

LUIZ MACOTO OGINO

**A CADEIA DE RASTREABILIDADE DA UNIDADE DE CAPACITÂNCIA,
“farad”, NO INMETRO: Identificação das variáveis que mais influenciam no
processo da rastreabilidade.**

Dissertação apresentada ao Curso de
Mestrado Profissional em Sistemas de
Gestão da Universidade Federal
Fluminense como requisito parcial para
obtenção do Grau de Mestre em Sistemas
de Gestão. Área de Concentração: Sistema
de Gestão pela Qualidade Total

Orientador: Prof. Dr. João Alberto Neves dos Santos

Niterói

2004

LUIZ MACOTO OGINO

**A CADEIA DE RASTREABILIDADE DA UNIDADE DE CAPACITÂNCIA,
“farad”, NO INMETRO: Identificação das variáveis que mais influenciam no
processo da rastreabilidade.**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Profissional em Sistemas de Gestão da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Sistemas de Gestão. Área de Concentração: Sistema de Gestão pela Qualidade Total.

Aprovada em de de 2004

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. João Alberto Neves dos Santos
Universidade Federal Fluminense

Prof. Dr. José Geraldo Telles Ribeiro
Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento do Exército

Prof. Dr. Jorge Claudio da Silva Pinto
Universidade do Sul de Santa Catarina - UNISUL

Niterói
2004

À minha esposa Suely Akemi, e aos meus filhos Eiji, Liana e Márcio pelo incentivo, paciência e compreensão.

Aos meus pais, Kazumi e Midori, a quem devo a minha formação. Dedico em especial ao meu pai que sempre desejou seguir uma carreira acadêmica, porém, a vida não lhe permitiu.

Ao meu irmão Tsuyoshi e em especial à minha irmã Clara Yumi que sempre me apoiou nos meus estudos.

E, aos meus irmãos Eiko e Takashi que não estão mais presentes.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor João Alberto Neves dos Santos, pela orientação, atenção e incentivo.

Ao Inmetro por ter possibilitado a realização deste trabalho, e em especial ao Eng. Luiz Carlos dos Santos – Chefe da Divisão de Metrologia Elétrica.

Ao amigo e Professor, Dr. Endre Toth, pela formação em metrologia elétrica.

Ao Gregory, João Gilberto e aos meus colegas da Diele que de alguma forma contribuíram com este trabalho.

SUMÁRIO

Capítulo 1 – INTRODUÇÃO, p.16

1.1 O TEMA, p. 16

1.2 -O PROBLEMA – DIFICULDADES NA EXECUÇÃO DA RASTREABILIDADE DA UNIDADE DE CAPACITÂNCIA COM CONFIABILIDADE METROLÓGICA, p. 19

1.3 - A JUSTIFICATIVA, p. 20

1.4 - OBJETIVOS A SEREM ALCANÇADOS, p. 20

1.5 - QUESTÕES A SEREM RESPONDIDAS, p. 20

1.6 – DELIMITAÇÃO DO ESTUDO, p. 21

1.7 - ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO, p. 21

CAPÍTULO 2 - PRESSUPOSTOS TEÓRICOS, p. 23

2.1 – METROLOGIA, p. 25

2.2 - CONCEITO DE MEDIÇÃO, p. 25

2.2.1 – Histórico, p.25

2.2.2 – O que é medição, p. 31

2.2.3 – Sistema Internacional de Unidades – SI, p.32

2.2.4 – As Grandezas Elétricas, p. 35

2.3 – CALIBRAÇÃO, p. 38

2.3.1 – Definição, p.38

2.3.2 – Método de Calibração, p. 39

2.3.2.1 – Método da Medição Direta, p.39

2.3.2.2 – Método da Medição por Comparação, p. 39

2.3.2.3 – Método da Medição por Substituição, p. 40

2.3.2.4 – Método Indireto, p. 40

2.4 – INCERTEZA DE MEDIÇÃO, p. 41

2.4.1 – Definição, p. 41

2.4.2 – Avaliação da Incerteza de Medição, p. 42

2.4.3 – Avaliação Tipo A da Incerteza Padrão, p. 43

2.4.4 – Avaliação do Tipo B da Incerteza Padrão, p. 44

2.4.5 – Cálculo da incerteza padrão da estimativa de saída, p. 45

2.4.5.1 – Cálculo da Incerteza Expandida de Medição, p.46

2.5 – CONCEITO DE RASTREABILIDADE, p. 47

2.6 – A GRANDEZA FÍSICA “CAPACITÂNCIA”, p. 48

2.6.1 – Definição da Unidade, p. 49

2.6.2 – Realização do “farad”, p. 49

2.6.3 – Reprodução, p.51

2.7 – MANUTENÇÃO DA UNIDADE, p. 54

2.7.1 – Introdução, p. 54

2.7.2 – Método dos Mínimos Quadrados, p. 56

2.7.2.1 – Descrição do Método, p. 56

2.7.2.2 – As Equações, p. 57

2.7.2.3 – Método da Comparação, p. 59

2.7.2.4 – Comparação de um padrão com um banco de padrões, p. 62

2.8 – CAPACITOR, p. 63

2.8.1 – Capacitor Padrão, p. 64

2.8.1.1 – Característica de um Capacitor, p. 64

2.8.1.2 – Alguns tipos de Capacitores Padrão, p. 66

2.8.2 – Ponte de Medição de Impedância, p. 67

2.8.2.1 – Alguns tipos de Pontes de Capacitância, p. 67

**2.9 – A CADEIA DE RASTREABILIDADE DA UNIDADE DE CAPACITÂNCIA,
p. 68**

2.10 – CONFIABILIDADE METROLÓGICA, p. 69

CAPÍTULO 3 – MÉTODO DE PESQUISA, p. 70

3.1 FASES DA PESQUISA E SEUS RESULTADOS, p. 70

3.2 RESUMO DAS FASES DA PESQUISA, p. 73

3.3 A LIMITAÇÕES DA PESQUISA, p. 75

**CAPÍTULO 4 - IDENTIFICAÇÃO DAS VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM O
PROBLEMA, p. 76**

INTRODUÇÃO, p. 76

4.1 DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE RASTREABILIDADE, p. 76

**4.2 O PROCESSO DA REALIZAÇÃO DA RASTREABILIDADE DA UNIDADE
FARAD NO LACIN, p. 78**

**4.3- DESCRIÇÃO DAS VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM NO PROCESSO DA
RASTREABILIDADE, p. 79**

4.3.1 – Localização, p. 80

4.3.2 – Condições Ambientais, p.81

4.3.2.1 – Temperatura, p. 81

4.3.2.2 – Umidade Relativa do ar, p. 86

4.3.3 – Padrões de Referência, p. 87

4.3.3.1 -- Estudo da Estabilidade dos Padrões, p. 88

4.3.3.1.1 – Metodologia, p. 88

4.3.3.1.2 – Resultados, p. 89

4.3.3.1.3 – Conclusão, p. 95

4.3.4 – Transporte, p. 95

4.3.5 - Método de calibração e Determinação de Incerteza de Medição, p. 96

4.3.5.1 - Transferência da Unidade do BIPM para o INMETRO, p. 96

4.3.5.2 - Manutenção da Unidade de Capacitância no Lacin, p. 100

4.3.6 – Comparação Interlaboratorial, p. 103

4.3.7 - Recursos Humanos, p. 104

CAPÍTULO 5 - ANÁLISE DO NÍVEL ATUAL DE CONFIABILIDADE METROLÓGICA DO LABORATÓRIO. UMA APLICAÇÃO PRÁTICA, p. 110

INTRODUÇÃO, p. 110

5.1 – TRANSPORTE, p. 110

5.2 - RESULTADOS DAS CALIBRAÇÕES DOS CAPACITORES NO BIPM, p. 112

5.3 – A TRANSFERÊNCIA, p. 113

5.3.1 - Transferência da unidade “farad” para o Banco de 10 pF, p. 113

5.3.2 - Transferência da unidade farad para o Banco de 100 pF, p. 117

5.3.3 - Transferência da unidade farad para o Banco de 1000 pF, p. 119

5.4 - A MANUTENÇÃO DA UNIDADE DE CAPACITÂNCIA “FARAD”, p. 122

5.5 - A COMPARAÇÃO INTERLABORATORIAL, p. 126

5.5.1 – Metodologia, p.127

5.5.2 – Resultados, p. 127

5.5.3 – Conclusão, p. 128

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES, p. 129

6.1 - QUANTO AOS OBJETIVOS, p. 129

6.2 - QUANTO Á SOLUÇÃO DO PROBLEMA PROPOSTO: “DIFICULDADES NA EXECUÇÃO DA RASTREABILIDADE DA UNIDADE DE CAPACITÂNCIA COM CONFIABILIDADE METROLÓGICA”, p. 130

6.3 - SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS, p. 130

6.4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS, p. 131

CAPÍTULO 7 – REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA, p. 132

7.1 - OBRAS CITADAS, p. 132

7.2 - OBRAS CONSULTADAS, p. 134

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 - Unidades de Base do SI,

Quadro 01 - Unidades do SI de Base

Quadro 02 – Unidades SI derivadas

Figura 02 – Método da Comparação

Figura 03 – Método da substituição

Figura 04 – Método Indireto

Quadro 3 – Fatores de abrangência k para diferentes graus de liberdade ν_{eff}

Figura 05: Operações Básicas da Metrologia

Figura 06: Capacitor Calculável

Figura 07: Sistema de aterramento para reduzir os efeitos de borda

Figura 08: Série de medições que ligam a resistência Hall quantizada ao banco de padrões usado para manter e disseminar a unidade de capacitância.

Figura 09: Sistema de Medição

Figura 10: Comparação entre os padrões P_1 e P_2

Figura 11: Matriz 29M

Figura 12: Modelo de Capacitor

Figura 13: Esquema de um Capacitor Padrão

Figura 14: Ponte de Impedância

Figura 15: Rastreabilidade do “farad ao SI”

QUADRO 3.1 – Resumo das Fases da Pesquisa

Figura 4.1 – Cadeia de Rastreabilidade

Figura - 4.2 – Diagrama de rastreabilidade do Lacin

Figura 4.3 – Fluxo do Processo de Rastreabilidade do Lacin

Figura 4.4 – Variáveis que influenciam no Processo da rastreabilidade

Figura 4.5 – Vista do campus do Inmetro com o complexo de Laboratórios da Diretoria de Metrologia Científica e Industrial

Figura 4.6 – Divisão de Metrologia Elétrica

Figura 4.7 - Vistas do Prédio da Divisão de Metrologia Elétrica

Figura 4.8 – Recipiente Termostático

Tabela 4.1 Relação dos Equipamentos utilizados para medir temperatura

Tabela 4.2 Temperatura Interna do recipiente

Tabela 4.3 – Influência da variável $V_{\Delta T}$ no valor da capacitância

Figura 4.9 - Visualização do Conceito de estabilidade

Tabela 4.4 - Histórico dos Capacitores Padrão de 10 pF na frequência de 1 kHz

Tabela 4.5 - Histórico dos Capacitores Padrão de 100 pF na frequência de 1 kHz

Tabela 4.6 - Histórico dos Capacitores Padrão de 1000 pF na frequência de 1 kHz

Tabela 4.7 - Estabilidade Temporal dos Capacitores de 10 pF

Tabela 4.8 - Estabilidade Temporal dos Capacitores de 100 pF

Tabela 4.9- Estabilidade Temporal dos Capacitores de 1000 pF

Figura 4.10 – Diagrama da Calibração

Tabela 4.10 – Determinação da incerteza

Figura 4.11 – Esquema da realização da Manutenção da unidade farad

Tabela 4.11 – Determinação da incerteza

Tabela 4.12 - Descrição da qualificação e função

Figura 4.12 - Diagrama de causa e efeito

Figura 5.1 – Fluxo do Processo de Rastreabilidade do Lacin

Tabela 5.1.1 – Resultado do transporte do Capacitor Itinerante de 10 pF.

Tabela 5.1.2 – Resultado do transporte do Capacitor Itinerante de 100 pF

Tabela 5.2.1 – Resultados das Calibrações no BIPM

Tabela 5.3.1.1 - Resultados das comparações entre o capacitor Itinerante AH11A e os capacitores do Banco de 10 pF

Tabela 5.3.1.2 – Temperatura do Banco 10 pF durante a calibração.

Tabela 5.3.1.3 – Valores dos capacitores do Banco de 10 pF à temperatura t

Tabela 5.3.1.4 – Valores dos capacitores do Banco de 10 pF à temperatura 23 °C

Tabela 5.3.1.5 - Planilha de Cálculo de Incerteza para a transferência de 10 pF

Tabela 5.3.1.6 – A variável de influência da temperatura

Tabela 5.3.1.7 - Valores de 10 pF após a transferência em 2003

Tabela 5.3.2.1 - Resultados das comparações entre o capacitor Itinerante AH11A e os capacitores do Banco de 100 pF

Tabela 5.3.2.2 – Temperatura do Banco de 100 pF durante a calibração.

Tabela 5.3.2.3 – Valores dos capacitores do Banco de 100 pF à temperatura t

Tabela 5.3.2.4 – Valores dos capacitores do Banco de 100 pF à temperatura 23 °C

Tabela 5.3.2.5 - Valores de 10 pF após a transferência em 2003

Tabela 5.3.3.1 - Resultados das comparações entre o capacitor Itinerante de 100 pF da AH11A e os capacitores do Banco de 1000 pF

Tabela 5.3.3.2 – Temperatura do Banco de 1000 pF durante a calibração.

Tabela 5.3.3.3 – Valores de $C_X(t)$ obtidos pela relação 1:10

Tabela 5.3.3.4 – Valores de $C_X(t)$ obtidos pela relação 10:1

Tabela 5.3.3.5 – Valores de $C_X(23\text{ °C})$ obtidos pela relação 1:10

Tabela 5.3.3.6 – Valores de $C_X(23\text{ °C})$ obtidos pela relação 10:1

Tabela 5.3.3.7 – Valores de $\bar{C}_X(23\text{ °C})$

Tabela 5.3.3.8 - Valores de 1000 pF após a transferência em 2003

Tabela 5.4.1 – Resultados das Comparações – 10 pF e a Temperatura de Medição

Tabela 5.4.2 – Os valores dos capacitores à temperatura de 22,3 °C

Tabela 5.4.3 - Resultados das Comparações – 10 pF e a temperatura de Medição, sem repetições.

Tabela 5.4.4 – Valores dos capacitores à temperatura de 23 °C

Tabela 5.4.5 – Componentes da incerteza de medição do Capacitor A

Tabela 5.4.6 – Os resultados de u_c , u_{eff} e U

Tabela 5.4.7 – Resultado da Manutenção da unidade

Tabela 5.5.2.1 – Resultados das medições com a Ponte AH2700A

Tabela 5.5.2.2 – Resultados das Comparações com os Bancos do Lacin

Figura 6.3 – Bases Quânticas para a definição da unidade de capacitância

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BIPM – Bureau International des Poids et Mesures.

BNM – Bureau National des Metrologie.

CGPM – Conferência Geral de Pesos e Medidas.

CNI – Confederação Nacional da Indústria.

Dimci – Diretoria de Metrologia Científica e Industrial.

En – Erro Normalizado.

F – farad, unidade de capacitância no SI.

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia Normalização e Qualidade Industrial.

h – Constante de Plank.

k – Fator de Abrangência.

Lacin – Laboratório de Capacitância e Indutância.

MRA – “Mutual Recognition Arrangement” – Acordo de Reconhecimento Mútuo.

NIST – National Institute of Standards and Technology

NMI – “National Metrology Institute”, Instituto Nacional de Metrologia.

NPL – National Physical Laboratory.

PTB – Physikalisch-Technische Bundesanstalt.

QHE – “Quantum Hall Effect” – Efeito Hall Quântico.

RBC - Rede Brasileira de Calibração.]

R_k – Constante de Von Klitzing.

SENAI – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial.

SI – Sistema Internacional de Unidades.

SIM - Sistema Interamericano de Metrologia.

VIM – Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e gerais de Metrologia.

VVc – Valor Verdadeiro Convencional.

RESUMO

O principal objetivo desta pesquisa foi determinar as variáveis que influenciam no processo da realização da rastreabilidade da unidade de capacitância “farad” com confiabilidade metrológica. Para cada variável determinada, foram estabelecidas orientações necessárias e ações que busquem minimizar seus efeitos. Na impossibilidade de minimizá-los, essas influências foram quantificadas através da determinação das incertezas de medição em todo processo, desde a calibração dos padrões de referência no BIPM até a manutenção da unidade de capacitância no laboratório. Um dos indicadores de sucesso desta pesquisa será o resultado obtido da comparação interlaboratorial de padrão de capacitância, que ocorrerá em setembro de 2004 promovido pelo Sistema Interamericano de Metrologia – SIM, que será coordenada pelo National Institute of Standards and Technology - NIST/USA e supervisionado pelo BIPM. A dissertação foi estruturada em três partes fundamentais. Iniciou-se com o levantamento dos pressupostos teóricos que fundamentaram toda a pesquisa. Esta fase foi elaborada consultando-se livros, artigos científicos na área de metrologia geral e elétrica e, os anais de Congressos tais como, CEPEM, METROLOGIA, e SEMETRO. Na fase seguinte foram identificadas todas as variáveis que influenciam no processo de rastreabilidade. Finalmente, fez-se uma análise do nível de confiabilidade metrológica do processo de rastreabilidade da unidade de capacitância “farad”, no Laboratório de Capacitância e Indutância – Lacin do INMETRO.

Palavras Chaves: Rastreabilidade, Capacitância, Manutenção da unidade e Confiabilidade Metrológica

ABSTRACT

The main objective of this research is to determine the variables that act on the accomplishment of the traceability of capacitance unity “farad” with metrological reliability. To each particular variable, specific orientations were established and ways to reduce their effects were searched. When it was impossible to minimize them, these influences were quantified by determining the measurement uncertainty throughout the process - from the calibration of the reference standards at BIPM to the maintenance of the capacitance unit in the laboratory. The desired results of this research will be seen in the interlaboratorial comparison of Standard capacitor that will take place in September 2004 supported by Interamericam Metrological System (Sistema Interamericano de Metrologia) – SIM, organized by National Institute of Standards and Technology - NIST/USA and supervised by BIPM. This study has three main parts. It starts searching theoretical reference to validate this research. In this first step books, scientific papers on general and electrical metrology, CEPEM, METROLOGIA, e SEMETRO annals were searched. In the next step all variables that act on the traceability process were identified. Finally, the analysis of the metrological reliability level of the traceability process was done at Capacitance and Inductance Laboratory – Lacin of Inmetro.

Keys words: Traceability, Capacitance, Unity maintenance, metrological reliability

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 O TEMA

A expectativa das pessoas pela alta qualidade dos produtos e serviços aumenta dia após dia. Isto significa que a garantia da qualidade dos produtos e serviços é importante para todas as empresas, especialmente no que tange ao fortalecimento da sua posição econômica no mercado nacional, ou mesmo internacional.

A qualidade, cujos valores que a compõe variam com o tempo, para um consumidor pode significar: facilidade de uso; durabilidade e resistência; boa aparência; disponibilidade de recursos funcionais; facilidade de manutenção; assistência satisfatória; baixo custo operacional; custo de aquisição competitivo, em relação ao mercado; segurança e imagem do fornecedor.

A necessidade de alta qualidade num produto significa que a empresa precisa ter um sistema da garantia da qualidade adequada. Os requisitos para o sistema da garantia da qualidade são, normalmente, baseados nas normas da série NBR ISO 9000. O controle, a calibração e manutenção dos instrumentos de teste e medição são partes fundamentais nessa norma, pois estes visam a garantir que as medições realizadas nos ensaios e testes estejam corretas em todos os processos de produção. Para este fim, todos os resultados de medições precisam ter confiabilidade e rastreabilidade aos padrões de referência nacional. Estes dois conceitos, a confiabilidade e a rastreabilidade das medições, são fundamentais da metrologia.

A Metrologia é a ciência que abrange todos os aspectos teóricos e práticos relativos às medições, qualquer que seja a incerteza, em qualquer campo da ciência ou tecnologia. Por sua vez, a Metrologia Científica e Industrial é uma ferramenta fundamental no

crescimento e inovação tecnológica, promovendo a competitividade e criando um ambiente favorável ao desenvolvimento científico e industrial em todo e qualquer país.

Calibrar um instrumento de medir significa determinar o desvio da indicação do instrumento em relação ao valor verdadeiro convencional do mensurando, ou determinar o valor verdadeiro convencional de uma medida materializada (padrão de referência).

A rastreabilidade é um processo por meio do qual a indicação de um instrumento de medir ou uma medida materializada (padrão de referência) pode ser comparada com um padrão nacional de um mensurando em questão, através de uma cadeia contínua de comparações, todas tendo incertezas estabelecidas.

Os padrões nacionais e internacionais são normalmente mantidos em Institutos Nacionais de Metrologia (com a sigla em inglês - NMI), como o Inmetro, no Brasil, o PTB, na Alemanha, o NIST, nos Estados Unidos da América. Os NMI's estão no topo da hierarquia metrológica em um país, sendo os responsáveis pela disseminação das unidades das grandezas físicas aos usuários, sejam elas entidades públicas, científicas, empresas privadas, ou setores industriais.

Quando o NMI tem condições de atestar a unidade no Sistema Internacional de Unidades, para uma determinada grandeza, o padrão nacional será idêntico ao padrão primário que realiza a unidade. Se o NMI não tiver essa condição, ele precisa garantir que as suas medições são rastreáveis ao padrão primário, calibrando seus padrões em um país que realize a unidade dessa grandeza.

Para as empresas, a rastreabilidade de medição a um padrão nacional por meio de uma calibração é necessária devido à crescente demanda nacional e internacional das partes manufaturadas intercambiáveis, ou seja, as empresas fornecedoras e compradores que instalam-no em outras partes precisam medir com a mesma unidade de medição.

Para desenvolver as políticas e executar as atividades relacionadas a essas necessidades industriais, em 11 de dezembro de 1973, foi criado pelo artigo 4º da Lei nº 5966 o Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – Inmetro, com sede em Brasília. Dentre algumas de suas finalidades destacam-se:

- manter e conservar os padrões das unidades de medida, assim como implantar e ***manter a cadeia de rastreabilidade dos padrões das unidades de medida no País***, de forma a torná-las harmônica internamente e compatível no plano internacional, visando,

em nível primário, à sua aceitação universal e, em nível secundário, à sua utilização como suporte ao setor produtivo, com vistas à qualidade de bens e serviços;

- fortalecer a participação do País nas atividades internacionais relacionadas com metrologia e qualidade, além de promover o intercâmbio com entidades e organismos estrangeiros e internacionais;

- planejar e executar as atividades de credenciamento de laboratórios de calibração e de ensaios, de provedores de ensaios de proficiência, de organismos de certificação, de inspeção, de treinamento e de outros, necessários ao desenvolvimento da infra-estrutura de serviços tecnológicos no País.

Neste contexto, foi criada, dentro do Inmetro, a Diretoria de Metrologia Científica e Industrial – Dimci (art 67), a quem compete planejar, dirigir, coordenar e supervisionar a execução das atividades no âmbito da metrologia básica e, especificamente:

- realizar, reproduzir, manter, conservar e ***rastrear os padrões nacionais das unidades de medida;***

- ***referenciar, direta ou indiretamente, os padrões nacionais aos internacionais;***

- disseminar as unidades do Sistema Internacional de Unidades - SI, os seus múltiplos e submúltiplos, por intermédio de metodologias metrológicas adequadas;

- ***prover rastreabilidade metrológica aos padrões dos diversos laboratórios do País;***

- desenvolver pesquisas científicas e tecnológicas relativas à metrologia;

- prestar apoio às áreas de metrologia legal, qualidade e credenciamento, no âmbito da metrologia básica;

- participar dos fóruns internacionais e regionais relacionados às atividades de metrologia científica e industrial;

- coordenar as ações de reconhecimento internacionais relacionadas à padronização das unidades do SI;

- disseminar os conhecimentos da ciência metrológica para a sociedade.

A Dimci, então, teve a suas áreas-fim estruturadas em diversos laboratórios. O Laboratório de Capacitância e Indutância – Lacin, onde a dissertação proposta será

desenvolvida, é um dos laboratórios que foi criado para executar as atividades da competência da Dimci nas Grandezas Físicas Capacitância e Indutância.

Os Institutos Nacionais de Metrologia (NMI), dos países considerados mais desenvolvidos tecnologicamente, realizam a unidade de capacitância “farad” por meio do Capacitor Calculável Thompson Lampard. A grande maioria dos NMIs está atualmente reproduzindo (conservando) essa unidade através da rastreabilidade à unidade de resistência “ohm” obtida pelo Sistema Resistance Quantum Hall Effect, que relaciona o “ohm” à (h) (constante de Plank), à carga elétrica elementar (e), à permeabilidade do vácuo e à velocidade da luz no vácuo, estas duas últimas constantes são exatamente definidas no SI. O Inmetro, por meio do Lacin, vem desenvolvendo esse sistema, porém devido ao alto custo o seu término está previsto para não antes de oito anos.

