3.2).

Com essa proposta é possível um fluxo constante de calibração para um grupo de equipamentos semelhantes, ao mesmo tempo em que o risco, de cada um desses equipamentos ficar fora das especificações, é considerado individualmente.

Ao longo de todo o trabalho, desde as delimitações da proposta até as considerações adicionais, é mantida coesão com as exigências da norma ISO 9001:2000 (ISO, 2000). Logo, as atividades de avaliação da conformidade podem ser aplicadas dentro desse sistema de gerenciamento da qualidade (SGQ) sem qualquer restrição.

As atividades também são colocadas de maneira generalista, e o método proposto é adequado para avaliar equipamentos em vários níveis da cadeia metrológica. Porém, quanto mais exato é um equipamento, mais difícil avaliar sua conformidade através desta proposta será. Dessa maneira, as atividades ficam basicamente limitadas aos equipamentos utilizados cotidianamente no campo para a obtenção da qualidade do serviço oferecido pelas empresas de transmissão.

Como mencionado em BALDO (2003), o esmero tão exigido nas camadas mais elevadas da cadeia de rastreabilidade, não é cobrado nas medições que diariamente são responsáveis pela qualidade dos produtos de uma empresa, exatamente onde as maiores falhas podem ocorrer. A falta de conhecimento das instituições a respeito da metrologia e seu estado-da-arte, aliada a grande confusão armada pelos fabricantes de instrumentos que adotam o significado da palavra calibração como sendo o ajuste do equipamento, contribuem para que essas falhas ocorram. Esses fatos lavam os usuários a acreditar que quando um equipamento passa por um processo de calibração, esse retorna conforme suas especificações metrológicas. Assim, esta proposta aponta meios para uma correta avaliação dos equipamentos de medição, e alerta para o fato de que não basta apenas calibrar, atividades complementares devem ser implementadas para que a confiabilidade metrológica seja alcançada.

## **4 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS**

### **FUTUROS**

#### **4.1 Conclusões**

Este trabalho apresenta diretrizes para a estruturação de um método de avaliação da conformidade de equipamentos de medição. Ele está fortemente voltado para aqueles equipamentos utilizados na metrologia elétrica, mais especificamente multímetros digitais e multicalibradores. As situações abordadas refletem as necessidades específicas de uma empresa de transmissão de energia elétrica, mas a proposta pode ser viabilizada em outras aplicações assumidas ao longo desta dissertação desde que sejam respeitadas as condições de contorno.

O desenrolar dos trabalhos passou por três fases bem caracterizadas: levantamento do estado-da-arte; acompanhamento durante mais de um ano dos problemas dos laboratórios de uma empresa de transmissão; estabelecimento de diretrizes para avaliação da conformidade. De tais atividades resultaram as seguintes principais conclusões:

- a terminologia é um ponto importante e que causa grande confusão em relação à questão da qualidade metrológica. Enganos levam usuários de equipamentos a acreditar que calibrar é sinônimo de ajustar, o que pode quebrar a cadeia de rastreabilidade, contribuindo diretamente para a má qualidade metrológica;
- foi constatado que o Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia (VIM) é ignorado ou até mesmo desconhecido para a maioria dos fabricantes de instrumentos, e sua terminologia é pouco aplicada nas normas, o que

inclui as da própria *International Organization for Standardization* e as da Associação Brasileira de Normas Técnicas;

- foi constatado que a *International Organization for Standardization* vem apresentando ao longo dos últimos anos, empenho em adequar seus documentos ao VIM, bem como, vem demonstrando grande preocupação com a qualidade metrológica na indústria;
- a *International Organization for Standardization* admite, através da nova norma ISO 10012/2003 (ISO, 2003), que a avaliação da conformidade dos equipamentos de medição é uma atividade necessária para que se possa obter qualidade metrológica nos processos produtivos;
- as particularidades dos equipamentos devem ser analisadas de modo que se possa estabelecer estratégias de avaliação da conformidade condizentes com o seu uso;
- a respeito das características dos equipamentos de medição de grandezas elétricas, pode-se concluir que multímetros digitais apresentam baixa influência de efeitos aleatórios, ficando sua resposta influenciada basicamente por efeitos sistemáticos do tipo: erro de ganho, erro de zero e erro de linearidade;
- para os equipamentos analisados neste trabalho, a tendência é a característica determinante da conformidade, porém outros equipamentos exigem a consideração de outros parâmetros, como a repetitividade;
- é observado que nos atuais certificados apresentados pela rede brasileira de calibração não existem condições para que sejam obtidas as estimativas de repetitividade do equipamento nos seus respectivos pontos de controles;
- os multímetros e calibradores analisados apresentaram histerese desprezível, característica aparentemente típica desse tipo de equipamento;

- equipamentos de medição de grandezas elétricas para uso em campo e chão-de-fábrica são geralmente menos sensíveis ao ambiente que equipamentos de medição de outras grandezas;
- a respeito da proposta apresentada nesta dissertação, pode-se dizer que ela é aplicável no sistema de gestão da qualidade ISO 9001 entre outros, sem que haja restrições;
- a seqüência de atividades: definição dos parâmetros de controle, elaboração dos procedimentos de calibração, avaliação e gerenciamento da incerteza *a priori*, calibração, comparação dos resultados e adequação metrológica, pode ser mantida para outros equipamentos além dos aqui abordados;
- a avaliação *a priori* das parcelas que compõem a incerteza do processo de calibração deve impedir a realização de calibrações que não tenham capacidade para apresentar resultados compatíveis com as necessidades do processo de avaliação da conformidade;
- ao se decidir pela conformidade ou não de um equipamento precisa-se levar em consideração a incerteza do processo de calibração, especialmente em se tratando de equipamentos elétricos, situação em que as relações de incertezas entre dois níveis subsequentes da cadeia metrológica é usualmente de três para um ou até mais baixas;
- o ajuste das especificações podem ser utilizados com ressalvas, já que não existe a efetiva constatação da conformidade do equipamento, que é dada pela comparação entre o erro máximo avaliado através da calibração com o erro máximo admissível apresentado pelo fabricante.
- em relação à calibração em campo, pode-se concluir que as condições ambientais não se mostram como um grande empecilho. Assim, esse tipo de calibração pode

apresentar resultados tecnicamente válidos para avaliação da conformidade dos equipamentos de campo;