Na busca de rastreabilidade a padrões primários de unidades relativas à grandeza capacitância, o Lacin/Inmetro tem recorrido ao Bureau Internacional des Poids e Mesures – BIPM, que é a instituição internacional responsável pela realização e disseminação das unidades físicas para os NMIs de todos os países do mundo, para calibrar seus capacitores padrão.

1.2 - O PROBLEMA–DIFICULDADES NA EXECUÇÃO DA RASTREABILIDADE DA UNIDADE DE CAPACITÂNCIA COM CONFIABILIDADE METROLÓGICA.

O processo de rastreabilidade no Lacin é constituído pela calibração dos capacitores-padrão de 1 pF, 10 pF e 100 pF no BIPM, pela realização da transferência da unidade aos padrões do laboratório, pela manutenção da unidade pela realização da escala de capacitância e pela calibração dos instrumentos de referência. Nessa seqüência das atividades, existem diversas variáveis determinantes que impactam negativamente, de maneira direta, a confiabilidade das medições realizadas pelo laboratório. Essas variáveis, que estão relacionadas na norma NBR ISO IEC 17025, incluem contribuições de fatores humanos, de localização e condições ambientais, de métodos de calibração, dos padrões de referência, além da rastreabilidade da medição.

O problema reside na determinação de até que ponto cada uma dessas variáveis influenciam na confiabilidade das medições e, posteriormente, na determinação das ações que busquem minimizar seus efeitos, de forma a atender, com consistência, os requisitos e que contribuam para competência técnica do laboratório.

1.3 - A JUSTIFICATIVA

Os NMIs filiados ao BIPM, inclusive o Inmetro, estarão, num futuro próximo, assinando o Acordo de Reconhecimento Mútuo (MRA - sigla em inglês do acordo), que exigirá desses institutos a competência técnica na execução dos serviços de calibração prestados aos clientes. Essa competência será evidenciada por intermédio do atendimento aos requisitos da norma NBR ISO IEC 17025. Um dos principais requisitos é a rastreabilidade das medições ou rastreabilidade das unidades físicas aos padrões internacionais.

1.4 - OBJETIVOS A SEREM ALCANÇADOS

O principal objetivo desta pesquisa será determinar as variáveis que influenciam no processo da realização da rastreabilidade da unidade de capacitância “farad” com confiabilidade metrológica. Para cada variável determinada deverão ser estabelecidas orientações necessárias e ações que busquem minimizar seus efeitos. Na impossibilidade de minimizá-los, essas influências deverão ser quantificadas através da determinação das incertezas de medição em todo processo, desde a calibração dos padrões de referência no BIPM até a manutenção da unidade de capacitância no laboratório.

Um dos indicadores de sucesso desta pesquisa será o resultado obtido da comparação interlaboratorial de padrão de capacitância, que ocorrerá em setembro de 2004 promovido pelo Sistema Interamericano de Metrologia – SIM, que será coordenada pelo National Institute of Standards and Technology - NIST/USA e supervisionado pelo BIPM.

O principal indicador, porém, será o reconhecimento mútuo de competência entre o Lacin, na área de capacitância, com os principais laboratórios metrológicos dos países denominados desenvolvidos, através do acordo internacional MRA.

1.5 QUESTÕES A SEREM RESPONDIDAS

Para o desenvolvimento do Tema algumas perguntas devem ser levadas em consideração:

- O que é a metrologia?
- Qual a definição da unidade de capacitância “farad”?
- Como se realiza e como se reproduz a unidade “farad”?
- Como se realiza a manutenção da unidade “farad” num NMI?

- Qual o significado do conceito de rastreabilidade de uma unidade física de medição?
- Qual o fluxograma do processo que atualmente está sendo adotado?
- Como realizar a transferência da unidade de capacitância do padrão calibrado aos padrões mantidos no laboratório?
- Como determinar a incerteza da transferência?
- Como realizar a manutenção da unidade no laboratório?
- Como determinar a incerteza na manutenção da unidade?
- Como está sendo garantida a confiabilidade metrológica no processo atual de rastreabilidade da unidade de capacitância a um padrão absoluto internacional?
- Como está sendo realizada a rastreabilidade da unidade de capacitância?
- Como está sendo garantida a confiabilidade no processo de rastreabilidade?
- Quais as variáveis que produzem efeitos negativos no processo e que influenciam na confiabilidade das medições?
- Como reduzir ou eliminar essas influências?
- Como garantir a confiabilidade metrológica no processo de rastreabilidade da unidade de capacitância a um padrão absoluto internacional?

1.6 – DELIMITAÇÃO DO ESTUDO

O estudo realizado restringiu-se a rastreabilidade da unidade de capacitância até a calibração dos capacitores padrão que compõem os Bancos pertencentes ao Laboratório de Capacitância e Indutância – Lacin do Instituto Nacional de Metrologia Normalização e Qualidade Industrial – INMETRO. A frequência da tensão /corrente elétrica aplicada nos instrumentos de medição de capacitores padrão está padronizada em 1000 Hz nos Institutos Nacionais de Metrologia (NMI – National Metrology Institute), por esse motivo as medições foram feitas nesta frequência.

Nesta dissertação não será estudada a realização da escala da unidade, embora já esteja sendo realizada no laboratório, e nem a disseminação da unidade para os laboratórios da Rede Brasileira de Calibração.

1.7 - ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação foi organizada em capítulos. O Capítulo 1, a introdução, tratou de descrever sobre o Tema, o Problema, a Justificativa, os Objetivos, as Questões a serem respondidas e as limitações da dissertação.

O Capítulo 2 trata dos fundamentos teóricos necessários para desenvolver a pesquisa. Através de um pequeno relato da história mostrou-se a importância da medição, da padronização internacional e do surgimento do Sistema Internacional de Unidades, o SI. Foram descritos os métodos de calibração e determinação de incerteza de medição. Ainda neste capítulo foi explicado sobre o que é um capacitor, sua unidade, sua realização, disseminação e manutenção.

No Capítulo 3 foi tratado sobre a metodologia utilizada para o desenvolvimento da dissertação, sobre o tipo de pesquisa e a sua limitação.

No Capítulo 4 foi feita uma descrição sobre a pesquisa para identificar as variáveis que influenciam no processo de rastreabilidade.

No Capítulo 5 fez-se uma análise do nível de confiabilidade metrológica no processo de rastreabilidade da unidade de capacitância “farad” no Lacin.

No Capítulo 6 foi feita uma avaliação do trabalho realizado, apresentando conclusões, recomendações e sugerindo possíveis tópicos para trabalhos futuros.

No Capítulo 7 são mencionadas as referências bibliográficas utilizadas para a realização da pesquisa.

CAPÍTULO 2

PRESSUPOSTOS TEÓRICOS.

INTRODUÇÃO

A pesquisa desenvolvida gira em torno do conceito de confiabilidade metrológica no processo de rastreabilidade das medições. Para o melhor desenvolvimento da pesquisa, é necessária a compreensão dos conceitos tais como: medição, metrologia, confiabilidade metrológica e rastreabilidade.

Segundo Lord Kelvin “Se você medir aquilo sobre o que você fala e expressar por um número, você sabe algo sobre o assunto; mas se você não puder medi-lo, seu conhecimento é pouco ou insatisfatório”, verificou-se que seria interessante fazer um histórico sobre medição. Existem inúmeros livros que tratam do assunto, mas um dos capítulos do livro “Física Auto-Instrutiva” (Saad, 1974) desenvolve, de uma maneira clara e objetiva, a evolução das medidas realizadas desde o homem pré-histórico até os tempos atuais.

Pelo próprio conceito, a unidade de medida é a base de uma medição. Como é apresentado no histórico, foi necessária a uniformização das unidades de medição no mundo devido ao comércio internacional. A Convenção do Metro, assinada em 1875, em Paris, veio a elaborar o Sistema Internacional de Unidades. Um resumo do SI está descrito neste trabalho, baseado no livro com o mesmo nome, com o objetivo de definir a unidades elétricas que serão utilizadas na evolução da dissertação.

O conceito de calibração foi definido de acordo com o Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais da Metrologia – VIM.

Pouco se encontra, ou não existe descrição de métodos de medição na área de metrologia elétrica, de uma maneira organizada. Foi realizado um resumo baseado nas experiências de um metrologista.

“Um homem com um relógio sabe que horas são. Um homem com dois já não tem certeza (Theisen, 1997, p.21)”, a frase mostra que, para uma determinação exata de uma medição, não basta medir, há a necessidade de se determinar a incerteza de medição. Não se pretende nesta dissertação um tratado sobre determinação de incerteza. Serão desenvolvidos apenas alguns conceitos necessários para determinar os fatores que poderão aumentar a confiabilidade das medições que serão realizadas no estudo de caso. Foram tomados como referência os livros EA-4 (1999) e a ISOGUM (1997), que são dois “guias” que todos os metrologistas do mundo inteiro usam.

O conceito de rastreabilidade é definido de acordo com o VIM (2000), e o processo de rastreabilidade está descrito de acordo com Kind e Quinn (1995).

Para a aplicação do processo proposto por eles, é necessário inicialmente definir a grandeza física capacitância, cuja rastreabilidade é o alvo desta pesquisa. Seguindo o fluxo da cadeia, é descrita a realização da unidade de capacitância “farad” pelo Capacitor Thompson – Lampard, descrito no livro “Fluke – Calibration: Philosophy and Practice(1994)”. A reprodução da unidade farad é realizada rastreando-o à unidade de resistência “ohm”, obtida pelo Efeito Hall Quântico, e definida em função das constantes de Plank (h) e da carga elétrica (e). O processo é descrito de acordo com o artigo de Kyriasys (2000).

A conservação ou a manutenção da unidade “farad” é baseada numa nota técnica elaborada por Endre Toth, perito da Universidade de Budapest, que tomou como referência o artigo de Ihlenfeld – Maintenance of Measuring Electrical Units (1989), que desenvolve o processo de conservação pelo Método dos Mínimos Quadrados.

É feita uma descrição de uma série de padrões de capacitância e pontes de medição que serão utilizados no estudo de caso. As informações foram retiradas de catálogos dos equipamentos utilizados no Laboratório de Capacitância e Indutância do Inmetro.

Finalmente, quanto à confiabilidade metrológica da rastreabilidade, ela terá como referencial a norma NBR ISO / IEC 17025 (2001).

2.1 METROLOGIA

O que é metrologia?

Segundo VIM (Inmetro, 2000, p.23), metrologia é a ciência da medição. A metrologia abrange todos os aspectos teóricos e práticos relativos às medições, qualquer que seja a incerteza, em quaisquer campos da ciência ou da tecnologia.

No início da história, sabia-se que a harmonização das medições era um pré-requisito para o desenvolvimento do comércio, tecnologia e ciência. A Convenção do Metro de 1875 foi um dos primeiros tratados intergovernamentais, cujos objetivos eram relevantes praticamente para todos os países.

A metrologia tornou-se uma parte essencial na infra – estrutura nacional de todos os países. No decorrer do final do século 19 e no início do século 20, os laboratórios governamentais especiais, hoje chamados de Institutos Nacionais de Metrologia, os NMI (da sigla em inglês), foram construídos e encarregados em operar no que agora é chamado de Sistema Nacional de Medição.

2.2 CONCEITO DE MEDIÇÃO

2.2.1 “Histórico (Saad, 1974, p.44 - 48)

Idade Antiga

Em nossa civilização atual, os processos de medição são bastante complexos, a fim de satisfazerem às necessidades da ciência e da tecnologia. Em épocas remotas, o homem utilizou processos simples, suficientes para a sua técnica primitiva. Mas quando começou a

medir? Provavelmente quando ainda nem existia a comunicação entre as pessoas como hoje conhecemos, pois poderia medir ou comparar um peixe com outro e saber qual o maior ou menor. Também seria do seu conhecimento que uma certa quantidade de alimento saciava sua fome. Obviamente, eram maneiras intuitivas de medir.

A partir do momento em que o homem passou a viver em grupos e à proporção que esses aglomerados cresciam, a necessidade de medir aumentava ainda mais. As formas utilizadas para medir as grandezas eram bastante simples: usavam partes do próprio corpo, como o comprimento do pé, a largura da mão ou a grossura do dedo, o palmo e a passada. Utilizavam ainda uma vara ou um bastão.

Com o surgimento das primeiras civilizações, tais processos não mais satisfaziam às necessidades dos homens, pois os mesmos sabiam constatar as diferenças daquelas partes para cada indivíduo. As construções de casas e navios, a divisão de terras e o comércio com outros povos exigiam medidas padronizadas, que fossem as mesmas em qualquer lugar. Assim, um mercador de tecidos da Babilônia poderia vender sua mercadoria em Jerusalém, usando uma vara padrão de tamanho aproximado ao adotado nos países.

Os povos antigos, os egípcios, os babilônios, os assírios, os chineses, os persas e os gregos, possuíam padrões diferentes para o comprimento. A unidade de comprimento dos babilônios era o dedo (aproximadamente 16 milímetros). Usavam também o cúbito, que equivalia a 30 dedos. O pé e a polegada foram, em geral, para esses povos, as unidades de referência.

É interessante ressaltar que, para L.A. Sanches, os egípcios possuíam uma estranha medida denominada “polegada piramidal”, encontrada na grande pirâmide de Quéops, junto ao Nilo, construída a 3 ou 4 mil A.C. Ao ser estudada, concluíram que o diâmetro da Terra mede um bilhão e meio destas polegadas. O cálculo do perímetro da base da pirâmide resulta 365 242 polegadas, resultado cujos algarismos exprimem exatamente o número de dias do ano solar (365,242 dias).

O homem também precisou pesar, isto é, comparar massa. Massa é a quantidade de matéria de um corpo, ou em termos mais físicos, é a resistência que ele oferece a uma força aplicada. O peso pode variar, dependendo das condições, e a massa é invariante no estado de repouso.

Nos primeiros tempos, o homem comparava a massa de dois corpos equilibrando-os um em cada mão. Até que surgiu a primeira máquina de comparação: uma vara suspensa no meio por uma corda. Os objetos eram pendurados nas suas extremidades e, se houvesse o equilíbrio, ou seja, se a vara ficasse na horizontal, eles possuíam a mesma massa. Assim, os povos antigos padronizavam centenas de diferentes pesos e medidas para atender às necessidades de suas civilizações.

O grão de trigo tirado do meio da espiga, provavelmente foi o primeiro elemento padrão de peso. Dos sistemas adotados, um deles propagou-se pela Europa toda e hoje ainda é usado pelos países da língua inglesa, após pequenas modificações: trata-se do sistema comercial chamado “avoirdupois”, palavra francesa que significa “bens de peso”. Suas unidades são: grão (gr), dracma (dr), onça (oz), libra (lb), quintal (cwt) e tonelada (t).

Com relação ao tempo, apesar de não poder segurá-lo ou guardá-lo, o homem conseguia medi-lo registrando as repetições dos fenômenos periódicos. Qualquer evento natural servia para marcar o tempo: o período entre um e outro nascer do Sol, sucessão das luas cheias, ou a das primaveras.

Por sua vez, os índios contavam os anos por invernos ou verões, os meses por luas cheias e os dias por sóis. Tais cálculos não eram muito exatos. O número de horas de claridade entre o nascer e o pôr do sol varia muito durante o ano. Já o período que vai de uma lua cheia a outra permanecia constante. Logo os homens perceberam tal fato e concluíram que a maneira exata de medir o tempo era baseando-se na periodicidade de eventos em corpos celestes.

O nosso ano é o período de tempo em que a Terra faz o seu movimento de translação em torno do Sol. Ele é, às vezes, chamado de ano astronômico, equinocial, natural, ou solar. Os cientistas chamam-no geralmente de ano trópico e tem 365 dias, 5

horas, 48 minutos, 45 segundos e 7 décimos. Como o calendário é considerado apenas 365 dias, a cada quatro anos, as horas e os minutos que sobram são somados, formando mais um dia, caracterizando o ano bissexto.

O mês foi a primeira medida exata de tempo. Era calculado de uma lua cheia a outra e tinha exatamente 29 dias e meio. Entretanto, dividindo-se o ano em meses lunares, obtinha-se 12 meses e uma sobra de 11 dias. Não havia relação entre ano calculado pela translação da Terra em torno do Sol e o mês lunar. Isto originava confusão ao iniciar um novo mês lunar. Outras tentativas de divisões em relação a fenômenos naturais foram refutadas pela mesma razão. Júlio César, no ano de 46 A.C., aboliu o ano lunar e adotou o ano solar de 365 dias, com um dia a mais a cada quatro anos. Os meses eram baseados aproximadamente nos meses lunares, porém com duração diferente. Os imperadores romanos costumavam subtrair dias de alguns meses para adicioná-los a outros, seus favoritos.

A semana de sete dias não tem relação exata com os corpos celestes e seus movimentos, embora a divisão do mês em quatro semanas tenha origem nas divisões que representam as quatro fases da lua.

O dia é estabelecido pelo período de rotação da Terra em torno do seu eixo e a hora é a vigésima quarta parte do dia, não existindo, porém, relação entre os fenômenos naturais e as repetições de duração de uma hora: a divisão foi feita arbitrariamente e por conveniência. O relógio de Sol, que consistia de um bastão espetado no chão no centro de um círculo, foi o primeiro instrumento para medir intervalo de tempo. Uma hora possui 60 minutos e este, 60 segundos. Esta divisão foi feita pelos antigos babilônios (\approx 2000 a.C.), que adotavam um sistema de base sexagesimal, pois já havia dividido o círculo na base 60, critério que até hoje conservamos.

Idade Média e Renascença.

Os pesos e medidas usados nas civilizações antigas eram levados a outras, por meio do comércio ou da conquista. Assim, no início da Idade Média, as unidades adotadas eram as dos romanos, o último e maior império da Antiguidade, que levaram-nas por toda Europa, oeste da Ásia e norte da África. Sem dúvida, os mais usados eram ainda aqueles

das dimensões humanas. Obviamente eram ainda necessárias medidas mais exatas para certas atividades, como no caso das construções bizantinas e árabes. Esses povos certamente possuíam seus padrões de pesos e medidas, embora fossem diferentes para cada região. Ao que tudo indica, nenhum padrão foi criado em termos nacionais, até que, na Inglaterra, Ricardo I (reinou de 1189 a 1199), já no século XII, determinou unidades para comprimento e para capacidade. Estas eram de ferro e mantidas em várias regiões do país por autoridades regionais com o objetivo de comprovar a veracidade de uma medida. Datam desta época a jarda e o galão, até hoje usados pelos países de língua inglesa.

Várias versões existem para explicar o aparecimento da jarda: no norte da Europa, supõe-se que era o tamanho da cinta usada pelos anglo-saxões e no sul seria o dobro do comprimento do cúbito dos babilônios. Seu valor pode ter sido determinado por Henrique I (reinou de 1100 a 1135), que teria fixado o seu comprimento como sendo a distância entre o seu nariz e a ponta de seu braço esticado. Informações como esta não carecem de verdade, pois a maioria dos padrões da Idade Média era realmente criada pelos soberanos, primeiros interessados nas medidas dos valores de seus reinos.

Os pesos-padrão (massa-padrão) eram aqueles dos povos antigos, conforme a região, mantendo o grão como unidade fundamental. Em algumas regiões européias, continuava o uso do sistema “avoirdupois” nas transações comerciais. Para o comércio de jóias e pedras preciosas, que exigia processo de medidas mais delicado, era usado o sistema “troy”, cujas unidades eram: grão(gr), pennyweigh (dw.t), onça (oz.t) e libra (lb.t). Para pedras preciosas, a unidade-padrão era o quilate, que equivale aproximadamente a 4 grãos.

De todos os padrões de pesos e medidas criados, nenhum conseguiu uma utilização internacional e homogênea, existindo ainda aqueles remanescentes da Antiguidade. A situação se tornava mais delicada e confusa, devido à reprodução inexata, erros de interpretação e desonestidade de alguns. O mesmo não aconteceu com as medidas de tempo que já havia sido padronizada por Júlio César, sendo o seu calendário adotado pelo menos em toda a Europa. Ainda deve-se lembrar que nas invenções do fim da Idade Média e Renascença eram adotados padrões cautelosos, pois tratava-se de uma nova atividade e podia ser muito bem controlada. Como por exemplo, a tipografia e a imprensa, cujos tipos móveis de padrões internacionais foram criados em fins do século XV e são até hoje mantidos.

Idade Moderna e Contemporânea.

Em fins do século XVIII, a diversificação de medidas era enorme, dificultando muito as transações comerciais. Na França, a situação estava pior e graças às novas idéias trazidas pela Revolução Francesa de 1789 e as imposições que fazia o florescimento da era industrial, foi criada uma comissão de homens de ciência para a determinação e construção de padrões, de tal modo que fossem universais.

Os padrões deveriam reproduzir os fenômenos naturais, para não dependerem de futuras mudanças. Após estudos e pesquisas, a comissão que incluía nomes famosos como Borda, Lagrange e Laplace concluíram que a unidade de comprimento deveria pertencer ao sistema decimal, de maior facilidade, e presa a um dos três seguintes fenômenos naturais: Comprimento de um pêndulo de período (duas oscilações) igual a 1 segundo, latitude 45° ou, comprimento de $\frac{1}{4}$ do círculo equatorial ou comprimento de $\frac{1}{4}$ de meridiano terrestre do equador a um dos pólos.

Como na primeira a medida iria depender de grandezas alheias ao comprimento, como o tempo e o peso, e como medidas do equador eram quase impossíveis, foi aceita a proposição de meridiano, pois, além de não apresentar os defeitos das anteriores, já contava com uma comparação. O meridiano que passa por Paris já havia sido medido com boa exatidão e podia ser comparado com a nova determinação.

Imediatamente foram tomadas as medidas necessárias para o trabalho e designadas cinco comissões para a execução, onde figuravam Lavoisier, Coulomb e Legendre. Devido à demora que o empreendimento levaria e à urgência da criação do sistema, foi proposto e aceito pela Assembléia o metro provisório, baseado na medida antiga. Mais tarde, verificou-se que a diferença era mínima. Assim, as unidades-padrão eram o metro, o quilograma e o segundo.

O metro foi definido como a décima milionésima parte do meridiano terrestre medido de Dunkerke a Barcelona. A unidade de massa era o quilograma, construído em platina iridiada, massa próxima de 1 litro de água destilada a 4 °C. O segundo era a unidade de tempo, de valor 86400 avos do dia solar médio.

Por decreto-lei, as unidades tornaram-se oficiais na França e, passados alguns anos, vários países já as adotavam. Os padrões foram feitos e cópias exatas foram enviadas aos países que legalizaram o sistema métrico, dentre eles o Brasil.

Anualmente, a partir de 1870, reuniam-se em Paris os membros da Confederação Internacional de Pesos e Medidas e, em 1875, determinou-se a criação do “Bureau International des Poids et Mesures - BIPM”. Participaram 30 países, dentre os quais o Brasil, através de seu representante, Visconde de Itajubá.

Enfim, em 1960, na XI Conferência Internacional de Pesos e Medidas, foi adotado o Sistema Internacional de Unidades – o SI. As grandezas de base do SI são: Comprimento, Massa, Tempo, Intensidade de Corrente Elétrica, Temperatura, Intensidade Luminosa e quantidade de Matéria. A Inglaterra e os Estados Unidos, na época, resolveram não adotar o sistema decimal. Devido a sérios prejuízos que sofreram, esses países adotaram o SI a partir de 1974.

É possível observar, neste breve histórico, que um modelo ou uma teoria científica nunca é eternamente exata, podendo vir a sofrer mudanças, conforme a ciência e a tecnologia exija, de acordo com o seu desenvolvimento.”(Saad, 1974, p.44 - 48)

2.2.2 O que é Medição ?

Segundo VIM (Inmetro, 2000, p.23), medição é um conjunto de operações que tem por objetivo determinar um valor de uma grandeza.

Segundo Theisen (1997, p.25), mede-se para estabelecer a extensão, o grau, a qualidade, as dimensões, ou a capacidade com relação a um padrão, ou seja, para estimar. A medição também pode ser um processo, que pode resultar em uma operação ou mesmo em conjunto de dados. A medição em laboratório envolve procedimentos que o operador habilitado faz, utilizando-se de metodologias referendadas para produzir informações sobre amostras representativas do cenário sob investigação. Em consequência, dados são obtidos como resultado de medições. Dados podem ser transformados em informações.

As medições desempenham uma missão transcendental no processo do homem, cuja importância, quem sabe, somente seja superada pelas faculdades intelectuais. De fato,

poder-se-ia dizer que o progresso da humanidade está condicionado ao descobrimento da nova arte de medir. A medição é o meio de que o homem dispõe para complementar seu sistema sensorial e seu cérebro. É a base para estabelecer o cômputo de suas atividades e economia, guiando todo trabalho científico e orientando o emprego das máquinas que economizam esforços humanos na indústria.(Theisen, p.27)

Segundo Kind e Quinn (1995, p.85-89), medir significa comparar, por meio de experimentos, o valor desconhecido de uma grandeza com uma unidade apropriada, definida por convenção. Os NMI fornecem os padrões de medida, por intermédio dos quais a unidade pode ser bem determinada nas medições. Entenda-se, segundo VIM, como padrão (measurement Standard) a “medida materializada, instrumento de medição, material de referência ou sistema de medição destinado a definir, realizar, conservar, ou reproduzir uma unidade ou um ou mais valores de uma grandeza para servir como referência” (Kind, Quinn, 1995, p.85).

2.2.3 O Sistema Internacional de Unidades – SI (Inmetro, 2000).

Em 1954, na 10ª Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM), por meio de sua Resolução 6, e a 14ª CGPM, em 1971, em sua Resolução 3, decidiram adotar, como unidades de base deste “Sistema Prático de unidades”, as unidades das sete grandezas seguintes: comprimento, massa, tempo, intensidade luminosa, intensidade de corrente elétrica, temperatura termodinâmica e quantidade de matéria.

As definições oficiais de todas as unidades de base do SI foram aprovadas pela Conferência Geral. A primeira dessas definições foi aprovada em 1899 e a mais recente em 1983. Essas definições são modificadas periodicamente a fim de acompanhar a evolução das técnicas de medição e para permitir uma realização mais exata das unidades de base.

A 11ª CGPM (1960), por meio de sua Resolução 12, adotou finalmente o nome do Sistema Internacional de Unidades, com a abreviação internacional SI, para este sistema prático de unidades de medida, e instituiu regras para os prefixos, para as unidades derivadas e as unidades suplementares, além de outras indicações, estabelecendo, assim, uma regulamentação de conjunto para as unidades de medidas.

As Duas Classes de Unidades SI

No SI distingue-se duas classes de unidades:

- Unidades de base;
- Unidades derivadas.

Sob aspecto científico, a divisão das unidades SI nas duas classes é arbitrária porque não é uma imposição da física. Entretanto, a Conferência Geral, levando em consideração as vantagens de se adotar um sistema prático único para ser utilizado mundialmente nas relações internacionais, no ensino e no trabalho científico, decidiu basear o Sistema Internacional em sete unidades perfeitamente definidas, consideradas como independentes sob o ponto de vista dimensional: o metro, o quilograma, o segundo, a candela, o ampère, o kelvin e o mol. Essas unidades são chamadas unidades de base.

A segunda classe de unidades SI abrange as unidades derivadas, isto é, as unidades que podem ser formadas combinando-se unidades de base segundo relações algébricas que interligam as grandezas correspondentes. Diversas destas expressões algébricas, em razão de unidades de base, podem ser substituídas por nomes e símbolos especiais, o que permite sua utilização na formação de outras unidades derivadas.

As unidades SI destas duas classes constituem um conjunto coerente, na acepção dada habitualmente à expressão “sistema coerente de unidades”, isto é, sistema de unidades ligadas pelas regras de multiplicação e divisão, sem qualquer fator numérico diferente de 1. (SI, Inmetro, 2000).

A Figura 01 mostra as unidades de base do SI e suas interdependências, através das definições atuais, indicadas pelas setas. Somente três das sete unidades de base são definidas independentemente das outras: o quilograma, o segundo e o kelvin. Exemplo: A seta apontando da unidade segundo para o metro resulta da nova definição de 1983 que fez do metro dependente do segundo, adotando-se um valor exato para a velocidade da luz no vácuo.[1]

É importante acentuar que cada grandeza física tem uma só unidade SI, mesmo que esta unidade possa ser expressa sob diferentes formas. O inverso, porém, não é verdadeiro: a mesma unidade SI pode corresponder a várias grandezas diferentes.

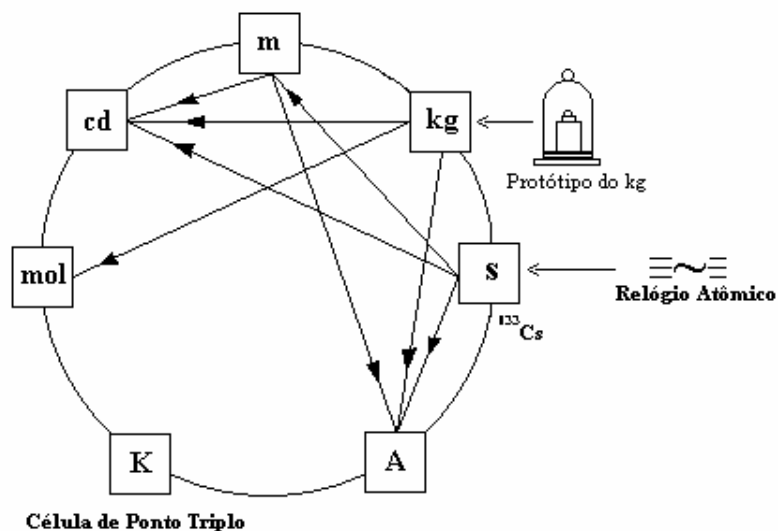


Figura 01 - Unidades de Base do SI, (Kind, Quinn, 1995, p.86)

A definição atual de cada unidade de base, extraída dos “compte rendus” da Conferência Geral que a aprovou está listada abaixo:

- Unidade de Comprimento (metro): “O metro é o comprimento do trajeto percorrido pela luz no vácuo durante um intervalo de tempo de $1/299\,792\,458$ de segundo”
- Unidade de Massa (quilograma): “o quilograma é a unidade de massa (e não de peso, nem de força); ele é igual à massa do protótipo internacional do quilograma”. Este protótipo em Platina iridiada é conservado no Bureau Internacional, nas condições que foram fixadas pela 1ª CGPM em 1889.
- Unidade de Tempo (segundo): “O segundo é a duração de $9\,192\,631\,770$ períodos da radiação correspondente à transição entre os dois níveis hiperfinos do estado fundamental do átomo de césio ^{133}Cs . Essa definição se refere a um átomo de césio em repouso, a uma temperatura de 0 K ”.
- Unidade de Corrente Elétrica (ampère): “O ampère é a intensidade de uma corrente elétrica constante que, mantida em dois condutores paralelos, retilíneos, de comprimento infinito, de seção circular desprezível, e situados à distância de 1 metro entre si, no vácuo, produz entre estes condutores uma força igual a 2×10^{-7} newton por metro de comprimento.

– Unidade de Temperatura Termodinâmica (kelvin): “O kelvin, a unidade de temperatura termodinâmica, é a fração $1/273,16$ da temperatura termodinâmica no ponto tríplice da água.”

– Unidade de Quantidade de Matéria (mol): “O mol é a quantidade de matéria de um sistema contendo tantas entidades elementares quantos átomos existem em 0,012 quilograma de carbono 12” “Quando se utiliza o mol, as entidades elementares devem ser especificadas, podendo ser átomos, moléculas, íons, elétrons, assim como outras partículas, ou agrupamentos especificados em tais partículas”.

– Unidades de Intensidade Luminosa (candela): “A candela é a intensidade luminosa, numa dada direção de uma fonte que emite uma radiação monocromática de frequência 540×10^{12} hertz e cuja intensidade energética nessa direção é $1/683$ watt por esterradiano”.

As unidades de base do Sistema Internacional de Unidades estão reunidas no Quadro 01 com seus símbolos.

Quadro 01 - Unidades do SI de Base (SI, Inmetro, 2000, p.47).

GRANDEZA	[Unidades SI de Base]	
	NOME	SÍMBOLO
Comprimento	metro	m
Massa	quilograma	kg
Tempo	segundo	s
Corrente Elétrica	ampère	A
Temperatura Termodinâmica	kelvin	K
Quantidade de Matéria	mol	mol
Intensidade Luminosa	candela	cd

2.2.4 As Grandezas Elétricas (SI, Inmetro, 2000).

A realização do ampère (unidade de base do SI), do ohm ou do volt (unidades derivadas do SI), diretamente, segundo sua definição e com uma exatidão elevada, exige um trabalho longo e difícil. As melhores realizações do ampère se obtêm, atualmente, por meio de combinações de realizações do watt, do ohm e do volt. O watt, realizado de maneira elétrica e comparado, com a ajuda de uma balança, com o watt realizado de

maneira mecânica. A experiência utiliza uma bobina num campo de indução magnética, de tal maneira que não é necessário conhecer nem as dimensões da bobina nem o valor da indução magnética.

O ohm é realizado, utilizando-se a variação da capacitância de um capacitor de Thompson-Lampard, variação que é unicamente função do deslocamento linear de um eletrodo-guarda. Por sua vez, o volt é realizado por meio de uma balança na qual uma força eletrostática é medida em função de uma força mecânica. Pode-se deduzir o ampère, combinando-se duas das três unidades anteriores. A incerteza relativa do valor do ampère assim obtida e estimada em 10^{-7} . O ampère, o ohm e o volt podem também ser determinados a partir de medições de diversas combinações de constantes físicas.

Os laboratórios utilizam, atualmente, padrões de referencia do volt ou do ohm baseados, respectivamente, no efeito Josephson ou no efeito Hall quântico, padrões que são nitidamente mais reprodutíveis e mais estáveis que 10^{-7} . A fim de aproveitar a vantagem que esses métodos mais estáveis oferecem para conservar os padrões de referência dos laboratórios que representam as unidades elétricas e tomando cuidado, ao mesmo tempo, para não modificar as definições do SI, a 18ª Conferência Geral adotou, em 1987, a Resolução 6, que solicita que as representações do volt e do ohm sejam baseadas em valores, admitidos por convenção, da constante de Josephson, K_j e da constante de von Klitzing, R_K .

Em 1988, o Comitê Internacional de Pesos e Medidas, agindo conforme as instruções baixadas pela Resolução 6 da 18ª Conferência Geral de Pesos e Medidas, relativas ao ajuste previsto para as representações do volt e do ohm, considerando que um estudo aprofundado dos resultados de determinações mais recentes conduz a um valor de 483 597,9 GHz/V para a constante de Josephson, K_j ; isto é, para o quociente da frequência pela tensão correspondente ao estágio $n = 1$, no efeito Josephson, e que o efeito Josephson, junto com esse valor de K_j , pode ser utilizado para estabelecer um padrão de referência de força eletromotriz, cuja incerteza (desvio padrão), em relação ao volt, é estimada em 4×10^{-7} , em valor relativo, e considerando que a reprodutibilidade do volt é nitidamente melhor, recomendou, que fosse adotado, por convenção, para a constante de Josephson, K_j , o valor $K_{j-90} = 483\,599,9 \text{ GHz/V}$, **exatamente**, a partir de 1º de janeiro de 1990, por todos os laboratórios que baseiam suas medições de força eletromotriz no efeito Josephson,

e também que todos os outros laboratórios ajustassem o valor de seus padrões de referência de acordo com a novo valor adotado.

Assim, o valor de K_{j-90} passou a ser superior em 3,9 GHz/V, ou seja, aproximadamente 8×10^{-6} , em valor relativo, ao valor dado, em 1972, pelo Comitê Consultivo de Eletricidade (CCE), na Declaração E- 72.

Em 1988 o Comitê Internacional de Pesos e Medidas, agindo conforme as instruções da Resolução 6 da 18ª Conferência Geral de Pesos e Medidas, relativas ao ajuste previsto das representações do volt e do ohm, considerando que a resistência elétrica baseada no efeito Hall Quântico é mais estável e reprodutível e cuja incerteza (desvio padrão), em relação ao ohm, e estimada em 2×10^{-7} , em valor relativo, e cuja reprodutibilidade é nitidamente melhor, recomendou que fosse adotado, por convenção, para a constante de von Klitzing (R_K) o valor $R_{K-90} = 25\,812,807 \, \Omega$, **exatamente**, a partir de 1º de janeiro de 1990, por todos os laboratórios que baseavam suas medições de resistência elétrica no efeito Hall Quântico, e que todos os outros laboratórios ajustassem o valor de seus padrões de referência de acordo com R_{K-90} .

Ainda na sessão de 1988, o CCE, cuidadosamente, considerou a maneira que os valores recomendados K_{j-90} e R_{K-90} , admitidos por convenção, devessem ser utilizados. Os valores de K_{j-90} e R_{K-90} não constituiriam uma redefinição das unidades SI. Os valores de K_{j-90} e R_{K-90} , admitidos por convenção, não poderiam ser utilizados para a definição do volt e do ohm, isto é, as unidades de força eletromotriz e de resistência elétrica do Sistema Internacional de Unidades. Se não, a constante μ_0 não seria um valor definido exatamente, o que revogaria a definição do ampère, e as unidades elétricas seriam incompatíveis com a definição do quilograma e suas unidades derivadas.

Com relação ao uso de índices associados aos símbolos de grandezas ou unidades, o CCE considerou que os símbolos das grandezas força eletromotriz (potencial elétrico, diferença de potencial elétrico) ou resistência elétrica, bem como aqueles do volt ou do ohm, não deverão ser modificados com a adição de índices que designam laboratórios ou datas particulares (SI, Inmetro, 2000).

Por questões de comodidade, certas unidades derivadas, que são mencionadas no Quadro 02 (descritas grandezas elétricas e algumas mecânicas), receberam nome especial e símbolo particular. Esses nomes e símbolos podem ser utilizados, por sua vez, para expressar outras unidades derivadas. Os nomes especiais e os símbolos particulares permitem expressar, de maneira mais simples, unidades freqüentemente utilizadas. Na última coluna do Quadro 02, encontra-se a expressão das unidades SI mencionadas em função das unidades SI de base.

Quadro 02 – Unidades SI derivadas (SI, Inmetro, 2000, p.49)

Grandezas	Unidade SI Derivada			
	Nome	Símbolo	Expressão em outras unidades do SI	Expressão em unidades SI de Base
Força	newton	N		m.kg.s^{-2}
Energia	joule	J	N.m	$\text{m}^2.\text{kg.s}^{-2}$
Potência	watt	W	J/s	$\text{m}^2.\text{kg.s}^{-3}$
Carga Elétrica	coulomb	C		s.A
Diferença de Potencial	volt	V	W/A	$\text{m}^2.\text{kg.s}^{-3}.\text{A}^{-1}$
Capacidade Elétrica	farad	F	C/V	$\text{m}^{-2}.\text{kg}^{-1}.\text{s}^4.\text{A}^2$
Resistência Elétrica	ohm	Ω	V/A	$\text{m}^2.\text{kg}^{-1}.\text{s}^{-3}.\text{A}^{-2}$
Condutância Elétrica	siemens	S	A/V	$\text{m}^2.\text{kg}^1.\text{s}^3.\text{A}^2$
Fluxo de Indução Magnética	weber	Wb	V.s	$\text{m}^2.\text{kg.s}^{-2}.\text{A}^{-1}$
Indução Magnética	tesla	T	Wb/m ²	$\text{kg.s}^{-2}.\text{A}^{-1}$
Indutância	henry	H	Wb/A	$\text{m}^2.\text{kg.s}^{-2}.\text{A}^{-2}$
Campo Elétrico	volt/metro		V/m	$\text{m.kg.s}^{-3}.\text{A}^{-1}$

2.3 CALIBRAÇÃO

2.3.1 Definição

Segundo VIM (Inmetro, 2000, p.62), calibração é um conjunto de operações que estabelece, sob condições especificadas, a relação entre os valores indicados por um instrumento de medição, ou um sistema de medição, ou valores representados por uma

medida materializada, ou um material de referência, e os valores correspondentes das grandezas estabelecidos por padrões.

O resultado de uma calibração permite, tanto o estabelecimento dos valores do mensurando para as indicações, como a determinação das correções a serem aplicadas. Uma calibração pode, também, determinar outras propriedades metrológicas, como o efeito das grandezas de influência. Uma expressão completa do resultado de uma medição inclui informações sobre a incerteza de medição.

2.3.2 Métodos de Calibração.

As calibrações num laboratório de metrologia elétrica podem ser realizadas pelo método da medição direta, pelo método da comparação, pelo método da substituição e pelo método indireto, utilizando-se definições físicas de uma determinada grandeza.

2.3.2.1 Método da Medição Direta.

Neste método, o mensurando é medido diretamente pelo instrumento. O padrão de referência está localizado internamente ao instrumento. O usuário, em geral, não tem acesso ao padrão. Por exemplo: Medição de tensão, corrente e resistência elétrica utilizando-se um multímetro.

2.3.2.2 Método da Medição por Comparação

Este método normalmente utiliza-se de um comparador, que na medição de grandezas elétricas pode ser uma Ponte de Resistência ou de Impedância, ou mesmo um sistema potenciométrico para medir.

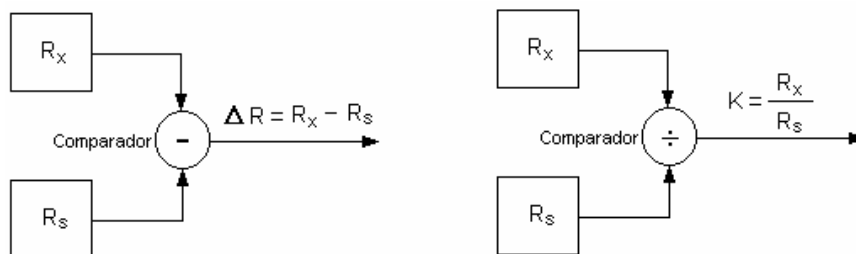


Figura 02 – Método da Comparação (do autor)

Existem, na metrologia Elétrica, duas maneiras de fazer a comparação, uma pelo método diferencial e outra pelo método da relação. Pelo Método Diferencial, o comparador mede a diferença (ΔR) entre o padrão de referência e o padrão em calibração.

$$\Delta R = R_x - R_s \Rightarrow . \Rightarrow . \Rightarrow R_x = R_s + \Delta R \quad (1)$$

Pelo Método da Relação, o comparador mede o quociente (K) entre o padrão de referência e o padrão em calibração.

$$K = \frac{R_x}{R_s} \Rightarrow . \Rightarrow . \Rightarrow R_x = K \cdot R_s \quad (2)$$

2.3.2.3 Método da medição por Substituição

Este método normalmente utiliza-se uma Ponte ou Instrumento Digital de alta exatidão que, na medição de grandezas elétricas, pode ser um Multímetro Digital ou um Medidor de Impedância Digital.

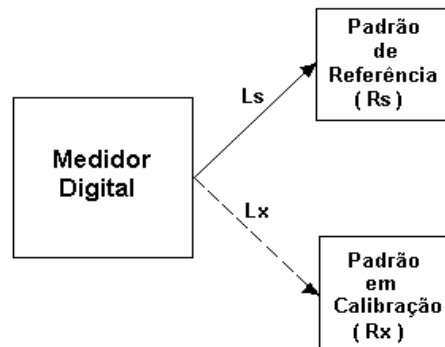


Figura 03 – Método da substituição (do autor)

Realizam-se duas medições, inicialmente mede-se o padrão de referência (L_s) e em seguida mede-se o padrão em calibração (L_x).

$$R_x = \frac{L_x}{L_s} \cdot R_s \quad (3)$$

L_x e L_s são as leituras do padrão em medição e no padrão de referência, respectivamente.

2.3.2.4 Método Indireto

Segundo EA-4/02 (1999), mensurando é a grandeza particular submetida a medição. Neste método, o valor do mensurando é obtido por meio de uma lei física. Medem-se as grandezas físicas envolvidas no processo. Por exemplo: Medição de corrente

elétrica (i). A corrente é obtida pela lei de Ohm, $i = V/R$, onde R é a resistência elétrica de um resistor, i é a corrente que passa nele e V é a diferença de potencial entre seus terminais.

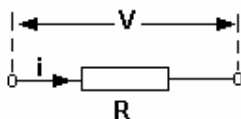


Figura 04 – Método Indireto (do autor)

2.4 INCERTEZA DE MEDIÇÃO

2.4.1 Definição (EA-4, 1999), (Isogum,1997)

Segundo ISOGUM (1997), o objetivo de uma medição é determinar o valor do mensurando. Uma medição começa com uma especificação do mensurando, do método e do procedimento. O resultado de uma medição é somente uma aproximação ou estimativa do valor do mensurando e assim só é completa quando acompanhada pela declaração da incerteza.(ISOGUM, 1997, p.4)

Portanto, a incerteza do resultado de uma medição reflete a falta de conhecimento exato do mensurando. O resultado de uma medição, após a correção dos efeitos sistemáticos reconhecidos, é ainda tão somente uma estimativa do valor do mensurando, por causa da incerteza proveniente dos efeitos aleatórios e da correção imperfeita do resultado no que diz respeito aos efeitos sistemáticos. Cabe destacar que qualquer medição tem imperfeições que dão origem a um erro no resultado da medição. Um erro, em metrologia, tem dois componentes, o aleatório e o sistemático.

O erro aleatório se origina de variações temporais ou imprevisíveis das grandezas de influência. Os efeitos de tais variações são chamados de efeitos aleatórios. Tais efeitos não podem ser eliminados, porém podem ser reduzidos, aumentando-se o número de repetições. A parte não reduzida do efeito vem a ser a incerteza aleatória de uma medição, ou incerteza do Tipo A. O desvio padrão experimental da média aritmética das medições vem a ser uma medida da incerteza da média devido aos efeitos aleatórios.

O erro sistemático se origina de um efeito reconhecido de uma grandeza de influência em um resultado de medição, chamado de efeito sistemático. Esse efeito pode ser quantificado e deve-se fazer uma correção sobre a média aritmética das medições. Porém, embora o efeito sistemático possa ser quantificado, não é perfeitamente conhecido. A parte não determinada é a incerteza sistemática de uma medição ou a incerteza do Tipo B.

Na prática, existem muitas fontes de incertezas em uma medição, tais como: definição incompleta do mensurando, realização imperfeita do mensurando, amostragem não representativa, isto é, a amostra pode não representar o mensurando, conhecimento inadequado dos efeitos das condições ambientais ou medições imperfeitas destas, tendências pessoais na leitura de instrumentos analógicos, resolução finita do instrumento ou limiar de mobilidade, valores inexatos dos padrões de medição, valores inexatos das constantes e outros parâmetros obtidos de fontes externas e utilizados no algoritmo de redução de dados, aproximações e suposições incorporadas ao método e ao procedimento de medição e variações nas observações repetidas do mensurando, sob condições aparentemente idênticas.

Nas medições das grandezas elétricas, as fontes de incertezas mais comuns são devidas às influências aleatórias, à resolução dos instrumentos de medição, às especificações do fabricante do instrumento de medição ou dos padrões de referência, às incertezas de medição do padrão de referência, à estabilidade temporal e da temperatura do padrão. A primeira fonte de incerteza citada é do Tipo A e as demais são do Tipo B.

2.4.2 Avaliação da Incerteza de Medição

Em calibrações, usualmente se lida somente com um mensurando, ou Grandeza de Saída Y , que depende de uma série de Grandezas de Entradas X_i ($i = 1, 2, \dots, N$), de acordo com a relação funcional:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (4)$$

A função f representa o procedimento de medição e o método de avaliação. Ela descreve como os valores das grandezas de saída Y são obtidos a partir dos valores das grandezas de entrada X_i , sendo que estas podem ser agrupadas em duas categorias, de

acordo com a maneira pela qual o valor da grandeza e sua incerteza associada tenham sido determinados.

A primeira categoria é constituída pelas grandezas cujas estimativas e incertezas associadas são diretamente determinadas na medição em curso. Esses valores podem ser obtidos de uma única observação, de observações repetidas, ou por meio de julgamento baseado na experiência. A segunda categoria é constituída por grandezas cujas estimativas e incertezas associadas são incorporadas à medição a partir de fontes externas, tais como grandezas associadas aos padrões de medição calibrados, materiais de referências certificados, ou dados de referência obtidos de manuais.

Uma estimativa do mensurando Y , a **estimativa de saída** designada por y , é obtida pela equação (4) usando estimativas de entrada x_i para os valores das grandezas de entrada X_i .

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (5)$$

Para uma variável aleatória, a **variância** de sua distribuição, ou o **desvio padrão**, é utilizado como uma medida de dispersão de valores. A **incerteza padrão de medição** associada à estimativa de saída ou resultado de medição y , designado por $u(y)$, é o desvio padrão do mensurando Y . Ela deve ser determinada a partir das estimativas x_i das grandezas de entrada X_i , e suas incertezas padrão associadas $u(x_i)$. A incerteza padrão associada a uma estimativa, tem a mesma dimensão da estimativa. A incerteza de medição associada às estimativas de entrada é avaliada de acordo com os métodos de avaliação definidos como do Tipo A ou do Tipo B.

2.4.3 Avaliação do Tipo A da incerteza padrão

A avaliação do Tipo A da incerteza padrão pode ser aplicada quando são feitas várias observações independentes para uma das grandezas de entrada sob as mesmas condições de medição. Supondo Q como a grandeza de entrada X_i medida repetidamente n vezes ($n > 1$) em observações independentes. A estimativa da grandeza Q será \bar{q} , a média aritmética ou a média dos valores individuais q_j ($j = 1, 2, \dots, n$);

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_j \quad (6)$$

A incerteza de medição associada com a estimativa \bar{q} deve ser determinada inicialmente determinando-se a variância experimental $s^2(q)$ dos valores de q_j e em seguida a variância experimental da média que é a melhor estimativa de \bar{q} . A variância experimental é dada por:

$$s^2(q) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2 \quad (7)$$

A variância experimental da média é dada por:

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q)}{n} \quad (8)$$

A incerteza padrão associada à estimativa de entrada \bar{q} é o desvio padrão experimental da média:

$$u(\bar{q}) = s(\bar{q}) \quad u(\bar{q}) = \frac{s(q)}{\sqrt{n}} \quad (9)$$

2.4.4 Avaliação do Tipo B da incerteza padrão

A avaliação do Tipo B da incerteza padrão é a avaliação da incerteza associada com uma estimativa x_i de uma grandeza de entrada X_i feita por outros meios que não a análise estatística de uma série de observações. A incerteza padrão $u(x_i)$ é avaliada cientificamente baseado em todas as informações disponíveis sobre a variabilidade de X_i . A seguir são descritas as incertezas do Tipo B mais comuns na metrologia elétrica e suas incertezas padrão associadas às entradas X_i .