- a calibração em campo deve ser marcada pelo grande empenho na preparação para a realização dessa tarefa, tomando-se como principal ponto de esmero, a ligação entre o padrão e o equipamento a ser calibrado, pois ali estão grandes fontes de incerteza;
- as condições de trabalho dos padrões do tipo multicalibradores, apresentam-se de forma bastante larga e, por conseqüência, possibilitam uma larga faixa de condições de referência, o que permite sua utilização como padrão nas calibrações em campo;
- a respeito da automação da calibração, essa pode ser considerada uma atividade com elevado custo inicial. Porém, a redução do tempo de calibração e o aumento da confiabilidade metrológica, podem representar ganhos consideráveis;
- a automação da calibração não deve ser descartada quando o equipamento sob calibração não tiver interface de comunicação já que mesmo no processo semi-automatizado, pode haver significativos ganhos em tempo e confiabilidade;
- a definição de políticas e métodos para estabelecimento de intervalo entre as avaliações é essencial para a manutenção da qualidade metrológica;
- os métodos de ajuste dos intervalos identificados na literatura e os usualmente praticados não permitem considerar o risco individual de cada equipamento, e garantir ao mesmo tempo o estabelecimento de um fluxo de calibração constante para um grupo de equipamentos;
- o ajuste do coeficiente de segurança, estabelecido para que as características metrológicas entre duas avaliações consecutivas, não extrapolem limites admissíveis permite considerar o risco individual de cada equipamento e manter um fluxo de calibração constante;

- por fim, conclui-se que estruturar e implementar as atividades propostas neste trabalho dentro de uma empresa exige muito mais conhecimentos técnicos e comprometimento da administração do que investimentos em infra-estrutura.

## 4.2 Sugestões para trabalhos futuros

A seguir estão as principais sugestões do autor para que seja dada continuidade à pesquisa iniciada neste trabalho:

- aplicar as atividades propostas neste trabalho dentro das empresas de transmissão de energia elétrica e de sistemas de gestão da qualidade do tipo ISO 9001;
- estabelecer indicadores de avaliação desta proposta em relação ao que ela pode representar em termos de ganho em confiabilidade metrológica;
- verificar a possibilidade de utilização da proposta em outras empresas que não as de transmissão de energia e em equipamentos que não os da metrologia elétrica;
- promover meios para integração computacional entre a calibração automatizada e as demais atividades envolvidas na avaliação da conformidade;
- implementar um banco de dados de equipamentos de medição e identificar o universo dos equipamentos que, por apresentarem comportamentos metrológicos semelhantes aos dos aqui analisados, se enquadram nas condições de contorno estabelecidas ao longo deste trabalho;
- avaliar a aplicabilidade dos preceitos apresentados neste trabalho, incluindo a calibração em campo, para avaliação de equipamentos dos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica, como por exemplo transformadores de corrente e de potencial.

## REFERÊNCIAS

ABREU, Y. V. **A reestruturação do setor elétrico brasileiro: Questões e perspectivas.** 1999 168 p. Dissertação (Mestrado em Energia) – Programa Interunidades de Pós-graduação em Energia, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.

AGILENT TECHNOLOGIES INC. *Digital multimeter tutorials.* 2001 15 p. disponível em: <[http://www.educatorscorner.com/media/AN\\_1389\\_1.pdf](http://www.educatorscorner.com/media/AN_1389_1.pdf)>, acessado em: 2003.

AGILENT TECHNOLOGIES INC. *System cabling errors and dc voltage measurement errors in digital multimeters:* Digital Multimeter Measurement Errors Series. Application note AN 1389-1. Jan 2002 8 p. Disponível em: <[http://www.educatorscorner.com/media/AN\\_1389\\_1.pdf](http://www.educatorscorner.com/media/AN_1389_1.pdf)>, acessado em: 2003.

API – AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. *Manual of petroleum measurement standards. Chapter 13 – statistical aspects of measuring and sampling. Section 1: statistical concepts and procedures in measurement.* API-MPSMS, 1a. ed. Washington, June 1985.

API – AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. *Manual of petroleum measurement standards. Chapter 13 – statistical aspects of measuring and sampling. Section 2: methods of evaluating meter proving data.* API-MPSMS, 1a. ed. Washington, Nov. 1994.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. *Standard practice for utilization of test data to determine conformance with specifications.* ASTM D 3244. Apr. 1998. 8 p.

BALDO, C. R. **A interação entre o controle de processos e a metrologia em indústrias de manufatura.** 2003. 103 p. Dissertação (Mestrado em Metrologia Científica e Industrial) – Programa de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

BARP, A. M. **Metodologia de avaliação e de gerenciamento da incerteza de sistemas de medição de temperatura.** 2000. 133 p. Dissertação (Mestrado em Metrologia Científica e Industrial) – Programa de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

BARTLEY, D. *Accrediting artifact of a multi-function calibrator.* In: *Proceedings Measurement Science Conference*, Feb. 1998. 8 p.

BECKERT, S. F.; PALADINI, E. Adequação do controle dos dispositivos de medição à realização do produto. In: III Congresso Latino Americano de Metrologia. *Anais em CDROM.* Curitiba, 30 set. a 03 out. 2002.

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.

BÖLÖNI, P. *Qualifying measuring instruments based on the quadratic approach of the guide to the expression of in measurement*. **OIML BULLTIN**. V. 40, n. 3. July, 1999.

BRASIL. MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA E DO COMÉRCIO. Portaria n. 120 de 10 de jun. de 1988.

BRASIL. MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR; INMETRO – INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. Carta-circular n. 001/SQUAL/DICLA. Rio de Janeiro, 21 dez. 2000.

CASSIAGO, C.; LA PAGLIA, G. *Metrological confirmation os higt precision meltisunction eletrical instruments*. [1997?].