– A incerteza citada de x_i é originária de uma Distribuição Normal

Para recuperar a incerteza padronizada de x_i , divide-se a incerteza citada (U) pelo fator de abrangência (k) de acordo com o nível de confiança. A variância será:

$$u^2(x_i) = \left(\frac{U}{k} \right)^2 \quad (10)$$

Usualmente, considera-se como fator de influência a incerteza declarada (U) da calibração do padrão de referência utilizada na calibração.

– A incerteza citada de x_i é originária de uma Distribuição Retangular

No caso em que só é possível estimar somente fronteiras (limite inferior e a superior) para X_i , para afirmar que a probabilidade de que o valor de X_i esteja dentro do intervalo a e a_+

para todos os fins práticos é igual a um e a probabilidade de que X_i esteja fora deste intervalo é essencialmente zero. Se não há conhecimento específico sobre os valores possíveis de X_i dentro do intervalo, pode-se somente assumir que é igualmente provável que X_i esteja em qualquer lugar dentro dele. Então x_i é a esperança ou o valor esperado de X_i , e é o ponto médio no intervalo citado: $x_i = (a_- + a_+) / 2$ e com a variância associada:

$$u^2(x_i) = \frac{(a_- - a_+)^2}{12} \quad (11)$$

Se considerarmos a diferença $(a_- - a_+)$ igual a $(2a)$, então a equação torna-se:

$$u^2(x_i) = \frac{a^2}{3} \quad (12)$$

Os fatores de influências, como a estabilidade temporal do instrumento de referência, os efeitos das condições ambientais como temperatura, umidade relativa do ar e a resolução de um instrumento digital linear, são consideradas como distribuição retangular.

2.4.5 Cálculo da incerteza padrão da estimativa de saída

Para grandezas de entrada não correlacionadas o quadrado da incerteza padrão associada com estimativa de saída y é dado por:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y) \quad (13)$$

A grandeza $u_i(y)$ ($i=1,2,\dots,N$) é a contribuição da incerteza padrão associada à estimativa de saída y , resultante da incerteza padrão associada à estimativa de entrada x_i :

$$u_i(y) = c_i u(x_i) \quad (14)$$

onde, c_i é o coeficiente de sensibilidade associado com a estimativa de entrada x_i . Isto é a derivada parcial da função modelo f com relação à variável X_i , avaliada para as estimativas de entrada x_i .

$$c_i = \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} = \frac{\partial f}{\partial X_i} \right]_{X_1=x_1 \dots X_N=x_i} \quad (15)$$

2.4.5.1 Cálculo da Incerteza Expandida de Medição

Segundo EA-04 (1999), a incerteza de medição U é obtida multiplicando-se a incerteza padrão $u(y)$ da estimativa de saída y por um fator de abrangência k .

$$U = k \cdot u(y) \quad (16)$$

Para estimar o valor de um fator de abrangência k correspondente a uma probabilidade de abrangência especificada, é necessário que seja levada em conta a confiabilidade da incerteza padrão $u_i(y)$ da estimativa de saída y . Uma medida da confiabilidade da incerteza padrão associada a uma estimativa de saída é seu grau de liberdade efetivo v_{eff} .

O grau de liberdade efetivo v_{eff} é determinado a partir da fórmula de WelchSatterhwaite:

$$v_{eff} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \quad (17)$$

onde, v_i são os graus de liberdade efetivo da contribuição da incerteza padrão $u_i(y)$.

Para uma incerteza padrão $u(q)$, obtida de uma avaliação do Tipo A, os graus de liberdade são dados por: $n_i = n - 1$. Os graus de liberdade da incerteza padrão $u(x_i)$ obtidos de uma avaliação do Tipo B podem ser tomados como sendo $n_i = \infty$.

De acordo com v_{eff} obtido, determina-se o valor de k através do Quadro 3 a seguir. Esta tabela é baseada na distribuição $-t$ avaliada para uma probabilidade de abrangência de 95,45%.

Quadro 3 – Fatores de abrangência k para diferentes graus de liberdade n_{eff} (EA -4, 1999)

v_{eff}	1	2	3	4	5	6	7	8	10	20	50	∞
k	13,97	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,43	2,37	2,28	2,13	2,05	2,00

2.5 CONCEITO DE RASTREABILIDADE

Segundo VIM (2000, p.62), rastreabilidade é uma propriedade do resultado de uma medição ou do valor de um padrão estar relacionado às referências estabelecidas, geralmente a padrões nacionais ou internacionais, através de uma cadeia contínua de comparações denominada Cadeia de Rastreabilidade, todas tendo incertezas estabelecidas (VIM, 2000, p.62). Segundo Kind e Quinn (1995, p. 85), os padrões de medidas são derivados de uma série de três operações básicas, “realização, manutenção e disseminação”.

Realização da unidade internacionalmente concordante com a abstrata definição da unidade.

Manutenção da unidade obtida através da realização da unidade por meios de padrões primários de medição.

Disseminação da unidade para os usuários.

A disseminação pode ser realizada por uma variedade de caminhos, dependendo da natureza da grandeza, por exemplo, transportando-se um padrão físico, transporte de instrumentos, ou transmissão remota de sinais. Estes três experimentos operacionais básicos na metrologia representam o caminho desde a definição no SI até o usuário como ilustrado na Figura 05.

O esquema mostra também uma alternativa para realização direta da definição.

Reprodução da unidade através de um experimento de mais alta tecnologia. A palavra “Reprodução” é aqui utilizada seguindo a definição de “Reprodutibilidade” dada no VIM (2000, p.29), que significa, o grau de concordância entre os resultados das medições de um mesmo mensurando efetuadas sob condições variadas de medição.

Relacionando-se as pesquisas físicas às metrológicas, concluiu-se que os resultados altamente reprodutíveis de medição de uma grandeza podem ser esperados, se existir uma ligação direta do resultado às constantes atômicas ou fundamentais. A reprodução de uma unidade pode, então, ser considerada como sua realização indireta ligada à realização direta, através de um fator numérico desconhecido, mas fixo, próximo de 1.

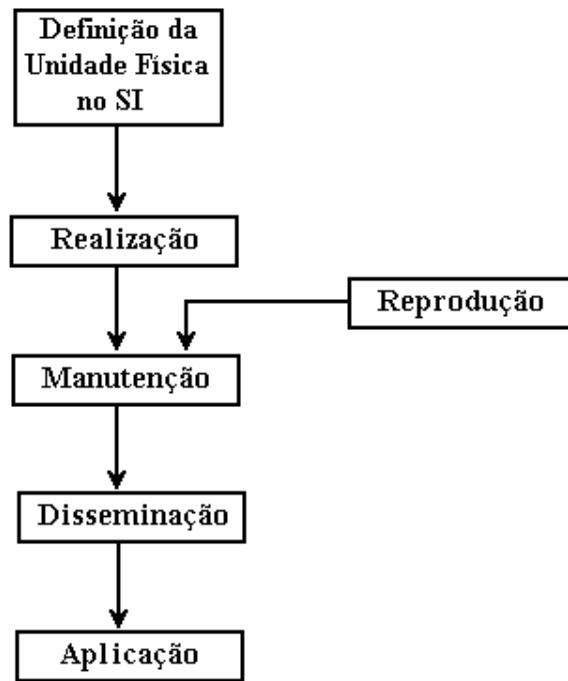


Figura 05: Operações Básicas da Metrologia, (Kind, Quinn, 1995, p.85)

Padrões de medida, cuja reprodução da unidade é melhor que as realizações de suas definições, têm sido sempre usadas na metrologia. Há mais de uma década os NMI de vários países vêm reproduzindo o “volt” e o “ohm” a partir, respectivamente, do Efeito Josephson e pelo Efeito Hall, no lugar da realização por intermédio da “Balança baseada na força eletrostática” ou do “Capacitor Thompson - Lampard”, respectivamente.

2.6 A GRANDEZA FÍSICA “CAPACITÂNCIA”

Dois condutores vizinhos, de formatos arbitrários, possuindo cargas elétricas iguais de sinais contrários constituem um capacitor e cada um dos condutores é denominado de armadura. As cargas são obtidas ligando-se, durante um certo tempo, as armaduras aos terminais de um gerador. A capacitância de um capacitor é definida como:

$$C = \frac{Q}{U} \quad (18),$$

sendo Q o módulo das carga existente em cada uma das placas e U a diferença de Potencial entre as armaduras.

A capacitância do capacitor depende da forma geométrica das armaduras, da sua posição relativa e do meio em que se acham imersas.

2.6.1 Definição da Unidade

No Sistema Internacional de Unidade (SI), a unidade de capacitância é denominada **farad** cujo símbolo é **F**.

Capacitância (SI) = $\frac{\text{coulomb}}{\text{volt}} = \text{farad}$ $\left(\frac{C}{V} = F \right)$ ou expressando em unidades SI de

base: $F = m^{-2} \text{ kg}^{-1} \text{ s}^4 \text{ A}^2$

2.6.2 Realização do farad

A realização farad é obtida através de um capacitor calculável. A Figura 06 ilustra o princípio de operação do Capacitor Thompson – Lampard.

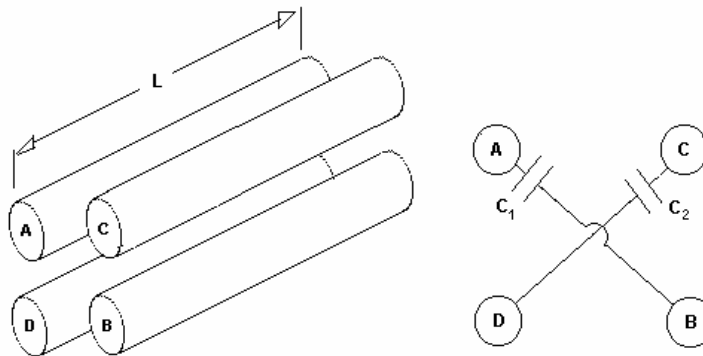


Figura 06: Capacitor Calculável (Fluke, 1994, p.12-8)

Nesta figura simplificada, quatro cilindros estão posicionados nos vértices de um retângulo, quando vista frontalmente. O conjunto de dois cilindros diagonalmente opostos constitui um capacitor. O capacitor C_1 é o capacitor formado pelos cilindros A e B, o capacitor C_2 é o formado pelos cilindros C e D.

Quando os cilindros têm aproximadamente o mesmo diâmetro e suas geratrizes e o espaçamento diagonal são aproximadamente os mesmos, a média das capacitâncias

$\bar{C} = \frac{C_1 + C_2}{2}$, por metro do comprimento dos pares de cilindros diagonalmente opostos,

é constante com um alto grau de exatidão para qualquer conjunto de cilindros, mesmo

quando existem pequenas variações nos espaçamento e na área da secção transversal. O valor médio constante da capacitância é dado por (FLUKE, 1994, p. 12-7):

$$\bar{C} = \epsilon_0 L \left[\frac{\ln 2}{\pi} \right] \left[1 + 0,087 \left(\frac{C_2 - C_1}{\bar{C}} \right)^2 \right] + \dots \quad (19)$$

L é a distância entre os cilindros aterrados, em metros;

$$\epsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c^2} \quad (20)$$

μ_0 = permeabilidade do vácuo; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$

c = velocidade da luz no vácuo; $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$

0,087 corresponde à correção da equação quando da conversão do sistema CGS para o sistema métrico.

Observação: os termos da quarta ordem e acima foram desprezadas, que se apresentam na

forma: $0,087 \left(\frac{(C_1 - C_2)^n}{\bar{C}} \right)$ (21)

Os termos de quarta ordem e ordens superiores podem ser desprezadas e a capacitância obtida é aproximadamente 2 pF/m (para ser mais exato $C=1,953549043 \text{ pF/m}$ [8]). Assim, a capacitância de Thompson-Lampard pode servir de capacitor padrão com alta exatidão por unidade de comprimento.

Os efeitos de borda distorcem o campo elétrico nas áreas próximas dos extremos dos cilindros que invalidam os cálculos. Por esta razão, introduz-se, entre os cilindros, dois cilindros, um fixo e outro móvel, ambos aterrados, como mostra a Figura 07.

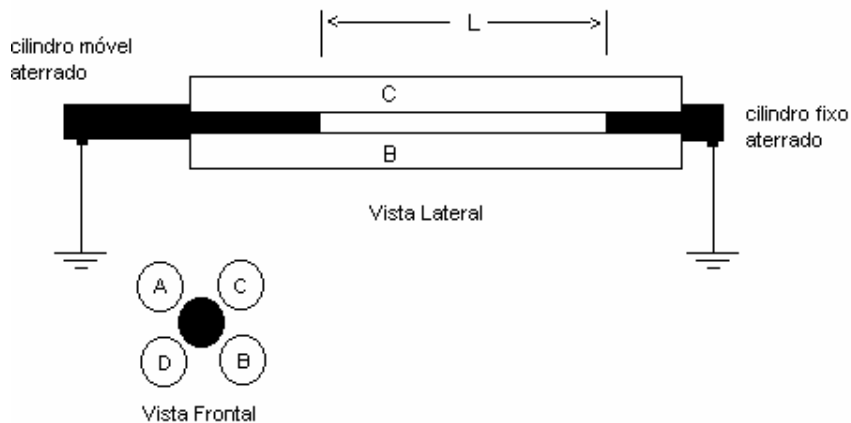


Figura 07: Sistema de aterramento para reduzir os efeitos de borda (FLUKE, 1994, p.12-8))

Uma variação na capacitância é obtida deslocando-se o cilindro móvel aterrado para aumentar ou diminuir a distância L . O deslocamento é medido com um interferômetro a laser. Nas Figuras 06 e 07 foram omitidas todas as blindagens para melhor compreensão. A incerteza de medição na realização do farad é da ordem de $0,15 \mu\text{F/F}$ (FLUKE, 1994, p. 12-8)

2.6.3 Reprodução (Kyriazis, 2000)

Uma cadeia de rastreabilidade para reproduzir a unidade de capacitância à unidade prática internacional de resistência derivada do efeito Hall quântico é descrita. A cadeia compreende um resistor C.A.-C.C. coaxial, uma ponte de transformador de quatro pares de terminais de relação 10:1 para operação em várias frequências e uma ponte de quadratura para operação em várias frequências.

Os Institutos Nacionais de Metrologia que possuem um capacitor calculável Thompson-Lampard têm se dedicado nos últimos anos à determinação da constante de von Klitzing e da constante de estrutura fina, através da comparação entre a resistência Hall quantizada e o capacitor calculável. A resistência Hall quantizada de quatro terminais (QHR) do i -ésimo platô de QHE é $R_H(i) = R_K/i$, onde R_K é a constante de von Klitzing. É geralmente aceito que R_K está relacionada à constante de estrutura fina α por

$$R_K = h/e^2 = (\mu_0 c)/(2\alpha) \quad (22)$$

onde h é a constante de Plank e e é a carga elementar. A permeabilidade do vácuo e a velocidade da luz no vácuo são exatamente definidas no SI. Recentemente, o ohm derivado do capacitor calculável tem sido combinado com as medições de QHE para obter algumas das melhores determinações, expressas em unidades do SI, da constante de von Klitzing e da constante de estrutura fina. O melhor valor de R_K foi definido por acordo internacional em 1990 como $R_{K-90} = 25\,812.807 \Omega$. Desde então, novas determinações têm sido feitas da constante de von Klitzing derivada do capacitor calculável visando minimizar a incerteza da medição.

A unidade de capacitância pode ser derivada da unidade prática internacional da Resistência QHE, como tem sido feito em alguns Institutos Nacionais de Metrologia. A

determinação da unidade de capacitância em termos do QHE consiste em comparar a resistência Hall quantizada com padrões de capacitância por meio de sistemas de medição de impedância e padrões de transferência caracterizados. A cadeia de rastreabilidade proposta está mostrada na Figura 08.

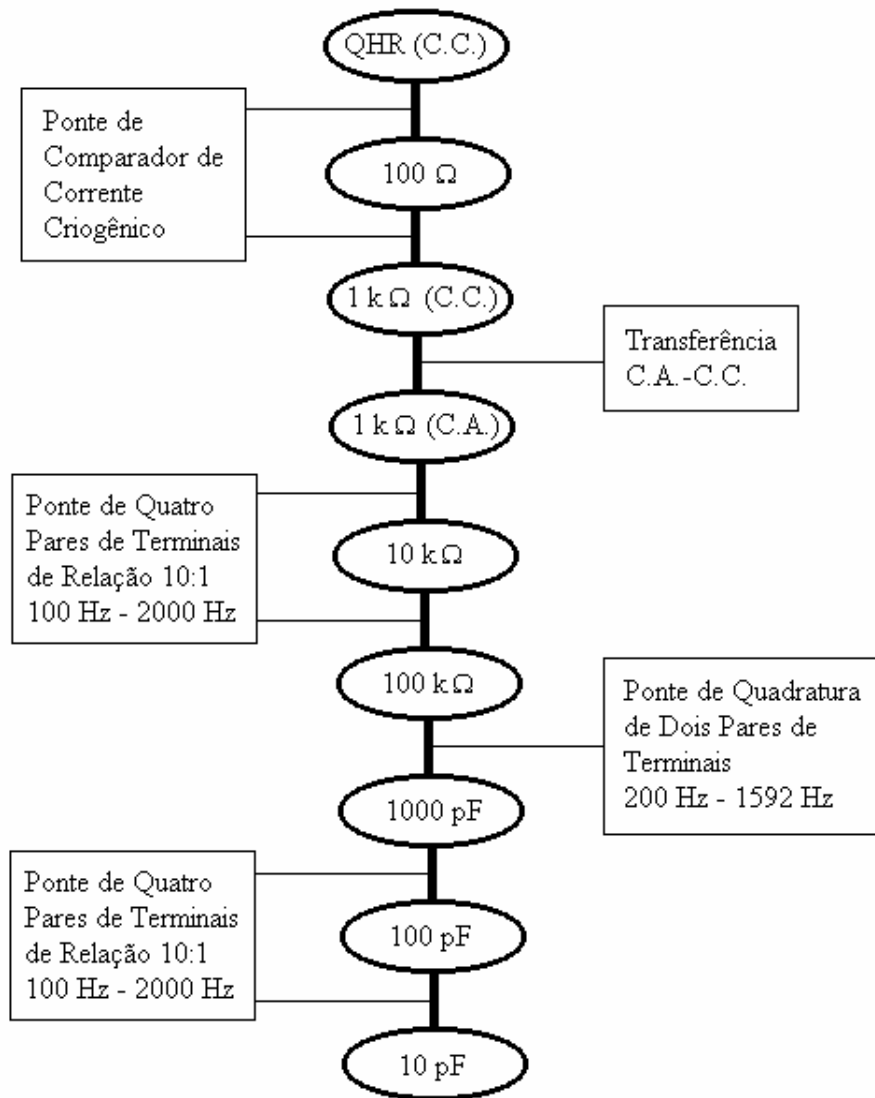


Figura 08: Série de medições que ligam a resistência Hall quantizada ao banco de padrões usado para manter e disseminar a unidade de capacitância (Kyriazis, 2000)

Cadeia de Comparação

O comparador de corrente criogênico (CCC) foi desenvolvido e implementado comercialmente para permitir a comparação, com uma incerteza de 3×10^{-9} a 10×10^{-9} , da Resistência QHR com um banco de 5 (cinco) resistores de 100Ω estáveis de quatro terminais. O valor do resistor de 100Ω é determinado dos platôs de QHR de $6453,2 \Omega$ e $12906,4 \Omega$. Este método de comparação de resistência em corrente contínua faz uso de um dispositivo de interferência quântico supercondutor (SQUID), de alta sensibilidade, e reduz a duração das medições. A incerteza relativa da relação de espiras do CCC é tipicamente menor do que 1×10^{-10} , de modo que qualquer afastamento da relação de corrente é corrigido por realimentação pelo sinal de desequilíbrio do SQUID.

O banco de resistores de 100Ω é comparado, por meio do CCC, com um resistor transportável de 1000Ω de quatro pares de terminais que é mais tarde usado para comparações de C.A. A definição de quatro pares de terminais tem sido usada em medições de impedância, por meio de pontes de corrente alternada, para reduzir os efeitos de impedâncias parasitas e diminuir a sensibilidade a variações na impedância em série e na impedância em paralelo dos condutores. Isto é especialmente importante quando da medição de impedâncias pequenas. Na cadeia de rastreabilidade proposta, todos os padrões e as pontes usadas para calibrá-los, com exceção da ponte de quadratura, têm quatro pares de terminais.

Os resistores utilizados são de quatro pares de terminais, com resposta de frequência calculável. Os cálculos são baseados nas propriedades físicas do fio de resistência, dos condutores de suporte e blindagem, e dos desvios esperados do projeto coaxial ideal. O resistor é projetado de forma que sua resistência varie de menos do que uma parte em 10^8 entre C.C. e 1592 Hz. A fim de casar com os valores de capacitância e com a ponte de 10:1 usadas nas comparações (Figura 8), o valor do resistor deve ser uma potência de 10. O valor ótimo da resistência que satisfaz estas condições é de 1000Ω .

Vários tipos de resistores de C.A.-C.C. calculáveis têm sido desenvolvidos. Para valores de resistência maiores do que 1000Ω , resistores calculáveis especiais com

elementos de resistência quadrifilares ou octofilares têm sido usado em vários Institutos Nacionais de Metrologia nos últimos anos.

A ponte de transformador de quatro pares de terminais de relação de 10:1 é usada para comparar o resistor calculável de 1000Ω com um resistor de $10 \text{ k}\Omega$ e então comparar o resistor de $10 \text{ k}\Omega$ com cada um dos dois resistores de $100 \text{ k}\Omega$ (usados na ponte de quadratura). A mesma ponte de transformador de quatro pares de terminais é usada para comparar cada um dos dois capacitores de 1000 pF (usados na ponte de quadratura) com um capacitor de 100 pF e, então, comparar o capacitor de 100 pF com o valor médio do banco de cinco capacitores de sílica fundida de 10 pF mantidos a uma temperatura controlada.

Estas últimas comparações são feitas pela substituição seqüencial de cada um dos padrões de sílica fundida. A transferência da unidade de capacitância para o banco fornece uma correção, que é usada para converter os resultados de medições feitas com o banco para valores rastreáveis à unidade prática internacional de resistência derivada do QHE.

A ponte de transformador de quatro pares de terminais permite obter uma incerteza padrão relativa de 1×10^{-9} que é otimizada para operar na frequência de 1592 Hz (frequência de operação da ponte de quadratura). A ponte de quadratura compara os dois capacitores de 1000 pF com dois resistores de $100 \text{ k}\Omega$ (CUTKOSKY, 1970). A unidade de tempo do SI é utilizada nesta medição através da frequência da medição C.A., visto que a impedância dos capacitores deve casar com a impedância dos resistores.

A ponte quadratura é projetada para operar em 1592 Hz quando dois resistores de $100 \text{ k}\Omega$ e dois capacitores de 1000 pF são comparados. Esta apresenta uma incerteza padrão relativa de 2×10^{-7} , na comparação de capacitores de 1000 pF e resistores de $100 \text{ k}\Omega$ na faixa de frequência de 200 Hz a 1592 Hz . Esta incerteza pode ser minimizada mediante um maior controle da temperatura dos padrões.

2.7 MANUTENÇÃO DA UNIDADE

2.7.1 Introdução

A Conservação de um padrão é constituída por um conjunto de operações necessárias para preservar as características metrológica de um padrão, dentro de seus limites apropriados. As operações, normalmente, incluem calibrações periódicas, armazenamento em condições adequadas e utilização cuidadosa (VIM, 2000, p.63).

Define-se Padrão como sendo medida materializada, instrumento de medição, material de referência ou um sistema de medição destinado a definir, realizar, conservar ou reproduzir uma unidade ou um ou mais valores de uma grandeza para servir como referência (VIM, 2000, p. 59).

Partindo destas duas definições, a manutenção de uma unidade de uma grandeza física é realizada pela conservação de algum tipo de padrão apropriado. Um NMI realiza a manutenção das unidades através de sistemas que reproduzem a unidade tais como o Efeito Josephson, que reproduz a unidade de tensão elétrica (volt), ou Resistência Elétrica baseada no Efeito Hall Quântico, ou possui um conjunto de padrões tais como as pilhas-padrão ou resistência-padrão.

A manutenção da unidade é uma das atividades fundamentais dentro da cadeia de rastreabilidade como visto no item (2.5).

Neste tópico será descrito um método matemático para a realização dessa manutenção da unidade através de um conjunto de padrões, que doravante será denominado de Banco de Padrões.

Periodicamente o laboratório deve calibrar um de seus padrões (padrão itinerante) no laboratório do BIPM e, através deste, calibrar os demais padrões do Banco. Após esse procedimento faz-se a suposição de que a média dos valores dos padrões é constante durante o período entre as calibrações no BIPM, embora os elementos estejam variando no tempo. Obviamente, a validade desta suposição é limitada e depende da estabilidade dos padrões, das influências do ambiente e do intervalo de tempo entre duas calibrações.

Durante o período entre as calibrações no BIPM, é necessário medir com frequência as variações dos padrões do banco com o a finalidade de verificar a confiabilidade dos valores de cada padrão do banco. O método tradicional é fazer comparações entre os elementos do banco e estimar os valores atuais deles. O Método dos Mínimos Quadrados é a ferramenta matemática geralmente utilizada para fazer as estimativas.

2.7.2 Método dos Mínimos Quadrados (Ihlenfeld, 1989).

2.7.2.1 Descrição do Método

O sistema da Figura 09 descreve um Sistema de Medição. O resultado das medições “y”, é uma função do conjunto de parâmetros “ β ” do sistema, então $y = f(\beta)$. Supondo que um erro “e” esteja alterando o resultado de cada medição, então o sinal observado será $Y = y + e$. O objetivo das observações (medições) é determinar os parâmetros “ β ” do sistema. Devido aos erros, a incertezas das medições fazem com que a determinação dos parâmetros se transforme numa estimativa dos valores verdadeiros.

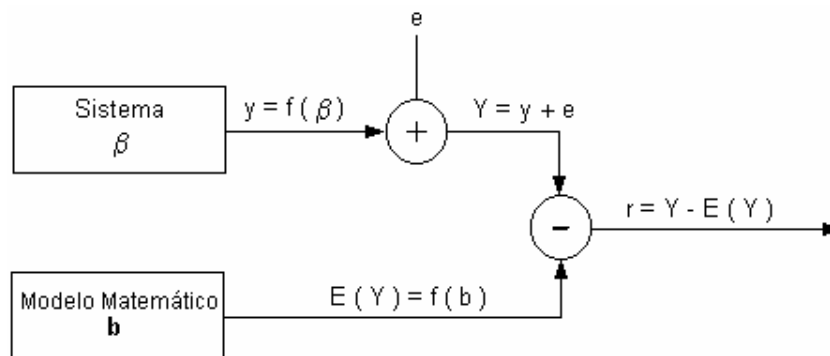


Figura 09: Sistema de Medição (de domínio público)

Fazendo-se várias observações, pode-se obter um conjunto de equações denominadas “equações de observação”.

Será utilizado um Modelo Matemático (modelo estatístico) que se aproxima das características do Sistema, cuja resposta é $E(Y)$, o valor estimado de Y , sendo “b” o conjunto dos parâmetros. O objetivo do desenvolvimento matemático é determinar os parâmetros “b” de tal forma que a resposta $E(Y)$ do modelo matemático represente a resposta “Y” do sistema observado. Para que isso ocorra, a diferença entre as duas

respostas, que se chama “resíduo” $r = Y - E(Y)$ seja mínimo (no caso ideal seja igual a zero).

De acordo com o Teorema de Gauss, para obter esta condição o quadrado da diferença das respostas deve ser mínimo.

$$c = \sum [Y - E(Y)]^2 \rightarrow \min \quad (23)$$

ou

$$c = \sum [Y - f(b)]^2 \rightarrow \min$$

Diferenciando em relação ao parâmetro “b”, o critério será:

$$\frac{\partial c}{\partial b} \Big|_{b=\hat{b}} = 0 \quad (24)$$

O conjunto dos parâmetros \hat{b} , diferenciado através do circunflexo (^), é a “melhor estimativa” dos parâmetros “ β ” do sistema observado.

2.7.2.2 As Equações

Nas equações descritas a seguir são feitas as seguintes suposições:

- As equações relativas às observações são independentes no sentido estatístico. Na prática, isto significa que as medições são feitas de tal maneira que os parâmetros participam em cada equação de observação em diferentes combinações.
- O sistema é linear, isto é, o valor medido (o sinal medido) é uma função linear dos parâmetros “ β ” do sistema.
- A variância σ^2 das medições é comum.
- Cada medição é igualmente “importante”, não se faz qualquer distinção entre elas (Não se aplica ponderação).
- Não existe deriva do padrão durante as medições.

No caso de “n” medições e “k” parâmetros, o conjunto das equações do modelo estatístico é:

$$\begin{aligned}
 x_{11}b_1 + x_{21}b_2 + \dots + x_{k1}b_k &= E(Y_1) \\
 x_{12}b_1 + x_{22}b_2 + \dots + x_{k2}b_k &= E(Y_2) \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 x_{1n}b_1 + x_{2n}b_2 + \dots + x_{kn}b_k &= E(Y_n)
 \end{aligned}
 \tag{25}$$

Existe o conjunto das equações de observação na mesma forma, com os parâmetros verdadeiros de “ β ” e com os sinais de observação de “ Y ”. Pode-se provar que para se obter um sistema determinado, o número de observações tem que ser maior do que o número dos parâmetros, isto é, $n > k$.

Os fatores “ x ” são constantes, determinando como os parâmetros estão participando em cada medição. Fazendo comparações entre os padrões, os valores são geralmente “0” ou “1”, determinando se o parâmetro está participando na medição ou não. O mesmo conjunto de equações também pode ser expresso na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} x_{11} & x_{21} & \dots & x_{k1} \\ x_{12} & x_{22} & \dots & x_{k2} \\ \vdots & & & \vdots \\ x_{1n} & x_{2n} & & x_{kn} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E(Y_1) \\ E(Y_2) \\ \vdots \\ E(Y_n) \end{bmatrix}
 \tag{25M}$$

ou, na forma genérica:

$$\mathbf{X} * \mathbf{B} = \mathbf{E}(\mathbf{Y})$$

A função “ c ” de critério da melhor estimativa, substituindo-se os valores estimados de (25) em (23) é dada por:

$$c = \sum_{i=1}^n [Y_i - (x_{i1}b_1 + x_{i2}b_2 + \dots + x_{ik}b_k)]^2
 \tag{26}$$

ou na forma matricial:

$$C = (\mathbf{Y} - \mathbf{X} * \mathbf{B})^T (\mathbf{Y} - \mathbf{X} * \mathbf{B})
 \tag{26M}$$

(O quadrado da matriz pode ser obtido multiplicando-se a matriz pela sua transposta).

Derivando-se a equação (26) em relação a “ b ”, de acordo com a equação (24), temos:

$$\frac{\partial C}{\partial B} = X^T * X * B - X^T * Y \Big|_{B=\hat{B}} = 0$$

$$X^T * X * \hat{B} = X^T * Y \quad (27M)$$

O conjunto das equações representado pelo resultado (27M) na forma matricial, chama-se equações normais. Como a inversão de $X^T * X$ é possível, há uma solução inequívoca para os parâmetros:

$$\hat{B} = (X^T * X)^{-1} * X^T * Y \quad (28M)$$

Expressando-se as equações normais sob a forma de um conjunto das equações lineares, tem-se:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n (x_{li})^2 \hat{b}_1 + \sum_{i=1}^n (x_{li} * x_{2i})^2 \hat{b}_2 + \dots + \sum_{i=1}^n (x_{li} * x_{ki})^2 \hat{b}_k &= \sum_{i=1}^n x_{li} * Y_1 \\ \sum_{i=1}^n (x_{2i} * x_{li})^2 \hat{b}_2 + \sum_{i=1}^n (x_{2i})^2 \hat{b}_2 + \dots + \sum_{i=1}^n (x_{2i} * x_{ki})^2 \hat{b}_k &= \sum_{i=1}^n x_{2i} * Y_1 \\ : & \\ \sum_{i=1}^n (x_{ki} * x_{li})^2 \hat{b}_2 + \sum_{i=1}^n (x_{ki} * x_{2i})^2 \hat{b}_k + \dots + \sum_{i=1}^n (x_{ki})^2 \hat{b}_k &= \sum_{i=1}^n x_{ki} * Y_1 \end{aligned} \quad (27)$$

Geralmente, depende do problema a ser resolvido e da decisão do usuário qual fórmula usar. Pode-se substituir os valores diretamente na fórmula (28M) e executar a inversão para obter os valores do conjunto \hat{B} , porém é mais viável analisar as equações (27) e expressar os parâmetros para obter fórmulas gerais.

2.7.2.3 Método da Comparação

Neste tópico será analisado o processo de comparação entre padrões, medindo-se as diferenças que existem entre eles.

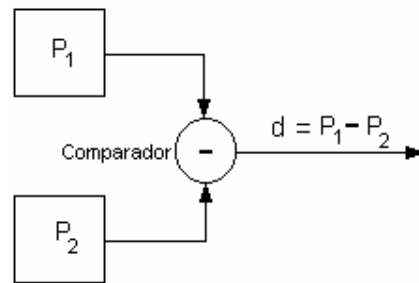


Figura 10: Comparação entre os padrões P_1 e P_2 (de domínio público)

Este método é utilizado por ser o mais exato. Com a finalidade de minimizar o erro sistemático existente em qualquer comparador, o método exige que se faça duas comparações: na primeira obtém-se $d = P_1 - P_2 + \varepsilon$, e na segunda inverte-se as posições dos padrões e se obtém $d' = P_2 - P_1 + \varepsilon'$. Normalmente ε e ε' têm o mesmo sinal e são da mesma ordem de grandeza. Portanto $P_1 - P_2 = [(d - d')/2] + (\varepsilon - \varepsilon')$.

Se o laboratório tem k padrões de mesmo valor, montam-se as seguintes possibilidades de comparações, que é representado abaixo na forma matricial (Figura 11).

	P_1	P_2	P_3	P_k
P_1		d_{12}	d_{13}	d_{1k}
P_2	d_{21}		d_{23}	d_{2k}
P_3	d_{31}	d_{32}		d_{3k}
° ° °				
P_k	d_{k1}	d_{k2}	d_{k3}	

Figura 11: Matriz 29M (de domínio público)

Na Matriz 29M da Figura 11, os elementos P_i 's são os padrões a serem comparados e d_i 's são as diferenças medidas na comparação. Considerando C_i 's os valores dos padrões P_i 's da matriz e aplicando o método dos mínimos quadrados, as diferenças são os Y_i 's observados e os valores C_i 's dos padrões são os parâmetros "b" a serem estimados.

Para facilitar a compreensão do método, será analisada uma comparação entre três padrões. Os resultados das seis comparações, de acordo com a matriz (Ihlenfeld, 1989).

$$C_1 - C_2 = d_{12}$$

$$C_1 - C_3 = d_{13}$$

$$C_2 - C_1 = d_{21}$$

$$C_2 - C_3 = d_{23}$$

$$C_3 - C_1 = d_{31}$$

$$C_3 - C_2 = d_{32}$$

Completando as equações acima e destacando-se as constantes “x” do sistema, de acordo com as equações (25), tem-se:

$$+1.C_1 - 1.C_2 + 0.C_3 = d_{12}$$

$$+1.C_1 + 0.C_2 - 1.C_3 = d_{13}$$

$$-1.C_1 + 1.C_2 + 0.C_3 = d_{21}$$

$$\cdot 0.C_1 + 1.C_2 - 1.C_3 = d_{23}$$

$$-1.C_1 - 0.C_2 + 1.C_3 = d_{31}$$

$$..0.C_1 - 1.C_2 + 1.C_3 = d_{32}$$

Na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{12} \\ d_{13} \\ d_{21} \\ d_{23} \\ d_{31} \\ d_{32} \end{bmatrix}$$

X B Y

Substituindo os valores nas equações normais (27):

$$+ 4.\hat{C}_1 - 2.\hat{C}_2 - 2.\hat{C}_3 = d_{12} + d_{13} - d_{21} - d_{31}$$

$$- 2.\hat{C}_1 + 4.\hat{C}_2 - 2.\hat{C}_3 = d_{21} + d_{23} - d_{12} - d_{32}$$

$$- 2.\hat{C}_1 - 2.\hat{C}_2 + 4.\hat{C}_3 = d_{31} + d_{32} - d_{13} - d_{23}$$

O somatório das três equações é igual a zero, o que significa que, somente com essas três equações as incógnitas em \hat{C} 's são indeterminadas. Fisicamente significa que

medindo somente as diferenças entre os padrões, seus valores não podem ser determinados. Para se determinar seus valores, numa comparação, será feita uma suposição de que a média dos padrões do banco de padrões é conhecida e constante, e pode ser obtida pela determinação da média dos valores estimados:

$$\bar{C} = \frac{C_1 + C_2 + C_3}{3} \approx \frac{\hat{C}_1 + \hat{C}_2 + \hat{C}_3}{3}$$

Re-arranjando as equações:

$$\begin{aligned} 3.\hat{C}_1 - (\hat{C}_1 + \hat{C}_2 + \hat{C}_3) &= \frac{1}{2}(d_{12} + d_{13} - d_{21} - d_{31}) \\ 3.\hat{C}_2 - (\hat{C}_1 + \hat{C}_2 + \hat{C}_3) &= \frac{1}{2}(d_{21} + d_{23} - d_{12} - d_{32}) \\ 3.\hat{C}_3 - (\hat{C}_1 + \hat{C}_2 + \hat{C}_3) &= \frac{1}{2}(d_{31} + d_{32} - d_{13} - d_{23}) \end{aligned}$$

Dividindo por três e reagrupando:

$$\begin{aligned} \hat{C}_1 &= \bar{C} + \frac{1}{6}(d_{12} + d_{13} - d_{21} - d_{31}) \\ \hat{C}_2 &= \bar{C} + \frac{1}{6}(d_{21} + d_{23} - d_{12} - d_{32}) \\ \hat{C}_3 &= \bar{C} + \frac{1}{6}(d_{31} + d_{32} - d_{13} - d_{23}) \end{aligned}$$

Da matriz (29M) e das três equações pode-se generalizar a seguinte regra para: \hat{C}_n para um banco constituído de k padrões:

$$\hat{C}_n = \bar{C} + \frac{1}{2k} \left(\sum_{i=1}^k d_{ni} - \sum_{i=1}^k d_{in} \right) \quad (28)$$

onde $d_{nn} = 0$ e k o número de capacitores padrão.

2.7.2.4 Comparação de um padrão com um banco de padrões

Normalmente, um laboratório de metrologia recebe padrões com mesmo nível de exatidão dos padrões do laboratório. A seguir, é descrito um método para a calibração destes tipos de padrões. Novamente por questão de facilidade, será tomado um banco

contendo três padrões, com valores C_1 , C_2 e C_3 e um elemento a calibrar C_0 . Novamente, faz-se duas medições trocando-se as posições dos padrões. As equações de observação são:

$$C_1 - C_0 = d_{10}$$

$$C_0 - C_1 = d_{01}$$

$$C_2 - C_0 = d_{20}$$

$$C_0 - C_2 = d_{02}$$

$$C_3 - C_0 = d_{30}$$

$$C_0 - C_3 = d_{03}$$

Completando as equações e destacando as constantes “x”, na forma matricial tem-se:

$$\begin{bmatrix} +1 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & +1 \\ 0 & +1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 & +1 \\ 0 & 0 & +1 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & +1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{10} \\ d_{01} \\ d_{20} \\ d_{02} \\ d_{30} \\ d_{03} \end{bmatrix}$$

X B Y

Substituindo nas equações normais (27):

$$2.\hat{C}_1 - 2.\hat{C}_0 = d_{10} + d_{01}$$

$$2.\hat{C}_2 - 2.\hat{C}_0 = d_{20} + d_{02}$$

$$2.\hat{C}_3 - 2.\hat{C}_0 = d_{30} + d_{03}$$

Somando as três equações:

$$2.[\hat{C}_1 + \hat{C}_2 + \hat{C}_3] - 6.\hat{C}_0 = d_{10} - d_{01} + d_{20} - d_{02} + d_{30} - d_{03}$$

Supondo que a média do grupo:

$$\bar{C} = \frac{C_1 + C_2 + C_3}{3} \approx \frac{\hat{C}_1 + \hat{C}_2 + \hat{C}_3}{3}$$

Seja conhecida e invariável tem-se:

$$\hat{C}_0 = \bar{C} - \frac{1}{6}[d_{10} - d_{01} + d_{20} - d_{02} + d_{30} - d_{03}]$$

Generalizando o resultado, supondo que há “k” unidades no banco e foram feitas duas medições em cada combinação temos:

$$\hat{C}_0 = \bar{C} - \frac{1}{2k} \sum_{i=1}^k [d_{i0} - d_{0i}] \quad (29)$$

2.8 CAPACITOR

Um conjunto de dois condutores, de formatos arbitrários, separados e carregados com cargas iguais e de sinais opostos, constitui um capacitor e cada um dos condutores é denominado armadura.

A capacitância de um capacitor é definida pela equação: $C = \frac{Q}{U}$. Onde Q é a carga elétrica armazenada no capacitor e U a diferença de potencial entre as armaduras. Um capacitor ideal cria uma defasagem de corrente em relação à tensão de um ângulo igual a $\pi/2$. No entanto, um capacitor, do ponto de vista físico, pode-se representar através dos esquemas abaixo. Não foram considerados, nesses esquemas, os problemas indutivos, que são desprezíveis para baixas frequências.

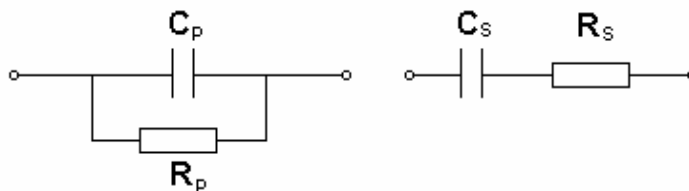


Figura 12: Modelo de Capacitor (do autor)

De acordo com a Figura 12, a defasagem de corrente em relação à tensão será menor que $\pi/2$.

2.8.1 Capacitor padrão

É uma medida materializada destinada a conservar ou reproduzir a unidade *farad* da grandeza Capacitância, para servir como referência [VIM, pg59 ref. 4]

2.8.1.1 Características de um Capacitor

A figura abaixo ilustra um capacitor na configuração de três terminais:

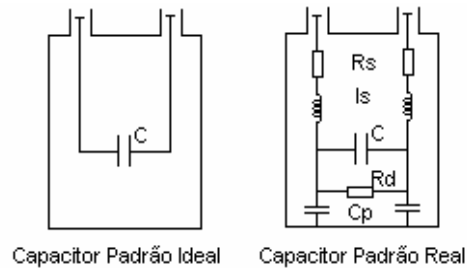


Figura 13: Esquema de um Capacitor Padrão (Catálogo do fabricante GenRad)

R_s - resistência de ligação;

L_s - indutância parasita;

R_d - resistência de isolamento do dielétrico;

C_p - Capacitância parasita.

O capacitor é colocado dentro de uma caixa metálica para blindá-lo. Essa blindagem isola o campo elétrico do capacitor da influência de campo elétrico externo. Normalmente essa caixa é aterrada.

Algumas características de um capacitor:

Fator de dissipação (D) é definido como $D = \operatorname{tg} \delta$, sendo $\delta = 90^\circ - \phi$, onde ϕ o ângulo de fase. Num capacitor padrão D deve ser muito baixo. Por exemplo, num capacitor padrão o valor de δ é da ordem de 10^{-5} radiano.

Coefficiente de temperatura é a indicação quantitativa da variação da capacitância com a temperatura. Normalmente é dada em $(\mu\text{F}/\text{F}) / ^\circ\text{C}$ ou $(\% / ^\circ\text{C})$. Por exemplo: Num capacitor padrão do tipo 1404 de 10 pF do fabricante General Radio, o coeficiente de temperatura é da ordem de $5 (\mu\text{F}/\text{F}) / ^\circ\text{C}$, que equivale a uma variação de $0,00005 \text{ pF} / ^\circ\text{C}$.

Estabilidade é a indicação quantitativa da variação da capacitância no tempo. Normalmente é dada em $(\mu\text{F}/\text{F})/\text{ano}$.

Tensão Máxima é a máxima tensão, em volt (V), que pode-se aplicar num capacitor.

Valores usuais de Capacitores Padrão: 1 pF, 10 pF, 100 pF, 1000 pF (ou 1 nF), 10 nF, 100 nF, 1000 nF (ou 1 μF).

2.8.1.2 Alguns tipos de Capacitores Padrão:

Capacitor Padrão modelo 1404 General Radio

É um capacitor constituído de placas paralelas e acondicionado dentro de um cilindro de alumínio e colocado sobre pressão com nitrogênio seco. Apresentado na configuração de 03 terminais (vide Figura 13).

Especificações:

- Valores: 10 pF, 100 pF, 1000 pF;
- Estabilidade ± 20 ($\mu\text{F}/\text{F}$)/ano;
- Coeficiente de Temperatura: - Capacitor de 10 pF : 5 ($\mu\text{F}/\text{F}$)/ $^{\circ}\text{C}$;
- Capacitor de 100 pF e 1000 pF: 25 ($\mu\text{F}/\text{F}$)/ $^{\circ}\text{C}$;
- Fator de Dissipação: $<10^{-5}$;
- Tensão Máxima: 750 V;

Capacitor Padrão modelo 1409 General Radio

É um capacitor cujo dielétrico é de mica. Pode ser conectado em 2 ou 3 terminais.

Especificações:

- Valores: 1 nF, 10 nF, 100 nF, 1000 nF;
- Estabilidade: $\pm 0,01\%$ /ano;
- Coeficiente de Temperatura: 35 ($\mu\text{F}/\text{F}$)/ $^{\circ}\text{C}$;
- Fator de Dissipação: $<0,0003$;
- Tensão Máxima: 500 V.

Capacitor Padrão modelo AH 11 A, Fabricante: Andeen Hagerling

É um capacitor cujo dielétrico é feito de sílica fundida. Pode ser conectado em 3 terminais.

Especificações:

- Valores: de 1 pF, a 100 pF;
- Estabilidade $\pm 0,3$ ($\mu\text{F}/\text{F}$) /ano;
- Coeficiente de Temperatura: 0,01 ($\mu\text{F}/\text{F}$)/ $^{\circ}\text{C}$;
- Fator de Dissipação: $<0,000003$;
- Tensão Máxima: 250 V.

2.8.2 Ponte de Medição de Impedância

Um grande número de medições necessita da utilização de aparelhos denominados “Pontes”, cujo princípio de funcionamento é o seguinte:

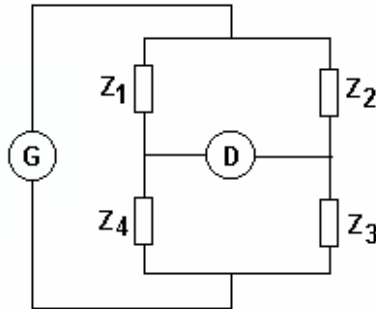


Figura 14: Ponte de Impedância (do autor)

As quatro impedâncias Z_1 , Z_2 , Z_3 , e Z_4 , formam um circuito, que é constituído por um gerador G e um detetor de zero D . Diz-se que a ponte está em equilíbrio quando nenhuma corrente passa por D . Nestas condições e após alguns cálculos obtém-se:

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_4}{Z_3} .$$

Se for considerado que Z_3 é uma impedância (Z_x) desconhecida e Z_2 um padrão

cujo valor é conhecido (Z_s), e $\frac{Z_1}{Z_2}$ uma relação $K = \frac{Z_1}{Z_2}$, por exemplo de um divisor

indutivo, tem-se: $Z_x = K * Z_s$.

2.8.2.1 Alguns tipos de Pontes de Capacitância:

Ponte de Capacitância – fabricante: Andeen-Hagerling; modelo: AH 2500A

Especificações:

- Frequência de operação: 1 kHz;
- Exatidão: 5 $\mu\text{F}/\text{F}$ (ou 3 $\mu\text{F}/\text{F}$ com Opção E);
- Estabilidade < (1 $\mu\text{F}/\text{F}$)/ano (ou (1 $\mu\text{F}/\text{F}$)/ano com Option E);
- Resolução: 0,5 attofarad (0,000 0005 pF) e 0,15 $\mu\text{F}/\text{F}$ (com Opção E);
- Coeficiente Temperatura (0,03 $\mu\text{F}/\text{F}/^\circ\text{C}$ (0,01 $\mu\text{F}/\text{F}/^\circ\text{C}$ com Opção E);
- Mede fator de dissipação extremamente baixo de: fator de dissipação de $\text{tg } \delta = 1,5 \times 10^{-8}$, a condutância de 3×10^{-7} nanosiemens ou a resistência até $1,7 \times 10^6$ gigaohms;
- Conexões a BNC três terminais;
- Autoranging e Interface IEEE-488 and RS-232.

Ponte de Capacitância – fabricante: General Radio; modelo: 1621

Especificações:

- Frequência de operação: 10 Hz a 100 kHz;
- Exatidão: 10 $\mu\text{F}/\text{F}$ na faixa de 1pF a 1000pF na frequência de 1 kHz e $>50 \mu\text{F}/\text{F}$ para outros valores e outras frequências; Pelo método da comparação é possível obter uma exatidão melhor que as indicadas acima utilizando capacitores cujos V_{vc} são conhecidos com incertezas da ordem de 1 $\mu\text{F}/\text{F}$.
- Medição na Configuração de três terminais;

Ponte RLC – fabricante: Quad Tech; modelo: 1689.