CONGOTE, H. A. G. **Expansão e remuneração de sistemas de transmissão em mercados de energia elétrica**. 2001. 148 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

CORAL, R.; FLESCHE, C. A. Estruturação de um sistema de garantia da confiabilidade metrológica para multímetros utilizados em campo. In: III Congresso brasileiro de Metrologia. METROLOGIA 2003 – Metrologia para a vida. *Anais em CDROM*. Recife, 01-05 set. 2003.

DIN – DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMEN. *General purpose pressure gauges with elastic pressure-responsive elements: Requirements and Testing*. Deutsche Norm DIN 16005, July. 1981. 7 p.

EA – EUROPEAN CO-OPERATION FOR ACCREDITATION. *Expression of the uncertainty of measurement in calibration*. Publication Reference EA-4/02. Dec. 1999. 79 p.

EA – EUROPEAN CO-OPERATION FOR ACCREDITATION. *Guidelines on the calibration of digital multimeters*. Publication Reference EA-10/15, Jan. 2001. 17 p.

FARIAS, Á. M. Calibração – Sua contribuição para a qualidade do produto. **MI**, p.18-23, fev. 2001.

FLESCHE, C. A. **Estruturação de um sistema de simulação de instrumentos de medição**. 2001. 133 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina., Florianópolis, 2001.

FLESCHE, 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 *Maximizing your reference multimeters, minimizing measurement uncertainties*. 2003 12 p. Disponível em: <<http://www.fluke.com/Download/Calibrators/MaxRefMultimeter.pdf>>. Acesso em 2003.

FLUKE CORPORATION. *Calibration: Philosophy in Practice*. 2. ed. Everett, WA: Fluke Corporation, Everett, Wa, U.S.A ,1994. 528 p.

FLUKE CORPORATION. *Dual display multimeters: Model 45. users manual*. 4a. revisão, Everett, Wa, U.S.A. Jan. 1997.

GIRÃO, P. M. B. S. Acreditação de laboratórios segundo a norma ISO/IEC 17025. O impacto da entrada em vigor da norma que regulamenta a acreditação de ensaios e de calibração, e, em particular, as diferenças relativamente à norma EM 45001 anteriormente aplicável. **MI**, fev. 2001.

GOEKE, W. C. *High performance digital multimeters with “internal calibration”*. IEEE, 1988.

HBM HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK. *Electrical measurement of mechanical quantities. Operating manual – Weighing cell and force transducers with strain gauge measurement systems*. [ca. 1990]

HOUAISS – INSTITUTO ANTÔNIO HOUAISS. Dicionário eletrônico Houaiss da língua portuguesa, dicionário em CD-rom, ed. Objetiva. V. 1.0.5, ago. 2002.

HOUTEN, G. ISO 9001:2000. *Information Management Journal*. V. 34, n.2, p.28-7, Apr. 2000.

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

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

ILAC – INTERNATIONAL LABORATORY ACCREDITATION COOPERATION. *Guidelines on assessment and reporting of compliance with specification. Based on measurements and tests in a laboratory*. ILAC-G8, 1996. 11 p.

INMETRO – INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL, et. al. **Expressão da incerteza na calibração**. – Versão Brasileira do “*Expression of the uncertainty of measurement in calibration – EA-4/02*” 1a ed. Brasileira, Rio de Janeiro, jan. 1999. 35 p.

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. 77 p.

INMETRO – INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL, et. al. **Sistema internacional de unidades – SI**. 6a. ed. Brasileira, Brasília, 2000b. 114 p.

INMETRO – INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Orientações para a adoção da NBR ISO/IEC 17025 pelos laboratórios credenciados e postulantes ao credenciamentos**. DOQ-DQUAL-006, documento de caráter orientativo. abr. 2001.

INMETRO – INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Critérios específicos para calibração de instrumentos**

**analógicos e digitais de medição na área de eletricidade.** NIT-DICLA-004, 1a. ed. mar. 2002. 4 p.

INMETRO – INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Vocabulário de metrologia legal.** 3 ed. Rio de Janeiro, 2003. 27 p.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Accuracy of measurement methods and results. Part 2 Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method.* ISO 5725-2, 1a. ed. Dec. 1994. 42 p.

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

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *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.* ISO 14253-2, 1a. ed. Dec.1999. 72 p.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Measurement management systems: Requirements for measurement processes and measuring equipment.* ISO 10012, 1a. ed. Apr 2003. 26 p.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Quality systems: Model for quality assurance in design, development, production, installation and servicing.* ISO 9001, 2a. ed. July. 1994b. 17 p.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Quality systems: Model for quality assurance in production, installation and servicing.* ISO 9002, 2a. ed. July. 1994c. 16 p.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Quality systems: Model for quality assurance in final inspection and test.* ISO 9003, 2a. ed. July. 1994d 13 p.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Statistic – vocabulary and symbols. Part 1: probability and general statistics terms.* ISO 3534-1, 1993. 53 p.

ISO/ABNT. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Garantia da qualidade para equipamentos de medição** – Parte 2: Diretrizes para controle de processos de medição. Tradução: Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR/ISO 10012-2, Rio de Janeiro: ABNT, out. 1999. 15 p.

ISO/ABNT. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Gestão da qualidade e garantia da qualidade** – Terminologia. Tradução: Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR/ISO 8402. Rio de Janeiro: ABNT, dez. 1994.

ISO/ABNT. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Requisitos de garantia da qualidade para equipamentos de medição** – Parte 1: Sistema de comprovação metrológica para equipamento de medição. Tradução: Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR/ISO 10012-1, Rio de Janeiro: ABNT, nov. 1993. 14 p.

ISO/ABNT. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração**. Tradução: Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO/IEC 17025, Rio de Janeiro: ABNT, jan. 2001. 20 p.

ISO/ABNT. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Sistemas de gestão da qualidade: Requisitos**. Tradução: Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR/ISO 9001, Rio de Janeiro: ABNT, dez. 2000.

ISO/ABNT. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Sistemas de gestão da qualidade: Fundamentos e Vocabulário**. Tradução: Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR/ISO 9000, Rio de Janeiro: ABNT, dez. 2000b. 26 p.

KEITHLEY INSTRUMENTS INC. **Low current measurements**. Application note series, n. 100. 2001. Disponível em: <<http://www.keithley.com/servlet/Data?id=6169>>. Acesso em: 2003, 8 p.

KEITHLEY INSTRUMENTS INC. *Low level measurements handbook* – Precision DC, Current, Voltage and Resistance measurements. 4a ed. 1992.

KOCHSIEK, M.; ODIN, A. *Quality management in Metrology: An important prerequisite for the quality assurance of products and services*. In: **Proceedings** 6<sup>th</sup> IMEKO Symposium – Metrology for Quality Control in Production. p.345-350, Vien, Sept. 8-10, 1998.

LHULLIER, M. D. **O Processo de implementação, auditoria e certificação da norma ISO9000 em empresa prestadora de serviço: Um estudo de caso**. 2002. 135 p. Dissertação (Mestrado em Administração) – Programa de Pós-graduação em Administração, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

LIRA F. A. **Metrologia na indústria**. São Paulo, editora Érica, 2001. 246 p.

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

MATTIELLO, N. V. **Proposta de inclusão do consumidor como agente participativo no processo de desenvolvimento de novos produtos alimentícios**. 2002. 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

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

MOERBERCK, F. S., et al. Aspectos técnicos de manutenção do sistema elétrico. In: XIV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. *Anais* Belém, 1997.

NAMAS. *The expression of uncertainty and confidence in measurement for calibrations: Policy, guidance and requirements applicable to NAMAS calibration laboratories – NIS 3003*. 8a. edição, May, 1995. 45 p.

NASCIMENTO, G. R. do. Automação de laboratórios de calibração e ensaio. In: III Congresso Latino Americano de Metrologia. *Anais em CDROM*. Curitiba, 30 set. a 03 out. 2002.

NASCIMENTO, G. R. do; GOMES, M. G. Automação e coleta de dados de instrumentos. In: III Congresso brasileiro de Metrologia. METROLOGIA 2003 – Metrologia para a vida. *Anais em CDROM*. Recife, 01-05 set. 2003.

NOVASKI, O.; FRANCO, S. M.; MARTINS, I. L. Metodologia para estabelecimento e ajuste entre intervalos de calibração. In: III Congresso brasileiro de Metrologia. METROLOGIA 2003 – Metrologia para a vida. *Anais em CDROM*. Recife, 01-05 set. 2003.

NUNES, E. L.; SOUZA, J. R. R. Manutenção centrada em confiabilidade – MCC – Ênfase para Falhas Ocultas. In: XVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. *Anais* disponível em:  
<[http://www.xviisnptee.com.br/acervo\\_tecnico/memoria/xvi/12\\_Grupo\\_XII\\_Gmi/gmi-005.pdf](http://www.xviisnptee.com.br/acervo_tecnico/memoria/xvi/12_Grupo_XII_Gmi/gmi-005.pdf)>  
Campinas, São Paulo, Brasil, 21-26 out. 2001. 5 p.

NUNES, J. O. B. Metodologia de trabalho que se apóia na engenharia da informação para gerenciamento da manutenção. In: XVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. *Anais* disponível em:  
<[http://www.xviisnptee.com.br/acervo\\_tecnico/memoria/xvi/12\\_Grupo\\_XII\\_Gmi/gmi-014.pdf](http://www.xviisnptee.com.br/acervo_tecnico/memoria/xvi/12_Grupo_XII_Gmi/gmi-014.pdf)>  
Campinas, São Paulo, Brasil, 21-26 out. 2001. 6 p.

PASQUA, M. C. P.; CAVICHIOLI, N. R. Um enfoque de qualidade na programação da manutenção no novo contexto do setor elétrico. In: XVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, *Anais* disponível em:  
<[http://www.xviisnptee.com.br/acervo\\_tecnico/memoria/xvi/12\\_Grupo\\_XII\\_Gmi/gmi-009.pdf](http://www.xviisnptee.com.br/acervo_tecnico/memoria/xvi/12_Grupo_XII_Gmi/gmi-009.pdf)>  
Campinas, São Paulo, Brasil, 21-26 out. 2001. 6 p.

SARAIVA, C. P.; PAVAN, V. O.; KUME, A. L. Considerações sobre repetições em processos de calibração de multímetros digitais. 2o SEMETRO – Seminário Internacional de Metrologia Elétrica. *Anais* Curitiba, Paraná,. 24, set. 1996.

SCHWYTER, A. A. **A regulação de gás natural em São Paulo: Questões e Desafios**. 2001. Dissertação (Mestrado em Energia) – Programa Interunidades de Pós-graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001. 105p.

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 *Anais* disponível em:  
<[http://www.xviisnptee.com.br/acervo\\_tecnico/memoria/xvi/12\\_Grupo\\_XII\\_Gmi/gmi-002.pdf](http://www.xviisnptee.com.br/acervo_tecnico/memoria/xvi/12_Grupo_XII_Gmi/gmi-002.pdf)>  
Campinas – São Paulo - Brasil, 21-26 out. 2001. 6 p.

SOARES, JR. L. **Confiabilidade metrológica no contexto da garantia da qualidade industrial: Diagnóstico e sistematização de procedimentos**. 1999. 120 p. Dissertação (Mestrado em Metrologia Científica e Industrial) – Programa de Pós-graduação em

Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

TONDELLO, C. J. **Uma metodologia para gerenciamento do risco de empresas de transmissão.** 2001. 107 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

VASCONCELOS, F. H.; SALLUM, A. T. Sistema automatizado para a calibração de instrumentos multifuncionais de medição. In: III Congresso brasileiro de Metrologia. METROLOGIA 2003 – Metrologia para a vida. *Anais em CDROM*. Recife, 01-05 set. 2003.

VINGE, J. J. et al. Gestão do conhecimento em metrologia científica e industrial: Estudo de Caso. In: III Congresso brasileiro de Metrologia. METROLOGIA 2003 – Metrologia para a vida. *Anais em CDROM*. Recife, 01-05 set. 2003.

WAVETEK CORPORATION. *Universal calibration system. Model 9100.* user's handbook. Vol. 2, jun. 1998.