Especificações:

- Frequência de operação: 12 Hz a 100 kHz;
- Exatidão básica: 0,02%
- Medição na Configuração de três ou quatro terminais;
- Mede capacitância, indutância, resistência em AC, fator de dissipação.
- Faixa de medição: (R até 100 $\text{M}\Omega$); (C até 1 F); (L até 100 kH).

2.9 A CADEIA DE RASTREABILIDADE DA UNIDADE DE CAPACITÂNCIA

A figura 15 é a reprodução da cadeia de rastreabilidade da Figura 05, especificamente para a unidade de capacitância.

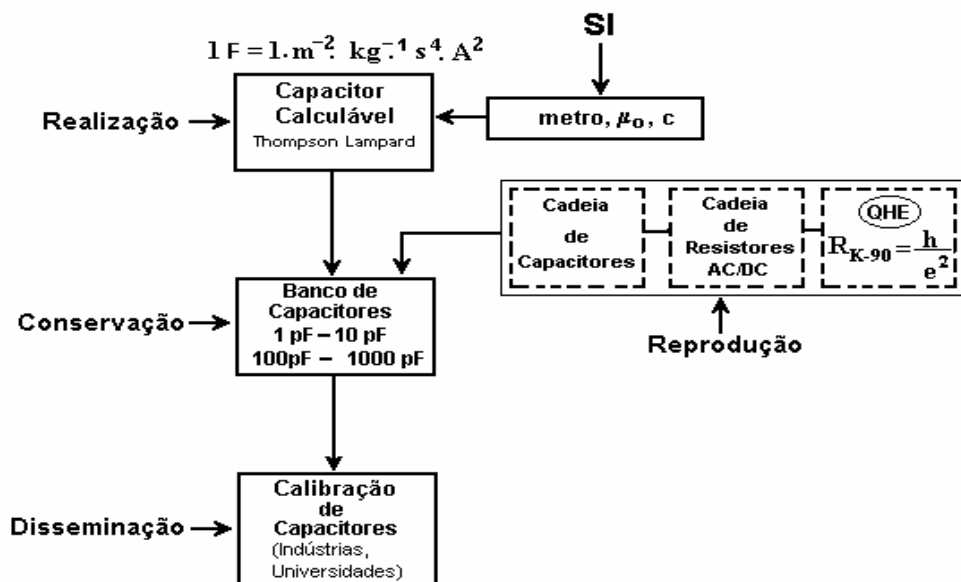


Figura 15: Rastreabilidade do “farad ao SI” (do autor)

2.10 CONFIABILIDADE METROLÓGICA (NBR ISO/IEC 17025)

Para se atingir a confiabilidade em todo o processo de rastreabilidade da unidade “farad”, será utilizado como guia a norma NBR ISO/IEC 17025 (2001). Serão explorados os itens 5.2 (Pessoal), 5.3 (Acomodações e condições ambientais), 5.4 (Métodos de calibração), 5.5 (Equipamentos), 5.6 (Rastreabilidade) e 5.9 (Garantia da qualidade de resultados de calibração).

CAPÍTULO 3

MÉTODO DE PESQUISA

3.1 - FASES DA PESQUISA E SEUS RESULTADOS

Neste capítulo será apresentado o processo de pesquisa que será utilizado ao longo do desenvolvimento da dissertação, as fases da pesquisa e a metodologia utilizada para se atingir os resultados.

A Primeira Fase é constituída pela pesquisa bibliográfica. Foi realizada uma pesquisa bibliográfica de assuntos relacionados à rastreabilidade das medições, partindo dos conceitos de medição, calibração e rastreabilidade das medições. Em seguida foram descritas teorias relativas à determinação de incerteza e a um processo de manutenção de unidades físicas elétricas num laboratório. E finalmente, a citação dos principais itens da norma ISO/IEC 17025 que serão utilizados no levantamento das hipóteses.

A pesquisa desta fase é do tipo exploratória. Foram pesquisados livros, artigos científicos, publicações de instituições nacionais e internacionais.

A finalidade desta fase da pesquisa foi adquirir fundamentação teórica para a solução do problema proposto.

A Segunda Fase tem início com a formulação do problema “Dificuldades na execução da rastreabilidade da unidade de capacitância com confiabilidade metrológica”. Foi necessária a determinação exata do problema para se evitar a dispersão de idéias durante os desenvolvimentos dos trabalhos.

A pesquisa desta fase é do tipo exploratória. O método utilizado é qualitativo, pois a definição do problema foi estabelecida a partir de uma reflexão das experiências adquiridas no Laboratório de Capacitância e Indutância.

A Terceira Fase: Identificação das variáveis que influenciam no Processo da Rastreabilidade.

É uma pesquisa exploratória e em alguns momentos uma pesquisa explicativa. Nesta fase serão construídas as hipóteses que irão sugerir algumas explicações, tanto qualitativas quanto quantitativas, dos fatos que irão indicar a solução do problema. Esta fase será dividida em etapas que são:

Primeira Etapa: Descrição da localização e condições ambientais do Laboratório de Capacitância e Indutância – Lacin.

Com a descrição física do laboratório será feito o levantamento das variáveis relacionadas ao ambiente que influenciam no processo de medição tais como, temperatura e umidade relativa do ar.

Segunda Etapa: Padrões de Referência.

Será feito um levantamento de todas as transferências de unidade de capacitância realizadas durante a existência do laboratório, por um período de aproximadamente 20 anos, e das manutenções realizadas. O objetivo deste levantamento é determinar a variável estabilidade temporal para cada valor de capacitor.

A pesquisa desta etapa é exploratória.

Terceira Etapa: Método de Calibração e Determinação de Incerteza.

Nesta etapa serão descritos os métodos de calibração utilizados no processo da transferência e da manutenção da unidade de capacitância. Serão também descritas outras variáveis oriundas dos instrumentos de medição e da própria medição, tais como, resolução do instrumento de medição e a repetitividade.

A finalidade desta etapa é compor todas as variáveis quantitativas que influenciam no processo de rastreabilidade através da determinação de incerteza de medição.

A pesquisa nesta etapa é do tipo Explicativa.

Quarta Etapa: Comparação Interlaboratorial

O método aplicado nesta etapa será quantitativo e será uma pesquisa exploratória. Esta etapa é necessária para verificar a confiabilidade do processo de rastreabilidade aplicado no Lacin. O procedimento para se determinar a confiabilidade será através da determinação do erro normalizado. O conceito teórico será descrito no Capítulo 4 para facilitar a sua compreensão.

Quinta Etapa: Recursos Humanos

O método aplicado nesta etapa será qualitativo e será uma pesquisa exploratória. A pesquisa da influência do recurso humano será elaborada montando-se um diagrama de causa e efeito, tomando-se as seguintes principais causas como o princípio da pesquisa: a medida, a mão de obra, o meio ambiente, a máquina e o método.

Esta etapa tem a finalidade de determinar quais são as causas provenientes dos recursos humanos que causam a falta de confiabilidade metrológica no processo de rastreabilidade.

Quarta Fase: Análise do nível atual de confiabilidade metrológica do laboratório. Uma Aplicação Prática.

Nesta fase será analisado o nível de confiabilidade metrológica do processo de rastreabilidade atual, através da análise do último processo de rastreabilidade realizado em dezembro de 2002. Serão apresentadas todas avaliações experimentais dos processos descritos no Capítulo 4.

Esta fase será dividida em três etapas, a saber:

1ª Etapa: Transporte

Quando há muita deriva nos valores dos capacitores de referência o laboratório necessita rastrear a unidade de capacitância, isto é, necessita calibrar os padrões no organismo internacional, que é o BIPM.

A primeira providência a ser tomada é a escolha dos capacitores mais estáveis do laboratório. Nesta última calibração, no BIPM, foram calibrados três capacitores do fabricante Andeen Hagerling, modelo AH11A, nos valores de 1 pF, 10 pF e 100 pF.

Em seguida há a necessidade de compará-los com os bancos de capacitores antes de transportá-los para o BIPM. Essa operação é realizada também no retorno ao laboratório. A justificativa desse processo é para verificar se houve algum incidente durante o transporte.

Normalmente o traslado de ida e volta é feita cuidadosamente por um técnico do laboratório.

O método de comparação será apresentado no capítulo 4, e a avaliações experimentais apresentadas nesta fase.

2ª Etapa: Método de Calibração e Determinação de Incerteza

Nesta etapa será inicialmente apresentada a transferência dos valores dos capacitores calibrados aos Bancos de Capacitores de 10 pF, 100 pF e 1000 pF. Em seguida será também apresentada a manutenção dos Bancos, realizadas três meses após a transferência.

3ª Etapa: Comparação Inter-laboratorial promovida pelo SIM

A avaliação final será feita através de uma comparação interlaboratorial promovida pelo Sistema Interamericano de Metrologia – SIM / BIPM. Porém não poderá ser apresentada nesta dissertação porque esta comparação está agendada para o início de setembro de 2004.

Para uma avaliação final será apresentada *uma estimativa* do nível de confiabilidade através de uma comparação indireta.

Em novembro de 2003 o Inmetro adquiriu uma Ponte de Capacitância modelo 2700A do fabricante Andeen Hagerling. Serão calibrados dois capacitores, um de 10 pF e outro de 100 pF, por dois processos, inicialmente utilizando-se essa Ponte e em seguida comparando-se com os capacitores dos Bancos, com o objetivo de se estimar os erros cometidos pelo Lacin.

O termo “estimativa” foi utilizado porque o laboratório de calibração do fabricante não é reconhecido pelo sistema MRA (Mutual Recognition Arrangement) do BIPM, embora seus padrões de referência estejam rastreados ao National Physics Laboratory da Inglaterra.

Quinta Fase: Proposta de mudanças para melhorar a confiabilidade metrológica do Laboratório de Capacitância, em curto, médio e longo prazo.

A Sexta Fase: Conclusão e Sugestões.

3.2 - RESUMO DAS FASES DA PESQUISA

O quadro a seguir mostra um resumo das fases e suas etapas, o tipo de pesquisa, os procedimentos e o motivo da realização de cada fase.

QUADRO 3.1 – Resumo das Fases da Pesquisa (do autor)

Fases da Pesquisa	Tipo de Pesquisa	Método e procedimentos Técnicos	Justificativa
1ª FASE Pesquisa Bibliográfica.	Exploratória.	Método Qualitativo A Pesquisa foi realizada em livros, artigos, Internet, etc.	Fundamentação Teórica
2ª FASE Formulação do Problema.	Exploratória.	Método Qualitativo A Pesquisa foi realizada através da análise da situação atual no laboratório.	Necessidade de atingir a confiabilidade metrológica.
3ª FASE –Capítulo 4 -Identificação das variáveis que influenciam no Processo da Rastreabilidade.			
1ª Etapa Localização e Condições Ambientais do laboratório.	Exploratória.	Método Quantitativo Serão realizadas as medições de temperatura e umidade relativa do ar e análises de suas influências.	Determinação das variáveis de influência devida à temperatura e umidade relativa do ar.
2ª Etapa Padrões de Referência.	Exploratória.	Método Quantitativo A pesquisa será realizada através de um levantamento de dados do laboratório.	Determinação da variável de influência relativa à estabilidade dos capacitores padrão.
3ª Etapa Método de Calibração e Determinação de Incerteza de Medição	Explicativa.	Método Quantitativo Serão descritos os métodos de calibração nos processos de transferência e de manutenção da unidade de capacitância, e determinação das incertezas.	Determinação das variáveis de influências relativas à medição, tais como resolução e repetitividade. Composição das variáveis através da determinação da incerteza.

Fases da Pesquisa	Tipo de Pesquisa	Método e procedimentos Técnicos	Justificativa
4ª Etapa Comparação laboratorial	Exploratória	Quantitativo	Verificação da confiabilidade metrológica do processo de rastreabilidade.
5ª Etapa Recursos Humanos	Exploratória.	Método Qualitativo. Procedimento: Pesquisa da influência do recurso humano no processo de rastreabilidade através do diagrama de causa e efeito.	Determinação das variáveis de influência relativa a competência do pessoal técnico..
4ª FASE Capítulo 5 Análise do nível atual de confiabilidade metrológica do laboratório. Uma Aplicação Prática.			
1ª Etapa Transporte	Descritiva	Método Quantitativo Medição do capacitor itinerante antes e depois da calibração no BIPM.	Verificar se houve algum incidente no transporte que possa ter danificado o capacitor itinerante.
2ª Etapa Método de Calibração e Determinação de Incerteza.	Descritiva	Método Quantitativo Transferência e manutenção da unidade farad através da calibração dos capacitores dos bancos.	Composição de todas as variáveis de influência.
3ª Etapa Comparação Inter-laboratorial promovida pelo SIM	Exploratória	Método Quantitativo Calibração de dois capacitores padrão um de 10 pF e outro de 100 pF	Determinação do nível atual de confiabilidade metrológica do laboratório.
5ª FASE – Capítulo 6: Proposta de Mudanças para melhorar a confiabilidade metrológica do laboratório de Capacitância, em curto, médio e longo prazo.			
6ª FASE – Capítulo 7. Conclusões e Sugestões			

3.3 - AS LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Embora o diagrama de rastreabilidade do laboratório mostre a rastreabilidade de todos os instrumentos do Lacin, nesta dissertação será estudada apenas a rastreabilidade dos padrões de referência.

A pesquisa restringiu-se a calibração dos capacitores na frequência de 1 kHz. Porém poderá ser estendida para frequência na faixa de 50 Hz a 10 kHz.

CAPÍTULO 4

IDENTIFICAÇÃO DAS VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM O PROBLEMA

INTRODUÇÃO

Nesta fase da pesquisa serão construídas as hipóteses que irão sugerir algumas explicações dos fatos que irão solucionar o problema.

Serão identificadas as prováveis variáveis que introduzem erros sistemáticos e aleatórios que interferem em cada passo do processo de rastreabilidade das calibrações dos instrumentos de medição de capacitância, ou seja, no processo de rastreabilidade da unidade de capacitância “farad”.

Algumas variáveis, como será mostrado, impedem completamente a realização das medições, outras introduzem erros sistemáticos que podem ser corrigidos, e finalmente as que introduzem incertezas nas medições que podem ser determinadas.

4.1 - DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE RASTREABILIDADE

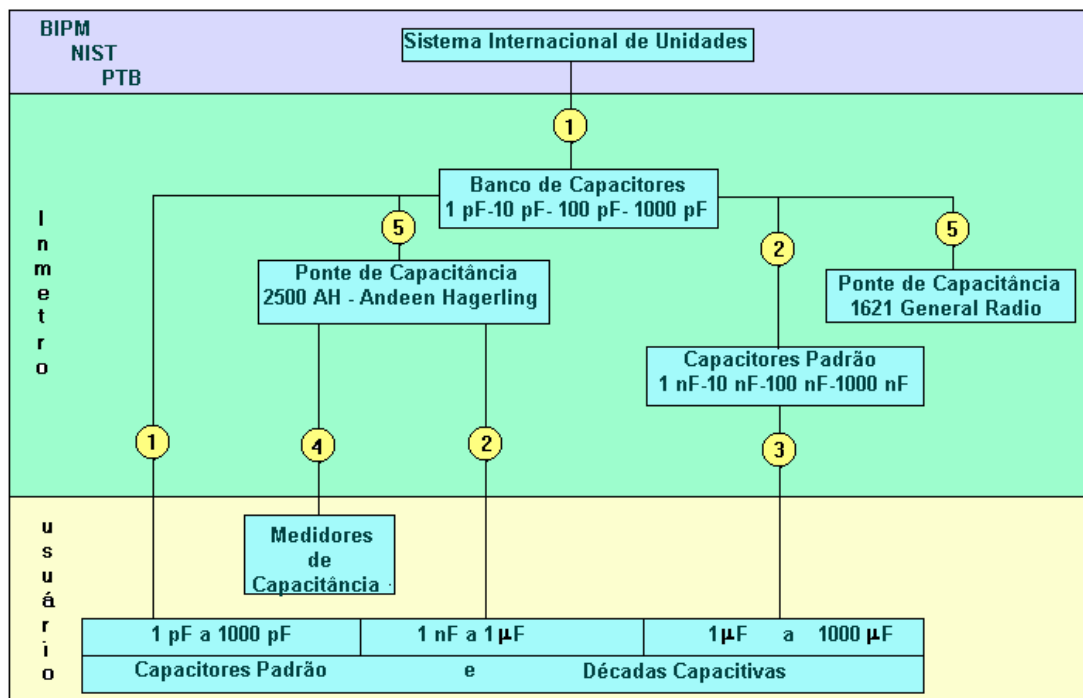
Complementando o conceito de rastreabilidade, visto no item (2.5), é importante observar que um dos principais fatores que influenciam na exatidão das medições de uma determinada grandeza é a exatidão do instrumento de medição. O meio de avaliar a exatidão de um instrumento é compará-lo com um instrumento com maior exatidão. Esse processo é denominado na metrologia como sendo calibração.

O padrão utilizado numa calibração deve estar calibrado, por meio de comparação, com um padrão com exatidão ainda maior e, assim sucessivamente. Esse processo de relacionar um resultado de medição ou um valor de um padrão, por meio de uma cadeia ininterrupta de calibrações até um padrão primário é conhecido como rastreabilidade.



Figura 4.1 – Cadeia de Rastreabilidade (de domínio público)

A Figura 4.1 mostra um modo de representação de uma cadeia de rastreabilidade. O comprimento da base do triângulo equilátero e as bases dos trapézios equivalem simbolicamente às incertezas declaradas em cada estágio da cadeia de rastreabilidade.



- 1 - Método por Comparação utilizando a Ponte 1621 Gen Rad ou por substituição utilizando a Ponte 2500A AH
- 2 - Medição direta utilizando a Ponte 2500A Andeen Hageling
- 3 - Método por Comparação utilizando a Ponte de Relação
- 4 - Método por Substituição utilizando uma Década capacitiva e a Ponte 2500A da AH
- 5 - Ajuste

Figura - 4.2 – Diagrama de rastreabilidade do Lacin (do autor)

Como o Lacin não realiza a unidade de capacitância, porque não possui padrão primário é necessário calibrar seus capacitores padrão no BIPM ou nos laboratórios de Institutos Nacionais de Metrologia internacionalmente reconhecidos tais como PTB da Alemanha, NIST dos Estados Unidos, NPL do Reino Unido e BNM da França. Estes laboratórios realizam a unidade através do Capacitor Thompson Lampard ou reproduzem-na através do rastreamento à unidade de Resistência gerada pelo Efeito Hall Quântico.

A figura 15, do Capítulo 2, mostra a cadeia de rastreabilidade da unidade de capacitância. A Figura 4.2 mostra todo o processo de rastreabilidade do Lacin.

4.2 O processo da realização da rastreabilidade da unidade farad no lacin

O processo de rastreabilidade da unidade farad inicia-se quando se é detectada elevada variação nos valores dos capacitores dos bancos, causando muitas vezes a indefinição da unidade farad, de acordo com as incertezas estabelecidas pelo Lacin. Outra forma de verificar se está havendo a indefinição é através de comparações interlaboratoriais realizadas pelo SIM (Sistema Interamericano de Metrologia) ou através de comparações, normalmente bilaterais, com NMIs tais como, PTB, INTI, e outros, vide Figura 4.3.

O segundo passo é a tomada de providência administrativa, que consiste na escolha do laboratório no qual os capacitores padrão viajantes serão calibrados, a solicitação do orçamento, exportação temporária e a liberação alfandegária.

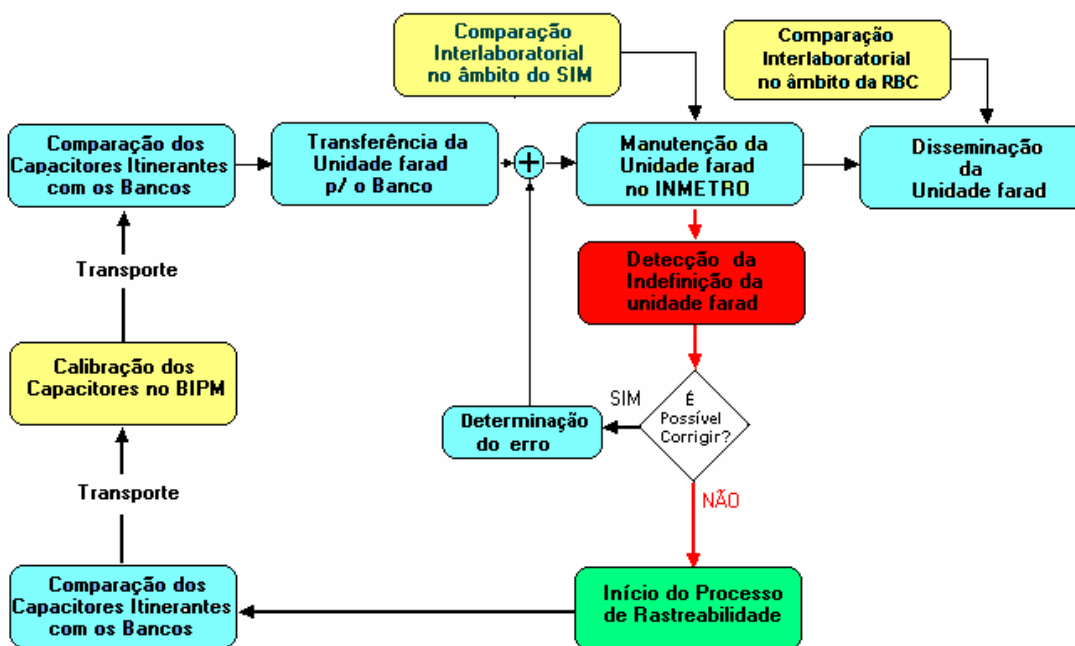


Figura 4.3 – Fluxo do Processo de Rastreabilidade do Lacin (do autor)

O terceiro passo consiste na escolha dos capacitores viajantes que serão enviados para a calibração. Serão escolhidos os capacitores que se mantiveram mais estáveis ao longo do tempo.

O passo seguinte desse ciclo é realizar a comparação dos capacitores viajantes com os capacitores dos bancos na relação de 1:1 ou de 1:10. Após o retorno do BIPM deverá ser feito o mesmo procedimento. O motivo deste procedimento é para verificar se no transporte houve algum incidente que tenha causado alguma variação nos valores dos capacitores que conseqüentemente invalidaria a calibração.

Após a calibração no BIPM é feita a transferência dos valores dos capacitores viajantes para os bancos através do método de comparação ou de substituição. Transferência de valores é a realização da calibração dos capacitores dos bancos tendo como referência os capacitores viajantes calibrados no BIPM.

Após a transferência todos os valores dos capacitores dos bancos estarão com a unidade de capacitância farad compatível com a unidade utilizada em qualquer parte do mundo.

O último passo, que é realizado ao longo do período entre as calibrações, é a manutenção da unidade, descrita no capítulo 2, item 2.7.

4.3 - DESCRIÇÃO DAS VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM NO PROCESSO DA RASTREABILIDADE

Nesta seção são descritas as variáveis que influenciam no processo da rastreabilidade, isto é, variáveis que dificultam a obtenção da confiabilidade metrológica no processo da rastreabilidade.

Como mostra a Figura - 4.4, as variáveis que influenciam no processo da rastreabilidade são: o transporte, as condições ambientais, os recursos humanos, Padrões de Referência, e o método de calibração.

No item 4.3.1 será feita uma descrição de cada um destes fatores e variáveis que influenciam nesse processo.

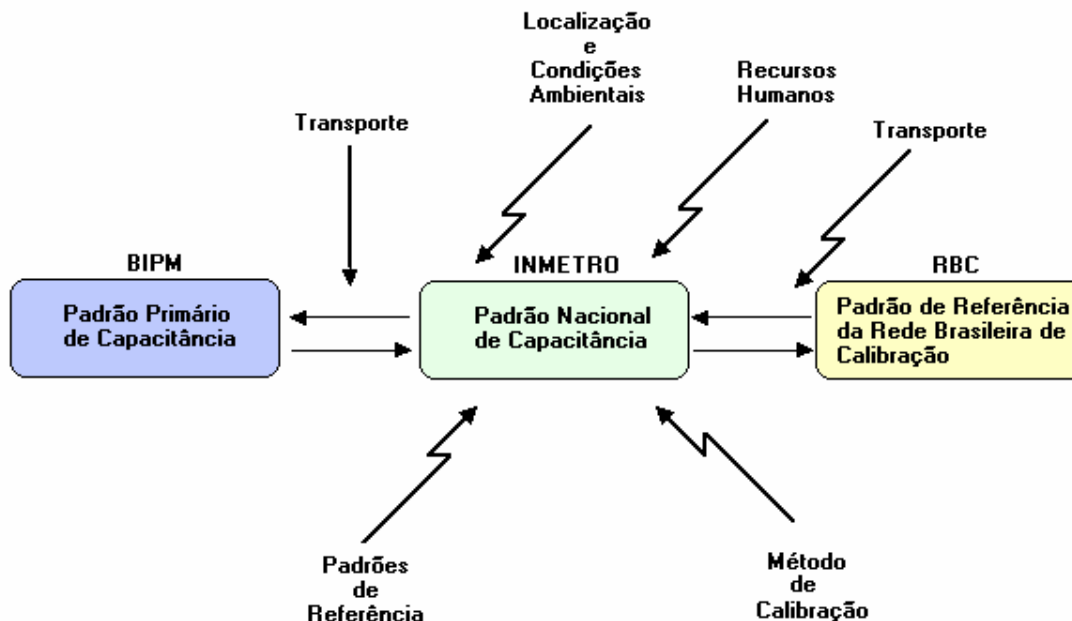


Figura 4.4 – Variáveis que influenciam no Processo da rastreabilidade. (do autor)

4.3.1 - Localização

A concepção de um laboratório de calibração deve ser estabelecida sob uma análise detalhada das necessidades existentes ou previsíveis da grandeza física considerada dentro do domínio da metrologia. Esta análise deve permitir a definição exata de um conjunto de necessidades a serem satisfeitas, tais como: a grandeza física de interesse, a faixa de medição e a incerteza de medição, número de equipamentos a calibrar, equipamentos existentes, a faixa de frequência da calibração e etc.