## APÊNDICE

# FONTES DE INCERTEZA NA CALIBRAÇÃO DE TENSÃO E CORRENTE ELÉTRICA

Incerteza de calibração como definida na seção 1.1 é somente uma pequena parte de uma complexa conceituação contida no GUM (BIPM, 1998; INMETRO 2000). De modo algum se pode afirmar que o valor obtido na avaliação da incerteza de uma calibração é a única distribuição possível para os valores de um mensurando. Esse valor, por definição, reflete apenas o nível de conhecimento que se tem a respeito do mensurando e das fontes de incerteza que atuam sobre uma medição. Felizmente na maioria das situações de calibração, as inúmeras fontes de incertezas são bem conhecidas e controladas, o que dá respaldo para a comparação do resultado da calibração entre os vários níveis da cadeia metrológica (BIPM, 1998).

A seguir são apresentadas as principais fontes de incerteza observadas na calibração de tensão e corrente elétrica, excluindo-se aquelas provenientes do padrão.

### A.1 Resolução do equipamento sobre calibração

Uma fonte de incerteza encontrada na calibração a resolução dispositivo mostrador do equipamento sobre calibração. Tal fonte de incerteza é caracterizada pela distribuição retangular de probabilidade dentro desse intervalo (BIPM, 1998). Neste caso a incerteza proveniente da resolução é dada pela equação (A.1):

$$u_R = \frac{a}{\sqrt{12}} \quad (A.1)$$

onde,

$u_R$  – é a incerteza padrão proveniente da resolução do DMM;

$a$  – é a resolução do DMM.

## **A.2 Fontes de incerteza na calibração de tensão**

Essa seção visa analisar em detalhes as principais fontes de incerteza pertinentes à calibração de tensão de um DMM.

### **A.2.1 Interferência de rádio frequência**

Muitos equipamentos de medição de tensão podem gerar leituras incorretas na presença de sinais de alta frequência com potência relativamente elevada, tal como sinais de rádio, televisão, telefone celular ou mesmo sinais provenientes de um monitor de computador. Eles podem também interferir na leitura através dos cabos de ligação entre o padrão e o DMM, pois esses podem funcionar como antena (AGILENT, 2002).

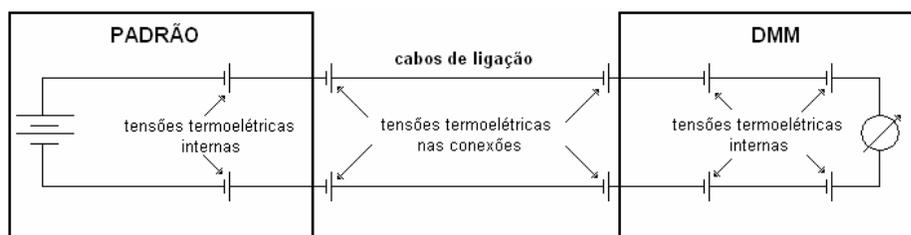
Para minimizar tais efeitos deve-se (AGILENT, 2002):

- a) evitar a exposição tanto dos equipamentos quanto dos cabos de ligação aos sinais de alta frequência;
- b) blindar os cabos de ligação;
- c) manter esses cabos de ligação o mais curtos possível.

### **A.2.2 Tensões termoelétricas**

As tensões termoelétricas são pequenas diferenças de potenciais, geradas através das junções de diferentes metais com gradiente de temperaturas entre eles. Tais efeitos possuem maior significância quando baixos níveis de tensão estão envolvidos, e geralmente são ignoradas em níveis maiores (FLUKE, 2003; AGILINT 2002; KEITHLEY, 1992). Essa fonte

de incerteza não é exclusividade das interligações externas, ela também é encontrada nas junções internas dos equipamentos, e são considerada como parte integrante da tensão de *offset* (KEITHLEY, 1992). Essas tensões, no entanto, são avaliadas na incerteza através do  $E_{\text{mad}}$  do padrão. A figura 17 apresenta o modelo elétrico de tal efeito, vale lembrar que internamente os DMM também sofrem as conseqüências desse efeito, que aparece na calibração como parte integrante da tendência.



**Figura 17: Tensões termoelétricas**

Externamente aos equipamentos, cada conexão realizada entre o padrão e o DMM deve ser considerada uma potencial fonte de tensões termoelétricas. Porém, elas são proporcionais às diferenças de temperatura entre as conexões. A medição de tal parâmetro é difícil e a sua compensação é pouco usual (AGILENT, 2002). O quadro da figura 18 apresenta as mais comuns junções formadas nas conexões de ligação, junto com os níveis de tensão formados por elas (AGILENT, 2002; KEITHLEY, 1992).

Tipo de junção	Tensão termoelétrica
Cobre com cobre	$< 0,3 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Cobre com ouro	$0,5 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Cobre com prata	$0,5 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Cobre com latão	$3 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Cobre com liga de chumbo e estanho	$3 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Cobre com solda de chumbo	$5 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Cobre com silício	$500 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Cobre com cádmio	$0,2 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Cobre com óxido de cobre	$1000 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$

**Figura 18: Quadro de coeficientes termoelétricos.**

Para minimizar os efeitos das tensões termoelétricas deve-se (AGILENT, 2002; KEITHLEY, 1992):

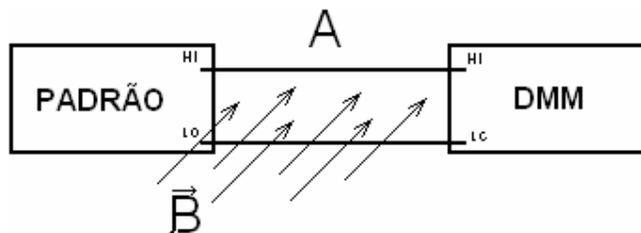
- a) utilizar as conexões bem apertadas;
- b) realizar conexões sempre com um mesmo material como por exemplo de cobre para cobre;
- c) manter as conexões e os equipamentos o máximo possível a mesma temperatura;
- d) manter as conexões e os equipamentos longe de fontes extensas de calor, como luz do sol entre outras;
- e) manter as conexões e os equipamentos longe de fluxos de ar intensos como, ventiladores e condicionadores de ar;
- f) manter as conexões sempre limpas;
- g) quando for permitido a inversão dos terminais entre o padrão e o DMM, esse efeito pode ser desconsiderado através da média das leituras (KEITHLEY, 1992).

### **A.2.3 Ruído causado por campo magnético**

São ruídos ocasionados pela introdução de tensões no circuito de medição através da movimentação dos cabos dentro de um campo magnético constante, pela variação do campo magnético ou pela variação de ambos (AGILENT, 2002; KEITHLEY, 1992). Estas tensões são proporcionais à área do circuito formado entre os cabos de ligação dos equipamentos, a densidade de fluxo magnético que atravessa essa e a taxa de variação de ambos no tempo (figura 19) (KEITHLEY, 1992).

Mesmo o fraco campo magnético da terra pode gerar ruído da ordem de nanovolts (KEITHLEY, 1992), e a falta de cuidado em relação a essa fonte de incerteza pode elevá-la a níveis de tensão de até alguns milivolts (AGILENT, 2002). Por tal motivo o cuidado deve ser

redobrado quando uma calibração é realizada fora dos ambientes preparados para minimizar esse efeito.



$A$  - área formada pelos condutores

$\vec{B}$  - densidade do fluxo magnético

**Figura 19: Tensões geradas por campos magnéticos.**

A equação (A.2) mostra o comportamento matemático de tal ruído.

$$V_{\beta} = \vec{\beta} \frac{\partial A}{\partial t} + A \frac{\partial \vec{\beta}}{\partial t} \quad (\text{A.2})$$

onde,

$V_{\beta}$  – é o nível de tensão introduzido pelo ruído;

$A$  – é a área formada pelos condutores de ligação entre o padrão e o DMM;

$\beta$  – é a densidade de fluxo magnético;

$\frac{\partial A}{\partial t}$  – é a variação da área no tempo;

$\frac{\partial \beta}{\partial t}$  – é a variação da densidade de fluxo magnético no tempo.

Para minimizar os efeitos dos ruídos causados por campos magnéticos (AGILENT, 2002; KEITHLEY 1992), deve-se:

- a) diminuir a área formada pela ligação entre o padrão e o DMM, mantendo os cabos de ligação juntos e diminuindo a distância entre os equipamentos;
- b) utilização de par trançado para as ligações;
- c) evitar fontes de vibração constantes;
- d) condutores com altas correntes possuem elevado campo magnético e devem ser mantidos distantes, assim como: motores, geradores, televisores e monitores.

#### A.2.4 Laços de terra

Em uma calibração realizada com o padrão e o DMM referenciados em um mesmo terra, o ruído conhecido como laço de terra é gerado. A figura 20 apresenta o modelo elétrico para tal ruído, na qual se pode notar a existência de uma pequena diferença de potencial entre os dois pontos de terra. Logo, um pequeno fluxo de corrente é gerado entre elas, que forma dessa maneira um laço de corrente (AGILENT, 2002; 2001; KEITHLEY, 1992).

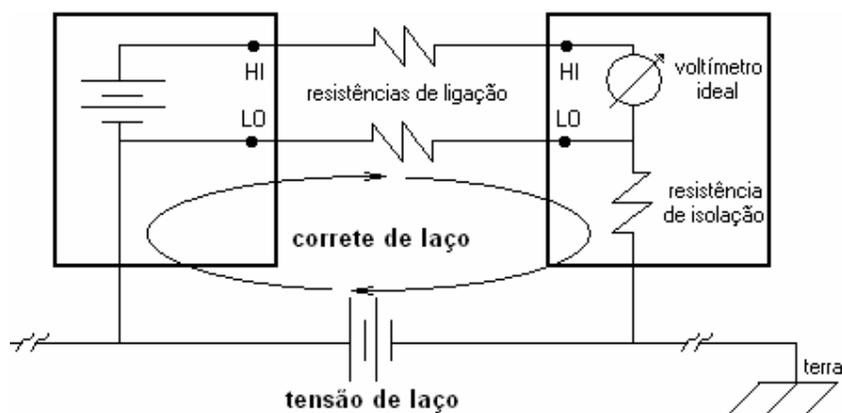


Figura 20: Laço de terra.

Esse é um efeito muito comum onde tem-se vários equipamentos conectados a um mesmo *rack* (KEITHLEY, 1992). O melhor modo de eliminar tal efeito é manter um dos dois equipamentos desconectado do terra (AGILENT 2001; 2002; KEITHLEY, 1992).

### A.2.5 Injeção de corrente

Também conhecido como corrente de modo comum (KEITHLEY, 1992), a injeção de corrente se deve às capacitâncias residuais dos equipamentos de medição, geralmente ocasionadas nos seus transformadores (AGILENT, 2002; KEITHLEY, 1992). Elas causam pequenos fluxos de corrente do terminal LO para o terra, e se comportam como um ruído na medição (KEITHLEY, 1992).

Algumas fontes de tensão regulam seus sinais de saída através de divisores resistivos, o que pode levar esse ruído a níveis significativos dependendo da ligação entre os equipamentos de medição. Com a conexão apresentada na figura 21 (a), o fluxo de corrente injetada praticamente não adiciona ruído algum. No entanto com a conexão da figura 21 (b), pode ser significativo para elevados valores de R1. Como a corrente injetada tem frequência igual à da fonte de alimentação dos equipamentos, para a calibração de tensão contínua esse efeito pode ser eliminado colocando a integração do DMM em um ou mais PLCs (*Power Line Cycle*) (AGILENT, 2002; KEITHLEY,1992).