Os laboratórios do Inmetro estão localizados no município de Duque de Caxias, no sub-distrito de Xerém, no “km 22,5” da Rodovia Washington Luís, Rio de Janeiro.

Este local foi escolhido por estar distante dos grandes centros populacionais e das indústrias para se evitar vibrações e poluições eletromagnéticas.

A foto da figura - 4.5 mostra os laboratórios das Divisões de Metrologia Elétrica, Mecânica, Óptica, Térmica, Química e Acústica e Vibração que pertencem à Diretoria de Metrologia Científica e Industrial.

O laboratório onde se realizam as atividades relativas às medições de capacitância ocupa uma sala com 27,36 m² dentro do edifício da Divisão de Metrologia Elétrica (Figura 4.6).



Figura 4.5 – Vista do campus do Inmetro com o complexo de Laboratórios da Diretoria de Metrologia Científica e Industrial



Figura 4.6 – Divisão de Metrologia Elétrica

4.3.2 – Condições Ambientais

4.3.2.1 - Temperatura

Como pode-se observar na Figura 4.7, as laterais do edifício são cobertas com terra para evitar que os raios solares incidam diretamente nas paredes. Além disso, as paredes dos

laboratórios e do edifício estão separadas por um corredor denominado “Corredor de Isolação” por onde correm cabos elétricos.



Figura 4.7 - Vistas do Prédio da Divisão de Metrologia Elétrica

Em cada edifício, os laboratórios são montados em estruturas de concreto, com paredes independentes e separadas por uma camada de lã de vidro. O acesso ao ambiente principal do laboratório só é possível através da passagem por uma ante-sala. Os ambientes são desprovidos de janelas.

A escolha da temperatura ambiente foi de 23 °C devido a maior facilidade de controle e por ser uma temperatura que causa um bem estar aos técnicos em qualquer estação do ano. Em geral a temperatura ambiente dos NMIs dos países nas quais o Lacin calibra seus padrões, mantém a temperatura de 23 °C em seus laboratórios.

A termo-regulação de um laboratório primário de metrologia deve ser a princípio de $\pm 0,5$ °C, suficiente para a maioria dos instrumentos. Essa variação porém, é uma variável considerada fundamental na calibração de capacitores padrão que possuem coeficientes elevados de temperatura, da ordem de $(5 \mu\text{F}/\text{F})/^{\circ}\text{C}$. Essa variável será representada por $V_{\Delta T}$.

O abrir e fechar da porta de acesso ao laboratório, o descontrole do sistema de ar condicionado, a permanência de muitos técnicos no laboratório pode causar variações de temperatura. Essas variações não são sentidas imediatamente pelos capacitores devido a inércia que os corpos tem à variação da temperatura. Para controlá-los os padrões de referência foram colocados em recipientes isolados termicamente. Esses recipientes são caixas de alumínio forradas com isopor.

O Lacin possui três recipientes desse tipo, cada um contendo cinco capacitores de mesmo valor, de 10 pF, de 100 pF e de 1000 pF.



Figura 4.8 – Recipiente Termostático

Para verificar a estabilidade da temperatura do laboratório foi feita uma série de medições da temperatura ambiente e dentro dos recipientes durante um período dez dias, incluindo sábado e domingo.

Metodologia

Mediu-se a temperatura interna de um dos recipientes com capacitores no período de 21 de outubro a 31 de outubro de 2003 com um termômetro de líquido em vidro e com um termômetro digital ligado a um registrador gráfico. Simultaneamente, foram registradas a temperatura e a umidade relativa do ar do ambiente com um termohigrógrafo.

Instrumento	Identificação	Instrumento	Identificação
1- Termômetro Digital	Lacin 152/99	4- Registrador Gráfico	Lacin 05/99
2- Termômetro de Líquido em Vidro		5- Termohigrógrafo	
3- Termohigrômetro:	Lacin15/99		

Tabela 4.1 Relação dos Equipamentos utilizados para medir temperatura. (do autor)

Embora a exatidão do registrador e do termohigrógrafo seja baixa, a função destes é registrar os dados durante o período fora do expediente de trabalho dos técnicos, com a finalidade de registrar apenas a variação de temperatura.

Resultados

A tabela -4.1 indica a variação da temperatura interna do recipiente com os capacitores.

Dia da Semana	Data	Horário		T _v (°C)
		(h)	(min)	
Terça	21	15	0	22,15
		16	15	22,15
		17	20	22,10
Quarta	22	9	24	22,20
		12	10	22,20
		14	24	22,20
Quinta	23	9	30	22,00
		10	50	22,30
		16	0	22,35
Sexta	24	8	0	22,00
		11	0	22,10
		12	30	22,20
		14	10	22,30
		15	40	22,25
		16	30	22,30
Sábado*	25	12	45	22,10

Dia da Semana	Data	Horário		T _v (°C)
		(h)	(min)	
Segunda*	27	15	0	22,15
		8	25	22,15
Terça	28	13	14	22,40
		13	50	22,50
Quarta	29	8	15	22,20
		11	22	22,40
		14	21	22,40
Quinta	30	15	18	22,40
		8	10	22,25
		10	10	22,30
Sexta	31	13	43	22,40
		16	0	22,40
		8	10	22,25
		12	25	22,30
		14	45	22,30
		16	0	22,30

T_v – A temperatura indicada no termômetro de líquido em vidro.

*Feriado

Tabela 4.2 Temperatura Interna do recipiente. (do autor)

De acordo com os dados da tabela 42, estima-se uma média: 22,24 °C ± 0,03 °C, com Valor Máximo: 22,50 °C e Valor Mínimo: 22,00 °C.

A estabilidade de temperatura $\delta(T)$ pode ser determinada pela expressão:

$$d(T) = \frac{T_{Máx.} - T_{Mín}}{2} = \frac{22,5 - 22,0}{2} = 0,25^\circ C$$

O registro obtido do registrador gráfico neste período indica que a deriva de temperatura durante o período entre 16h e 8h do dia posterior não é superior a 0,1 °C (O registro está disponível nos arquivos do Lacin).

Através dos registros obtidos do termohigrógrafo, nesse mesmo período, estima-se que a temperatura média do ambiente foi de 22,5 °C, com Valor Máximo de 23,2 °C e Valor Mínimo de 21,5 °C.

Conclusão

A partir dos dados acima deve-se, ao utilizar os capacitores dos bancos, estimar uma incerteza na temperatura internas dos capacitores de 0,25 °C. Portanto a variável devida a temperatura $V_{\Delta T}$ será: $d(\Delta T) = \pm 0,25^\circ C$

Para manter controlada a variável $V_{\Delta T}$, ficou estabelecida que durante o período de calibração é permitida no máximo a permanência de quatro técnicos simultaneamente no laboratório. Essa quantidade de técnicos foi determinada empiricamente.

O controle e o registro da temperatura interna dos bancos serão feitos 24 horas antes, durante e 24 horas após qualquer calibração.

Num futuro bem próximo o laboratório irá montar um sistema em que os capacitores ficarão imersos em banho, de óleo ou ar, com temperatura controlada.

Este sistema já é utilizado por laboratórios como BIPM e NIST.

Influência da Variável V_{DT} na Calibração de Capacitores

A variável $V_{\Delta T}$, citado no item anterior., influencia diretamente na medição do capacitor.

Na maioria dos NMI's a temperatura de medição de capacitância é 23 °C, portanto, todos os valores de capacitância são corrigidos para essa temperatura.

O valor da capacitância varia com a temperatura de acordo com a expressão:

$$C(T) = C(T_{23}) \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad [4.1]$$

sendo:

$\Delta T = (T - T_{23})$ – variação de temperatura;

T – temperatura final;

T_{23} temperatura de referência;

$C(T)$ - o valor da capacitância à temperatura T;

$C(T_{23})$ - o valor do capacitor à temperatura T_{23} ;

α - o coeficiente de temperatura específico de um capacitor padrão;

Considerando a equação 4.1, a influência da variável $V_{\Delta T}$ é dada por:

$$\delta C_T = \alpha \cdot C(T_{23}) \cdot \delta(\Delta T) \quad [4.2]$$

A variável $V_{\Delta T}$, corresponde a ΔT , cujo valor estimado é: $\delta(\Delta T) = \pm 0,25$ °C, na equação [4.2].

10 pF	α pF / °C	δC_T (\pm)pF	100 pF	α pF / °C	δC_T (\pm)pF	1000 pF	α pF / °C	δC_T (\pm)pF
A3	3,0E-05	7,5E-06	A2	1,62E-04	4,0E-05	A1	2,00E-03	5,0E-04
B3	5,4E-05	1,3E-05	B2	3,17E-04	7,9E-05	B1	2,45E-03	6,1E-04
C3	4,0E-05	9,9E-06	C2	2,79E-04	7,0E-05	C1	2,90E-03	7,3E-04
D3	5,1E-05	1,3E-05	D2	2,62E-04	6,6E-05	D1	2,73E-03	6,8E-04
E3	3,6E-05	8,9E-06	E2	2,93E-04	7,3E-05	E1	2,60E-03	6,5E-04

Tabela 4.3 – Influência da variável V_{DT} no valor da capacitância. (do autor)

Sendo:

A1, B1, C1, D1 e E1 são as identificações dos capacitores padrão do Banco de 1000 pF.

A2, B2, C2, D2 e E2 são as identificações dos capacitores padrão do Banco de 100 pF.

A3, B3, C3, D3 e E3 são as identificações dos capacitores padrão do Banco de 10 pF.

α é o coeficiente de temperatura do capacitor.

δC_T a influência da variação da temperatura nos capacitores.

4.3.2.2 – Umidade Relativa do ar

A umidade no laboratório é também uma variável, que será representada por V_{UR} , que interfere nas medições. A umidade elevada interfere em instrumentos que possuem chaves mecânicas causando oxidações nos contatos elétricos. Um dos principais comparadores de capacitores do Lacin, a Ponte de Capacitância, modelo 1621, fabricante General Radio, é freqüentemente afetado por esse problema. Se esta variável estiver presente, ela impossibilita a operação do equipamento.

Não existem normas para a umidade relativa do ar para laboratório primário de padronização.

Para verificar o comportamento da umidade no laboratório foi feita uma série de medições.

Metodologia

A umidade relativa do ar do laboratório foi medida simultaneamente à medição de temperatura ambiente utilizando-se o termohigrógrafo, no período de 21 de outubro a 31 de outubro de 2003.

Resultado

Através dos registros obtidos do termohigrógrafo, obteve-se para a umidade relativa do ar um Valor Máximo de 60% e um Valor Mínimo 47%.

Como foi dito V_{UR} é uma variável que, na sua presença, a calibração torna-se impossível, pois causa oxidações em instrumentos que possuem chaves susceptíveis à umidade.

Conclusão

Para manter a variável V_{UR} controlada, dever-se-á reduzir a umidade relativa do ar para valores entre 40% a 50%, e controlá-lo sistematicamente por um período indeterminado. Deverá também ser realizada uma manutenção preventiva das chaves mecânicas da Ponte de Capacitância 1621.

Uma outra solução é a substituição da Ponte de Capacitância 1621 pela Ponte de Capacitância Digital, modelo 2500A ou por ponte também digital, modelo 2700A, fabricadas pela Andeen Hagerling. Porém, existe uma limitação na utilização dessas pontes porque não há a possibilidade de se realizar a comparação de 1:10 e de 10:1, fundamental na realização da escala da unidade.

Para contornar o problema citado, atualmente está em fase de projeto e montagem de uma Ponte de maior exatidão e sem chaves mecânicas. O término da montagem e teste está previsto para julho de 2004.

4.3.3 – Padrões de Referência

No início dos anos noventa O lacin adquiriu, através do Projeto de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - PADCT, um conjunto de Capacitores e Indutores Padrão e Pontes de Medição de altíssima exatidão, que ainda estão sendo utilizados no laboratório.

Após esse projeto alguns equipamentos foram adquiridos através dos recursos do Inmetro, com o objetivo de reduzir a incerteza de medição do laboratório.

Um resumo da descrição desses equipamentos já foi feito no Capítulo 2, seção 2.8.

A seguir será feita uma descrição dos capacitores padrão para determinar as variáveis que interferem numa calibração.

O Lacin possui um conjunto de Capacitores Padrão com dielétrico a nitrogênio seco, modelo 1404 do fabricante General Radio, nos valores de 10 pF, 100 pF e 1000 pF, que constituem três bancos, com cinco unidades de cada valor de capacitância.

O capacitor 1404 foi construído pelo fabricante para ter um baixo fator de dissipação, inferior a 10^{-5} , na frequência de 1 kHz, blindados contra influências eletromagnéticas.

Dentre as várias características técnicas de um capacitor padrão, duas são as mais significativas que interferem na medição, a estabilidade no tempo e a estabilidade de temperatura, esta última foi tratada no item 4.3.2.1.

Segundo VIM (2000, p.52), estabilidade é a aptidão de um instrumento de medição em conservar constante suas características metrológicas ao longo do tempo. A figura 4.9 representa graficamente o conceito de estabilidade.

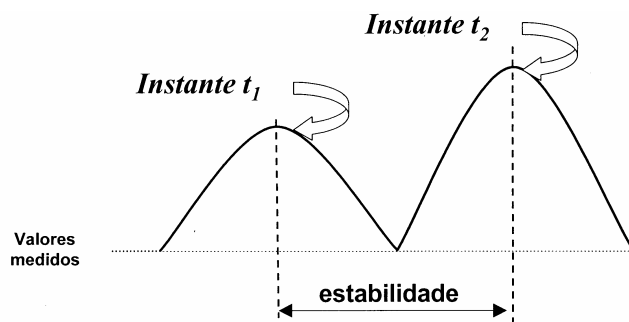


Figura 4.9 - Visualização do Conceito de estabilidade (Silva, 2003)

A estabilidade no tempo especificada pelo fabricante indica a variação, em média, de um capacitor no decorrer do tempo. Esta variável de influência será representada por V_t .

A estabilidade do capacitor padrão, modelo 1404, especificado pelo fabricante, General Radio, é $(20 \mu\text{F}/\text{F})/\text{ano}$.

Como esta característica é uma variável importante, foi feito um levantamento, no laboratório, do histórico desses capacitores.

4.3.3.1 - Estudo da Estabilidade dos Padrões

4.3.3.1.1 - Metodologia

Foi feito inicialmente um levantamento de todos os certificados dos capacitores viajantes emitidos pelos NMI's. A partir das datas de emissões, foram pesquisadas todas as transferências de unidade aos capacitores pertencentes aos bancos e, em seguida fez-se o levantamento das manutenções realizadas entre as calibrações nos NMI's.

Relembrando, entende-se como transferência de unidade a ação de calibrar os capacitores padrão de referência do laboratório tomando-se como referência um padrão primário e entende-se por manutenção da unidade farad como a ação de manter a unidade farad, no laboratório do Inmetro, compatível às unidades do SI.

4.3.3.1.2 - Resultados

Houve muitas dificuldades para se realizar esse levantamento porque as informações são muito antigas, pois datam a partir de 1982, além desse fato, devido ao processo precário de arquivamento dos documentos, muitas informações foram perdidas.

As tabelas 4.4, 4.5 e 4.6 indicam os valores dos capacitores padrão de 10 pF, 100 pF e 1000 pF, respectivamente, e as suas respectivas incertezas de medição, no período de 1982 a 2003. Sendo:

Vvc(pF) é o Valor Verdadeiro Convencional do capacitor na unidade em “pico farad”, que corresponde a 10^{-12} F.

U é a incerteza de medição declarada pelo Lacin, em valor relativo ao Vvc. Usualmente declarada em (μ F/F), que corresponde a (10^{-6}).

As linhas em amarelo correspondem às transferências dos valores dos padrões viajantes para o Banco, isto é, elas correspondem aos valores das calibrações realizadas em comparação aos padrões primários mantidos, no PTB, NIST ou BIPM. Em agosto de 1994 a unidade foi rastreada ao PTB, em setembro de 1999 ao NIST e em março de 2003 ao BIPM

A última coluna, na cor verde, indica as médias dos valores dos capacitores mantidas no Lacin entre os rastreamentos nos NMI's. Essa média é determinada no momento da transferência da unidade, e pode mudar quando um padrão é retirado do Banco.

VN = 10 pF			A3	B3	C3	D3	E3	
t		Δt	Vvc	Vvc	Vvc	Vvc	Vvc	Média
mes	(ano)	(ano)	(pF)	(pF)	(pF)	(pF)	(pF)	(pF)
jan	1982	0	10,00006	10,00005	10,00005	10,00005	10,00005	10,00005
ago	1994	12,6	9,99996	10,00007	10,00008	10,00022	10,00011	10,00008
dez	1996	14,9	10,00002	10,00017	10,00000	10,00020	10,00003	10,00008
ago	1997	15,6	10,00002	10,00012	10,00002	10,00024	10,00004	10,00009
set	1997	15,7	10,00009	10,00007	10,00001	10,00024	10,00004	10,00009
nov	1997	15,8	10,00008	10,00006	10,00002	10,00024	10,00003	10,00009
dez	1997	15,9	10,00008	10,00008	10,00002	10,00023	10,00003	10,00009
jan	1998	16,0	10,00009	10,00002	10,00004	10,00025	10,00005	10,00009
fev	1998	16,1	10,00007	10,00004	10,00003	10,00024	10,00005	10,00008
mar	1998	16,2	10,00007	10,00004	10,00003	10,00024	10,00005	10,00008
abr	1998	16,3	10,00001	10,00005	10,00005	10,00026	10,00006	10,00008
mai	1998	15,4	10,00001	10,00007	10,00004	10,00025	10,00005	10,00008
jun	1998	16,4	10,00003	10,00009	10,00003	10,00024	10,00004	10,00008
jul	1998	16,5	10,00007	10,00003	10,00004	10,00025	10,00004	10,00008
ago	1998	16,6	10,00007	10,00008	10,00003	10,00024	10,00002	10,00008
set	1998	16,7	10,00004	10,00007	10,00004	10,00025	10,00004	10,00008
out	1998	16,8	10,00004	10,00001	10,00005	10,00027	10,00006	10,00008
nov	1998	16,8	10,00003	10,00001	10,00006	10,00026	10,00006	10,00008
dez	1998	16,9	10,00004	9,99997	10,00007	10,00027	10,00007	10,00008
set	1999	17,7	10,00022	10,00024	10,00014	10,00030	10,00017	10,00021
abr	2000	18,3	10,00024	*	10,00013	10,00031	10,00016	10,00021
jan	2001	19,0	10,00023	*	10,00016	10,00029	10,00017	10,00021
mar	2001	19,2	10,00020	*	10,00011	10,00032	10,00020	10,00021
out	2001	19,8	10,00018	*	10,00014	10,00030	10,00021	10,00021
set	2002	20,7	10,00023	*	10,00009	10,00031	10,00019	10,00021
mar	2003	21,2	10,00025	*	10,00017	10,00040	10,00028	10,00027
ago	2003	21,6	10,00025	*	10,00016	10,00039	10,00029	10,00027
nov	2003	21,8	10,00022	*	10,00016	10,00041	10,00030	10,00027

*O capacitor foi retirado do Banco

Tabela 4.4 - Histórico dos Capacitores Padrão de 10 pF na frequência de 1 kHz. (do autor)

Um capacitor é retirado do banco quando apresenta uma variação muito elevada no decorrer do tempo em relação aos valores do passado.

As linhas da tabela correspondem às manutenções realizadas entre as calibrações no BIPM. Os valores indicados nessas linhas são valores estimados de acordo com a equação (28) do capítulo 2, item 2.7.2.3, repetida a seguir.

$$\hat{C}_n = \bar{C} + \frac{1}{2k} \left(\sum_{i=1}^k d_{ni} - \sum_{i=1}^k d_{in} \right)$$

VN = 100 pF		A2	B2	C2	D2	E2	
t		Δt	Vvc	Vvc	Vvc	Vvc	Média
mes	(ano)	(ano)	(pF)	(pF)	(pF)	(pF)	(pF)
jan	1982	0	100,0005	100,0005	100,0005	100,0005	100,0005
ago	1994	12,6	99,9999	99,9998	100,0001	100,0004	99,9999
dez	1996	14,9	99,9995	99,9996	99,9999	100,0011	99,9999
ago	1997	15,6	99,9999	99,9995	99,9997	100,0011	99,9999
set	1997	15,7	100,0004	99,9994	99,9996	100,0010	99,9999
nov	1997	15,8	100,0001	99,9995	99,9997	100,0011	100,0000
dez	1997	15,9	100,0003	99,9994	99,9996	100,0011	100,0000
jan	1998	16,0	100,0003	99,9994	99,9996	100,0010	99,9999
fev	1998	16,1	100,0006	99,9993	99,9995	100,0010	99,9999
mar	1998	16,2	100,0006	99,9993	99,9995	100,0010	99,9999
abr	1998	16,3	100,0006	99,9993	99,9995	100,0010	99,9999
mai	1998	15,4	100,0004	99,9994	99,9996	100,0011	99,9999
jun	1998	16,4	100,0004	99,9994	99,9996	100,0011	99,9999
jul	1998	16,5	100,0005	99,9994	99,9995	100,0011	99,9999
ago	1998	16,6	*	99,9995	99,9997	100,0012	100,0000
set	1998	16,7	*	99,9995	99,9997	100,0012	100,0000
out	1998	16,8	*	99,9995	99,9997	100,0012	100,0000
nov	1998	16,8	*	99,9995	99,9997	100,0013	100,0000
dez	1998	16,9	*	99,9995	99,9997	100,0013	100,0000
set	1999	17,7	100,0006	99,9995	99,9996	100,0014	100,0001
abr	2000	18,3	100,0005	99,9995	99,9996	100,0016	100,0001
jan	2001	19,0	100,0005	99,9994	99,9996	100,0017	100,0001
mar	2001	19,2	100,0001	99,9995	99,9996	100,0019	100,0001
out	2001	19,8	100,0000	99,9995	99,9996	100,0020	100,0001
set	2002	20,7	100,0000	99,9994	99,9995	100,0022	100,0001
mar	2003	21,2	100,0006	99,9997	99,9998	100,0026	100,0004
ago	2003	21,6	*	99,9997	99,9998	100,0026	100,0004
nov	2003	21,8	*	99,9998	99,9998	100,0026	100,0004

*O capacitor foi retirado do Banco

Tabela 4.5 - Histórico dos Capacitores Padrão de 100 pF na frequência de 1 kHz. (do autor)

VN = 1000 pF			A1	B1	C1	D1	E1	
t		Δt	V _{vc}	V _{vc}	V _{vc}	V _{vc}	V _{vc}	Média
mes	(ano)	(ano)	(pF)	(pF)	(pF)	(pF)	(pF)	(pF)
jan	1982	0	1000,005	1000,005	1000,005	1000,005	1000,005	1000,005
ago	1994	12,6	999,999	999,993	999,995	1000,005	1000,006	999,999
dez	1996	14,9	999,997	999,991	999,992	1000,011	1000,007	999,999
ago	1997	15,6	999,996	999,987	999,991	1000,012	1000,011	999,999
set	1997	15,7	999,996	999,987	999,991	1000,012	1000,011	999,999
nov	1997	15,8	999,997	999,987	999,991	1000,012	1000,011	999,999
dez	1997	15,9	999,997	999,986	999,991	1000,012	1000,011	999,999
jan	1998	16,0	999,997	999,986	999,991	1000,012	1000,012	999,999
fev	1998	16,1	999,996	999,986	999,991	1000,012	1000,012	999,999
mar	1998	16,2	999,996	999,986	999,991	1000,012	1000,012	999,999
abr	1998	16,3	999,996	999,986	999,991	1000,012	1000,012	999,999
mai	1998	15,4	999,996	999,986	999,990	1000,012	1000,013	999,999
jun	1998	16,4	999,996	999,986	999,990	1000,013	1000,012	999,999
jul	1998	16,5	999,996	999,986	999,991	1000,013	1000,012	999,999
ago	1998	16,6	999,997	999,987	999,992	1000,015	*	999,998
set	1998	16,7	999,997	999,987	999,992	1000,015	*	999,998
out	1998	16,8	999,998	999,987	999,992	1000,015	*	999,998
nov	1998	16,8	999,998	999,987	999,992	1000,015	*	999,998
dez	1998	16,9	999,998	999,987	999,992	1000,015	*	999,998
set	1999	17,7	999,992	1000,000	999,986	1000,012	1000,010	1000,000
abr	2000	18,3	999,991	999,999	999,985	1000,012	1000,012	1000,000
jan	2001	19,0	999,990	*	999,984	1000,013	1000,012	1000,000
mar	2001	19,2	999,991	*	999,987	1000,011	1000,010	1000,000
out	2001	19,8	999,989	*	999,983	1000,014	1000,014	1000,000
set	2002	20,7	999,987	*	999,981	1000,016	1000,015	1000,000
mar	2003	21,2	999,993	*	999,988	1000,022	1000,023	1000,006
ago	2003	21,6	999,992	*	999,987	1000,023	1000,023	1000,006
nov	2003	21,8	999,992	*	999,987	1000,023	1000,024	1000,006

*O capacitor foi retirado do Banco

Tabela 4.6 - Histórico dos Capacitores Padrão de 1000 pF na frequência de 1 kHz. (do autor)

As tabelas 4.7, 4.8 e 4.9 representam as variações médias por ano dos capacitores.