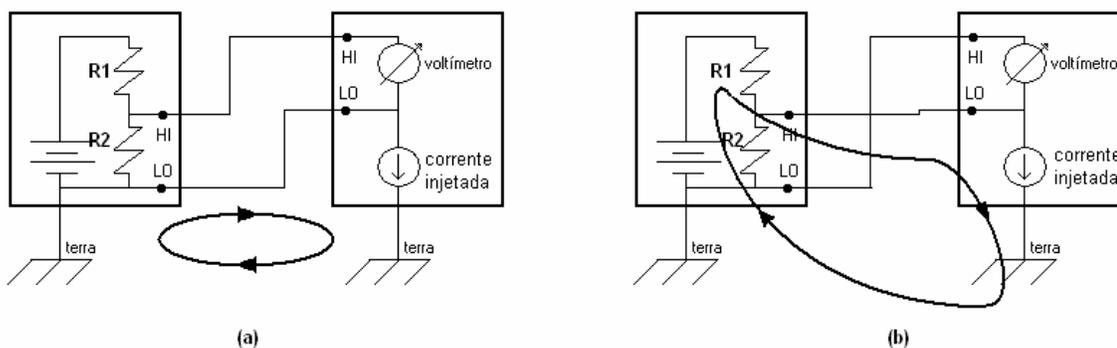


Figura 21: Injeção de corrente.

### A.2.6 Rejeição de modo comum

Idealmente um multímetro é completamente isolado do terra, porém, DMM reais são melhores modelados como se tivessem um alto valor de resistência entre o terminal LO e o terra (AGILENT, 2002).

A resistência de isolamento, representada por sendo  $R_i$ , pode causar erros quando a calibração é feita de modo diferencial (figura 22). Esse erro é modelado matematicamente pela equação (A.3) (AGILENT 2001; 2002):

$$Erro(V) = \frac{V_{MC} \times R_s}{R_s + R_i} \quad (A.3)$$

$V_{MC}$  – é a tensão de modo comum;

$R_i$  – é a resistência de isolamento do DMM (sempre maior que  $10\text{ G}\Omega$ );

$R_s$  – é a resistência em balanço.

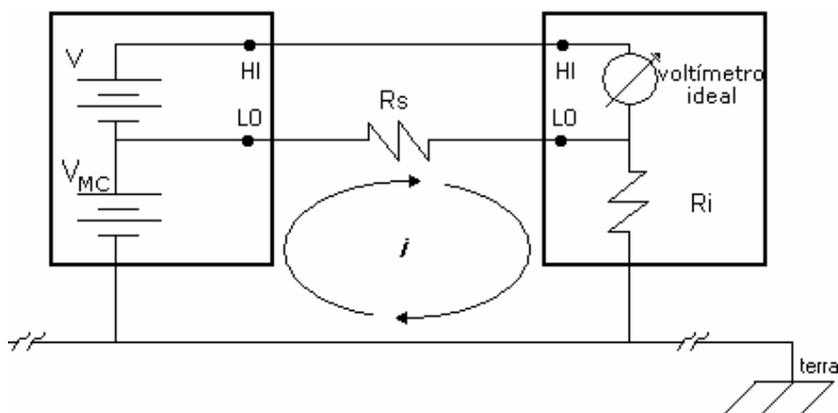


Figura 22: Rejeição de modo comum.

### A.2.7 Casamento de impedâncias

Esse efeito é significativo quando a resistência interna do padrão é percentualmente significativa em relação à resistência de entrada do DMM. O erro causado pelo acoplamento é modelado matematicamente através da equação (A.4), e a figura 23 dá uma melhor idéia do que são as impedâncias de acoplamento (AGILENT, 2002).

$$Erro(\%) = \frac{100.R}{R + Ri} \quad (A.4)$$

onde,

R – resistência interna da fonte de tensão;

Ri – resistência de entrada do DMM.

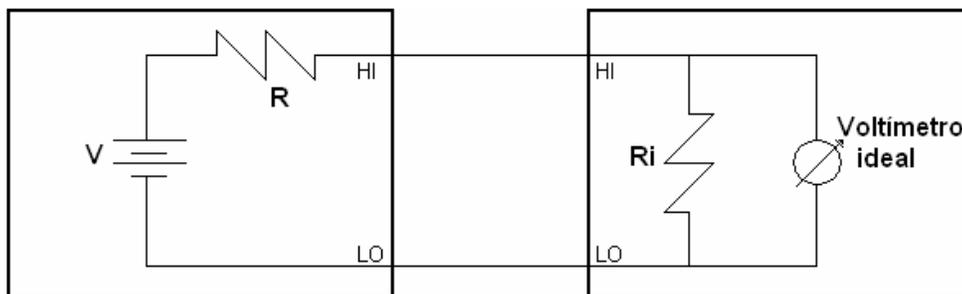


Figura 23: Impedâncias de acoplamento.

## A.3 Fontes de incerteza na calibração de corrente

Essa seção visa analisar em detalhes as principais fontes de incerteza pertinentes à calibração de corrente de um DMM.

### A.3.1 Ruído eletrostático

O ruído eletrostático é ocasionado pela influência das tensões na vizinhança dos condutores de ligação entre o padrão e o OSC. Essa fonte de incerteza é proporcional ao nível

de tensão da fonte de influência, ao valor da capacitância de acoplamento entre essa e os cabos de ligação e a taxa de variação de ambas no tempo (KEITHLEY, 1992).

O ruído pode ser modelado matematicamente através da equação (A.5):

$$i = C \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial C}{\partial t} \quad (\text{A.5})$$

onde,

$i$  – é o ruído de corrente;

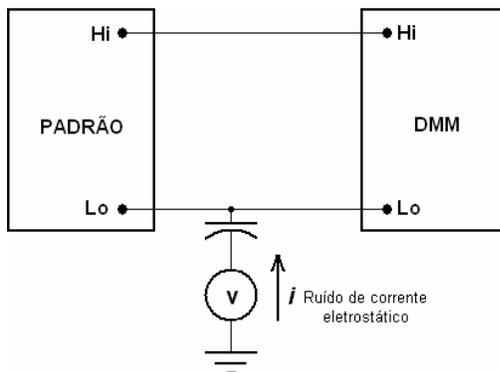
$C$  – é o valor da capacitância de acoplamento;

$V$  – é a diferença de potencial entre a fonte de influência e os cabos;

$\frac{\partial V}{\partial t}$  – é a taxa de variação do valor da tensão no tempo;

$\frac{\partial C}{\partial t}$  – é a taxa de variação da capacitância no tempo.

Esse ruído é muito mais significativo quando a diferença de potencial é alta entre os condutores que ligam o padrão ao DMM – da ordem de centenas de volts por exemplo. A umidade relativa e a oscilação dos cabos também são fatores de que dão origem a esse ruído, que pode alcançar alguns picoampères. A figura 24 apresenta o modelo elétrico do ruído.



**Figura 24: Ruído eletrostático.**

Algumas formas de minimizar esse ruído são (KEITHLEY, 2001):

- a) diminuir a umidade relativa do ar;
- b) evitar a vibração dos condutores de ligação durante a calibração;
- c) através da cobertura eletrostática nos cabos de ligação (figura 25).

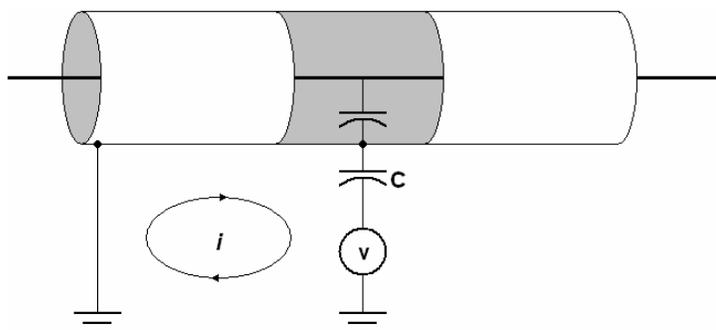


Figura 25: Cobertura eletrostática.

### A.3.2 Corrente de *offset*

Em uma calibração, tanto o padrão quanto o DMM, não deveriam conter fluxo de corrente enquanto os cabos de ligação entre eles estivessem desconectados. No entanto, pequenas correntes existem, e são conhecidas como correntes de *offset*. Elas se fazem presente nas medições dos equipamentos e geralmente consideradas nas especificações de  $E_{\text{mad}}$  (KEITHLEY, 1992). Deste modo, aparecem no resultado da calibração como uma parte da incerteza vinculada ao padrão e como parte integrante da tendência do DMM.

### A.3.3 Ruído Triboelétrico

Dado através de pequenas correntes geradas entre os condutores ligação e sua isolação, que ocorrem devido a fricção entre eles. O atrito entre o condutor e sua isolação cria desequilíbrio de cargas que geram um fluxo de corrente. Um típico exemplo são as correntes geradas por isoladores e condutores movendo-se em um cabo coaxial (KEITHLEY, 2001).

Os métodos para minimizar tais efeitos são (KEITHLEY, 2001):

- a) utilização de cabos com baixo efeito triboelétrico;
- b) remoção das fontes de vibração, principalmente as constantes como os motores.

#### A.3.4 Ruído piezoelétrico

São pequenas correntes geradas devido à aplicação de um esforço mecânico a certos materiais isolantes utilizados nos terminais de ligação dos equipamentos (figura 26), são mais críticos em cerâmicas e materiais cristalinos, embora alguns tipos de plásticos também apresentam essa propriedade (KEITHLEY, 2001). Esse efeito pode gerar correntes de até alguns picoampères.

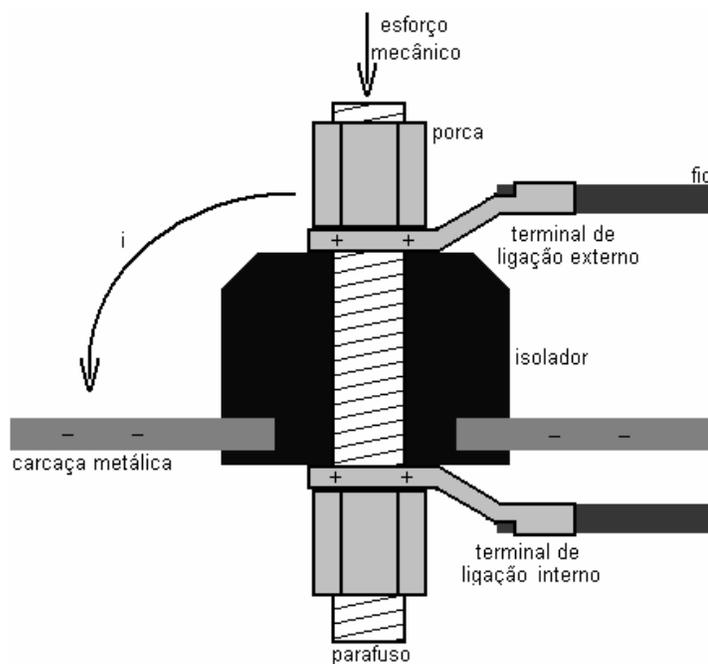


Figura 26: Efeito piezoelétrico.

Para minimizar tal efeito deve-se aliviar o estresse mecânico que está sobre os isoladores e usar materiais que minimizem esse efeito (KEITHLEY, 2001). Porém deve ser lembrado que o esforço deve ser aliviado apenas sobre os isoladores, e não sobre as conexões metálicas entre o padrão e o DMM, pois isso ocasionaria o mau contato entre as ligações dos equipamentos.

### **A.3.5 Ruídos eletroquímicos**

Os efeitos eletroquímicos também podem causar ruídos em uma calibração de corrente. Basicamente são causados entre as trilhas de condutores das placas de circuitos impresso, que formam pequenas baterias químicas entre eles. Como um exemplo pode ser citado as placas impressas em epóxi, que se não forem devidamente limpas podem gerar alguns nanoampéres de corrente entre as trilhas e que mesmo limpas chegam a alguns picoampéres (KEITHLEY, 2001).

### **A.3.6 Ruídos por absorção dielétrica**

Ocorre quando a tensão aplicada nos cabos de ligação entre o padrão e o DMM é alta, o que ocasiona cargas positivas e negativas nestes. Deste modo, quando a tensão é removida um pequeno fluxo de corrente é gerado nesses cabos, na prática essa não pode ser avaliada podendo levar até alguns minutos para ser completamente dissipada. Esse efeito não é significativo quando a tensão aplicada entre os cabos for de apenas alguns volts (KEITHLEY, 2001).