	Período	Valor (pF)		Δt (ano)	S_i ((μ F/F)/ano)
		Máximo	Mínimo		
A3	jan/82 a ago/94	10,00006	9,99996	12,6	0
	ago/94 a set/99	10,00022	9,99996	5,1	3
	set/99 a mar/03	10,00025	10,00018	3,5	1
	mar/03 a nov/03	10,00025	10,00022	0,7	2
B3	jan/82 a ago/94	10,00007	10,00005	12,6	0
	ago/94 a set/99	10,00024	9,99997	5,1	3
	set/99 a mar/03				
	mar/03 a nov/03				
C3	jan/82 a ago/94	10,00008	10,00005	12,6	0
	ago/94 a set/99	10,00014	10,00000	5,1	1
	set/99 a mar/03	10,00017	10,00009	3,5	1
	mar/03 a nov/03	10,00017	10,00016	0,7	0
D3	jan/82 a ago/94	10,00022	10,00005	12,6	1
	ago/94 a set/99	10,00030	10,00020	5,1	1
	set/99 a mar/03	10,00040	10,00029	3,5	
	mar/03 a nov/03	10,00041	10,00039	0,7	
E3	jan/82 a ago/94	10,00011	10,00005	12,6	0
	ago/94 a set/99	10,00017	10,00002	5,1	1
	set/99 a mar/03	10,00028	10,00016	3,5	2
	mar/03 a nov/03	10,00030	10,00028	0,7	2
S=				3	((μ F/F)/ano)

Tabela 4.7 - Estabilidade Temporal dos Capacitores de 10 pF. (do autor)

Onde:

- Com exceção do último período, que foi escolhido entre a realização da última transferência e a última manutenção, os períodos foram escolhidos nos intervalos entre as realizações das transferências.

- $V_{Máx}$ e $V_{Mín}$ são os valores máximos e mínimos, respectivamente, que os capacitores assumiram nos períodos.

– Δt é o intervalo de tempo correspondente a cada período. A unidade utilizada é o *ano*.

- A última coluna da tabela corresponde à estabilidade no tempo (S_i) dos capacitores para cada período.

- A estabilidade é dada por $S_i = \frac{(V_{Máx.} - V_{Mín.})}{2}$ na unidade, (pF) ou por $S'_i = \frac{S_i}{V_N} \times 10^6$ em (μ F/F)/ano.

	Período	Valor (pF)		Δt (ano)	S_i (($\mu F/F$)/ano)
		Máximo	Mínimo		
A2	jan/82 a ago/94	100,0005	99,9999	12,6	0
	ago/94 a set/99	100,0006	99,9995	5,1	1
	set/99 a mar/03	100,0006	100,0000	3,5	1
	mar/03 a now/03				
B2	jan/82 a ago/94	100,0005	99,9998	12,6	0
	ago/94 a set/99	99,9998	99,9993	5,1	0
	set/99 a mar/03	99,9997	99,9994	3,5	0
	mar/03 a now/03	99,9998	99,9998	0,7	0
C2	jan/82 a ago/94	100,0005	100,0001	12,6	0
	ago/94 a set/99	100,0001	99,9995	5,1	1
	set/99 a mar/03	99,9998	99,9995	3,5	0
	mar/03 a now/03	99,9998	99,9998	0,7	0
D2	jan/82 a ago/94	100,0005	100,0004	12,6	0
	ago/94 a set/99	100,0014	100,0004	5,1	1
	set/99 a mar/03	100,0026	100,0014	3,5	2
	mar/03 a now/03	100,0026	100,0026	0,7	0
E2	jan/82 a ago/94	100,0005	99,9997	12,6	0
	ago/94 a set/99	99,9997	99,9993	5,1	0
	set/99 a mar/03	99,9996	99,9994	3,5	0
	mar/03 a now/03	99,9996	99,9996	0,7	0
S=				2	(($\mu F/F$)/ano)

Tabela 4.8 - Estabilidade Temporal dos Capacitores de 100 pF. (do autor)

	Período	Valor (pF)		Δt (ano)	S_i (($\mu F/F$)/ano)
		Máximo	Mínimo		
A1	jan/82 a ago/94	1000,005	999,999	12,6	0
	ago/94 a set/99	999,999	999,986	5,1	1
	set/99 a mar/03	999,993	999,987	3,5	1
	mar/03 a now/03	999,993	999,992	0,7	0
B1	jan/82 a ago/94	1000,005	999,993	12,6	0
	ago/94 a set/99	1000,000	999,986	5,1	1
	set/99 a mar/03				
	mar/03 a now/03				
C1	jan/82 a ago/94	1000,005	999,995	12,6	0
	ago/94 a set/99	999,995	999,986	5,1	1
	set/99 a mar/03	999,988	999,981	3,5	1
	mar/03 a now/03	999,988	999,987	0,7	1
D1	jan/82 a ago/94	1000,005	1000,005	12,6	0
	ago/94 a set/99	1000,015	1000,005	5,1	1
	set/99 a mar/03	1000,022	1000,011	3,5	2
	mar/03 a now/03	1000,023	1000,022	0,7	1
E1	jan/82 a ago/94	1000,006	1000,005	12,6	0
	ago/94 a set/99	1000,013	1000,006	5,1	1
	set/99 a mar/03	1000,023	1000,010	3,5	2
	mar/03 a now/03	1000,024	1000,023	1	1
S=				2	(($\mu F/F$)/ano)

Tabela 4.9- Estabilidade Temporal dos Capacitores de 1000 pF. (do autor)

- V_N é o valor nominal do capacitor.

A última linha de cada tabela corresponde a uma estimativa da estabilidade do capacitor que é determinada pela expressão: $\delta C_t = \text{máximo}(S_i)$.

4.3.3.1.3 - Conclusão:

A variável estabilidade no tempo V_t

Para 10 pF $dC_t = \pm 3 \text{ (mF/F)/ano}$

100pF $dC_t = \pm 2 \text{ (mF/F)/ano}$

1000pF $dC_t = \pm 2 \text{ (mF/F)/ano.}$

4.3.4 - Transporte

Outra variável que influencia no processo de rastreabilidade é o transporte dos capacitores itinerantes do Lacin ao laboratório onde serão calibrados e vice versa. Essa variável será representada por $V_{\text{Transp.}}$.

Todos os capacitores padrão são susceptíveis a choques mecânicos. Para se evitar esse problema, normalmente são transportados em mãos por um técnico do laboratório.

O Lacin utiliza os capacitores de 10 pF e 100 pF do fabricante Andeen Hagerling como padrões itinerantes [4].

Antes da partida o capacitor é comparado com os bancos de capacitores, ao retornar, o processo é repetido.

Denominando $C_{\text{partida}} \pm U_p$, o valor medido antes da partida e a sua respectiva incerteza de medição, e $C_{\text{retorno}} \pm U_r$, o valor medido do capacitor após o retorno e a sua respectiva incerteza de medição, então:

$(C_{\text{partida}} - C_{\text{retorno}})$ deve ser menor que a menor incerteza U_p ou U_r .

Caso a condição acima não ocorra o processo de calibração pode ser invalidado.

Portanto a $V_{\text{Transp.}}$ é uma variável que pode invalidar o processo de rastreabilidade necessitando assim repetir a calibração no BIPM.

4.3.5 - Método de calibração e Determinação de Incerteza de Medição

A calibração de um capacitor padrão no Lacin é realizada normalmente pelo método de comparação quando se utiliza a Ponte de Capacitância do fabricante GenRad, modelo 1621 ou pelo método da substituição quando se utiliza a Ponte Digital do fabricante Andeen Hagerling, modelo 2500A.

Para se obter uma boa exatidão, um capacitor padrão é sempre comparado com os bancos de capacitores pelos métodos citados anteriormente.

A seguir serão apresentados todos os passos do processo de rastreabilidade onde são realizadas as calibrações. Serão indicadas ainda algumas novas variáveis de influência.

4.3.5.1 - Transferência da Unidade do BIPM para o INMETRO.

A transferência da unidade é feita calibrando-se os bancos de capacitores do Lacin em relação aos padrões itinerantes (S), seja por comparação seja por substituição.

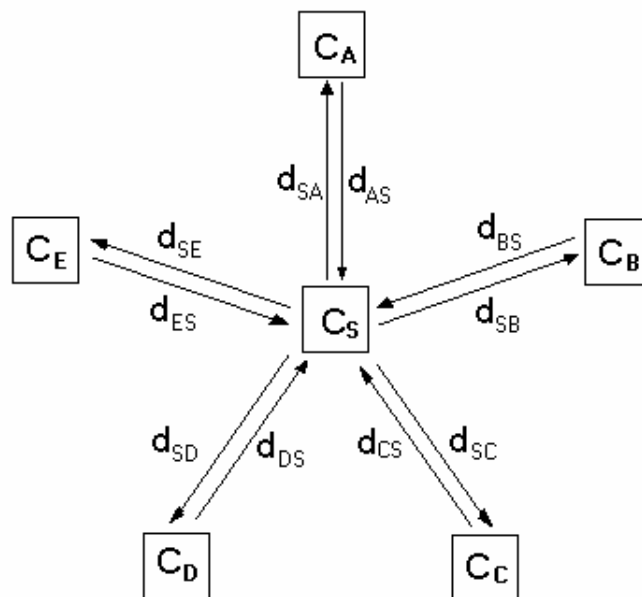


Figura 4.10 – Diagrama da Calibração. (do autor)

No método da comparação $d_{XS} = C_X - C_S + \varepsilon$ e $d_{SX} = C_S - C_X + \varepsilon$, com $X = A, B, C, D, e E$.

Sendo C_S o valor do certificado emitido pelo BIPM, d_{XS} e d_{SX} as indicações na Ponte de Capacitância.

Como já foi analisado anteriormente ε é o erro do comparador, portanto, subtraindo-se as duas equações acima obtém-se:

$$C_X = C_S + \frac{d_{XS} - d_{SX}}{2} \quad [4.3.5.1].$$

A partir equação 4.3.5.1 constroem-se as hipóteses causais, que se caracterizam por envolver as variáveis até aqui analisadas e outras que serão ainda definidas, através da determinação da incerteza de medição.

Grandeza Xi	Variável de Influência		Valor	Distrib. Probab.	Divisor	Incerteza Padrão u(x _i)	c _i	Contribuição para a incerteza u _i (y)= c _i · u(x _i)
		símbolo						
C _S	Incerteza de Calibração	ΔC _S		normal	k		1	
	V _t	(ΔC _S) _t		retangular	√3		1	
(d _{XS} - d _{SX})	V _T	(Δd _{XS} - Δd _{SX}) _T		retangular	√3		1	
	V _r	(Δd _{XS} - Δd _{SX}) _r		retangular	√3		1	
(d _{XS} - d _{SX})	Aleatória	R(d _{XS} - d _{SX})		normal	√n		1	
Incerteza padrão da estimativa de saída $u(y) = \sqrt{\sum u_i^2(y)}$ =								
V _{eff} =		k =		Incerteza expandida U=ku(y)			U=	

n é o número de repetições realizada nas medições

c_i é o coeficiente de sensibilidade

Tabela 4.10 – Determinação da incerteza (do autor)

A seguir é feita a descrição das variáveis de influência para cada elemento da equação 4.3.5.1, na incerteza de medição:

- C_S ΔC_S - incerteza de calibração do BIPM, com fator de abrangência k ;
(Distribuição de probabilidade normal)
- $(\Delta C_S)_t$ – estabilidade temporal do padrão. (Distribuição de probabilidade retangular)
- $(d_{XS} - d_{SX})$ $(\Delta d_{XS} - \Delta d_{SX})_T$ – variável V_T devida à temperatura influi sobre os valores de d_{XS} e d_{SX} . Os valores devem ser de acordo com a tabela da Figura 4.3. (Distribuição de probabilidade retangular)
- $(\Delta d_{XS} - \Delta d_{SX})_r$ – variável V_{resol} que é devida à resolução do Comparador de Capacitância. Resolução de um instrumento de medir é a menor diferença entre indicações que pode ser significativamente percebida . (Distribuição de probabilidade retangular)
- $R(\Delta d_{XS} - \Delta d_{SX})$ e - Repetitividade oriunda das variáveis aleatórias, devida à repetições das medições. (Distribuição de probabilidade normal)

Após a determinação de todas às variáveis monta-se a planilha de incerteza.

O valor do grau de liberdade efetivo ν_{eff} é calculado de acordo a equação 17 do item 2.4.5.1, capítulo 2.

A estimativa da grandeza C_X é a média aritmética das medições.

$$\bar{C}_X = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_{xi} \quad (4.3.5.2)$$

O resultado da transferência para cada capacitor do banco é dado por: $\bar{C}_X \pm U_X$, sendo $X= A, B, C, D$ ou E .

O valor que será mantido para a manutenção da unidade de capacitância será a média aritmética dos valores das capacitâncias da época da transferência.

$$C_{ano} = \frac{1}{5}(\bar{C}_A + \bar{C}_B + \bar{C}_C + \bar{C}_D + \bar{C}_E) \quad (4.3.5.3)$$

Em 2002 foram calibrados dois capacitores no BIPM, um de 10 pF e outro de 100 pF. Para realizar a transferência para o banco de 1000 pF foi necessária a utilização da Ponte de Capacitância da Genrad com a qual foi possível realizar a comparação de capacitores na relação de (na razão de) **1 : 10** e na relação de **10 : 1**.

A calibração das relações **1 : 10** e **10 : 1** foi feita comparando-se o capacitor de 10 pF contra o de 100 pF e vice-versa.

4.3.5.2 - Manutenção da Unidade de Capacitância no Lacin

A manutenção da unidade é feita comparando-se os capacitores do banco entre si, pelo método da comparação ou substituição, de acordo com o esquema abaixo.

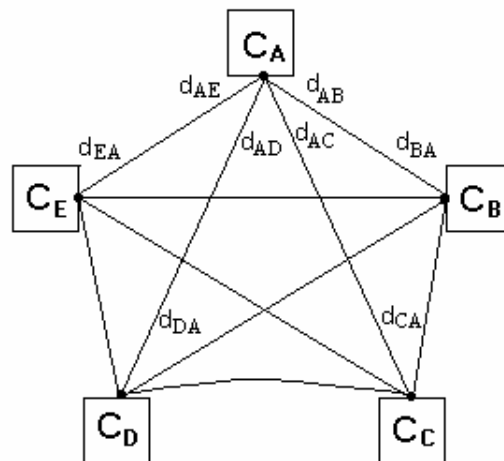


Figura 4.11 – Esquema da realização da Manutenção da unidade farad. (do autor)

Para realizar a manutenção da unidade, os capacitores dos bancos são comparados entre si, como mostra a figura 4.11, e o procedimento está descrito no item 2.7, capítulo 2.

Para se determinar o valor do capacitor utiliza-se a equação 28 do capítulo 2.

$$\hat{C}_n = \bar{C} + \frac{1}{2k} \left(\sum_{i=1}^k d_{ni} - \sum_{i=1}^k d_{in} \right), i = 1, 2, 3, 4, e 5. \quad (3.4.5.4)$$

Sendo $C_1 = C_A$, $C_2 = C_B$, $C_3 = C_C$, $C_4 = C_D$, $C_5 = C_D$ e $C_5 = C_E$

Descrição das variáveis de influência para cada elemento da equação 3.4.5.4, na incerteza de medição:

\bar{C}	$\delta\bar{C}$ - estimativa da incerteza da média na transferência, (Distribuição de probabilidade retangular)
	$(\delta\bar{C})_t$ - estabilidade temporal do padrão. Determinado conforme o item 4.3.2.1 (Distribuição de probabilidade retangular)
$(d_{ni} - d_{in})$	$\ddot{a}(d_{ni} - d_{in})_T$ - variável V_T devida à temperatura. Os valores devem ser de acordo com a tabela da Figura 4.3. (Distribuição de probabilidade retangular)
	$\ddot{a}(d_{ni} - d_{in})_r$ - variável $V_{resol.}$ que é devida à resolução do Comparador de Capacitância. (Distribuição de probabilidade retangular)
	$R(d_{ni} - d_{in})$ Repetitividade oriunda das variáveis aleatórias, devida à repetições das medições. (Distribuição de probabilidade normal)

Após a determinação de todas às variáveis monta-se a planilha de incerteza.

Grandeza Xi	Variável de Influência		Valor	Distrib. Probab.	Divisor	Incerteza Padrão u(x _i)	c _i	Contribuição para a incerteza u _i (y)= c _i . u(x _i)
		símbolo						
\bar{C}	Incerteza de Calibração	$\delta\bar{C}$		retangular	$\sqrt{3}$		1	
	V _t	$(\delta\bar{C})_t$		retangular	$\sqrt{3}$		1	
$(d_{ni} - d_{n})$	V _T	$(d_{ni} - d_{n})_T$		retangular	$\sqrt{3}$		1	
	V _r	$(d_{ni} - d_{n})_r$		retangular	$\sqrt{3}$		1	
	Aleatória	R(d _{ni} - d _n)		normal	\sqrt{n}		1	
Incerteza padrão da estimativa de saída $u(y) = \sqrt{\sum u_i^2(y)}$ =								
V _{eff} =		k =		Incerteza expandida U=ku(y)			U=	

n é o número de repetições realizada nas medições

c_i é o coeficiente de sensibilidade

Tabela 4.11 – Determinação da incerteza. (do autor)

O valor do grau de liberdade efetivo v_{eff} é calculado de acordo a equação 17 do item 2.4.5.1, capítulo 2.

A estimativa da grandeza C_n é a média aritmética das medições.

$$\bar{C}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_{ni}$$

O resultado da conservação para cada capacitor do banco é dado por: $\bar{C}_n \pm U_n$, sendo $n = A, B, C, D$ ou E .

4.3.6 – Comparação Interlaboratorial

Um instrumento para se medir o nível de confiabilidade metrológica na manutenção da unidade de uma grandeza física num laboratório é através da realização de comparação interlaboratorial.

Como citado no Capítulo 3, a comparação pelo SIM não será realizada até o término desta dissertação. A alternativa será estimar o nível de confiabilidade através de uma comparação indireta utilizando-se a Ponte de Capacitância 2700A.

Metodologia

Serão calibrados três capacitores, um de 10 pF, o outro de 100 pF e outro de 1000 pF, inicialmente comparando-os com os padrões de referência do Lacin, obtendo-se os valores, $C_{\text{Lacin}}(10 \text{ pF})$, $C_{\text{Lacin}}(100 \text{ pF})$ e $C_{\text{Lacin}}(1000 \text{ pF})$. Após essa comparação, os três capacitores serão calibrados com a Ponte de Capacitância 2700A, obtendo-se os valores, $C_{2700A}(10 \text{ pF})$, $C_{2700A}(100 \text{ pF})$ e $C_{2700A}(1000 \text{ pF})$.

Resultados

Segundo o Documento DOC-DIMCI-005, “Orientações para Organização de Comparações Interlaboratoriais pelas Comissões Técnicas da RBC”, para se verificar se a medição realizada no laboratório é aceitável, isto é, se o erro está dentro da incerteza de medição do laboratório, o erro normalizado E_n , obtido pela equação 4.3.6.1, deve ser menor que 1 (hum).

$$E_n = \frac{|R_{Lab} - R_{Ref}|}{\sqrt{(U_{Lab}^2 + U_{Ref}^2)}}; \quad \text{com } E_n < 1 \quad 4.3.6.1$$

Sendo:

R_{Lab} – Resultado do laboratório;

R_{Ref} – Valor de Referência;

U_{Lab} – Incerteza do Laboratório;

U_{Ref} – Incerteza da Referência.

Então:

$$E_n(10 \text{ pF}) = \frac{|C_{Lacin} (10 \text{ pF}) - C_{Ref} (10 \text{ pF})|}{\sqrt{(U_{Lab}^2 + U_{Ref}^2)}} \quad 4.3.6.2$$

$$E_n(100 \text{ pF}) = \frac{|C_{Lacin} (100 \text{ pF}) - C_{Ref} (100 \text{ pF})|}{\sqrt{(U_{Lab}^2 + U_{Ref}^2)}} \quad 4.3.6.3$$

e

$$E_n(1000 \text{ pF}) = \frac{|C_{Lacin} (1000 \text{ pF}) - C_{Ref} (1000 \text{ pF})|}{\sqrt{(U_{Lab}^2 + U_{Ref}^2)}} \quad 4.3.6.4$$

Conclusão

Se $E_n(10 \text{ pF}) < 1$, $E_n(100 \text{ pF}) < 1$ e $E_n(1000 \text{ pF}) < 1$, tem-se uma estimativa de que o Lacin mantém a unidade de capacitância com confiabilidade metrológica. Porém a confirmação exata só poderá ser obtida após a comparação interlaboratorial do SIM.

4.3.7 - Recursos Humanos

Outra importante variável que influencia no processo de calibração, conseqüentemente no processo de rastreabilidade da unidade de capacitância, é o recurso humano do laboratório.

Esta variável será representada por V_{RH} , que é uma variável qualitativa.

Nesta seção será apresentada uma série de causas provenientes essencialmente dos Recursos Humanos, que impedem a obtenção da confiabilidade metrológica no processo de rastreabilidade das medições.

As causas do problema acima e o efeito está esquematizado no diagrama “Espinha de Peixe” da figura – 4.12.

Quant.	Formação	Especialização	Atividade
1	Física	Mestrado em Física / Strictus Sensus – UFF ⁽¹⁾	Pesquisa e Desenvolvimento
1	Física	- Mestrando em MSG / Strictus Sensus - UFF ⁽¹⁾ - Pós-Graduação em Metrologia/ Latu Sensus - COPPE - UFRJ ⁽²⁾ - Especialização em metrologia no LCIE ⁽³⁾	Gerência do Laboratório
1	Engenharia Elétrica (Eletrônica)	-Mestre em Engenharia / UFRJ ⁽²⁾ ; - Doutorando em Engenharia / UFRJ ⁽²⁾ .	Pesquisa e Desenvolvimento
1	Engenharia Elétrica (Eletrônica)	Mestre em Metrologia / PUC – RJ ⁽⁴⁾	Calibração de Indutores
1	Engenharia Elétrica (Eletrônica)	Especialização em metrologia no PTB ⁽⁵⁾ .	Coordenador do Sistema da Qualidade
2	Técnico em Eletrônica		Calibração
1	Técnico em Metrologia		Calibração

(1) UFF – Universidade Federal Fluminense

(2) UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

(3) LCIE - Laboratoire Central des Industries Electriques – França; duração de 9 meses

(4) PUC-RJ – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

(5) Physikalisch Technische Bundesanstalt Alemanha, duração de 18 meses

Tabela 4.12 - Descrição da qualificação e função. (do autor)

É importante observar que esta análise será restrita ao Laboratório de Capacitância e Indutância. Muitas das causas só podem ser eliminadas no âmbito Inmetro.

Uma pesquisa nesse nível foi realizada pela mestrandia Regina Copello Martins do “Mestrado Profissional em Sistema de Gestão - MSG” em sua dissertação “Gestão de Pessoas

em uma organização Pública: uma proposta de melhoria” defendida em dezembro de 2003 (Martins, 2003).

O Recurso Humano do Lacin é constituído por oito funcionários cujas qualificações e funções estão descritas na tabela 4.12:

Todos os funcionários possuem treinamento na norma NBR ISO IEC 17025, no sistema operacional “Windows”, no processador de texto “Word” e planilha “Excel”. Os dois físicos e três engenheiros possuem treinamentos em Avaliação de Sistema da Qualidade de Laboratório de Metrologia Elétrica.

As causas que levam a não confiabilidade metrológica do Lacin foram obtidas a partir de observações ao longo de vários anos que, para a maior facilidade de compreensão, será representada através do Diagrama de Ishikawa ou diagrama de Causa e efeito ou diagrama Espinha de Peixe, na Figura 4.12.

As principais causas estão indicadas por cada “espinha” que são: Mão de Obra, Método, Máquina, Medida e Meio Ambiente.

De uma maneira geral para solucionar os problemas decidiu-se pela implantação da Norma 17025.

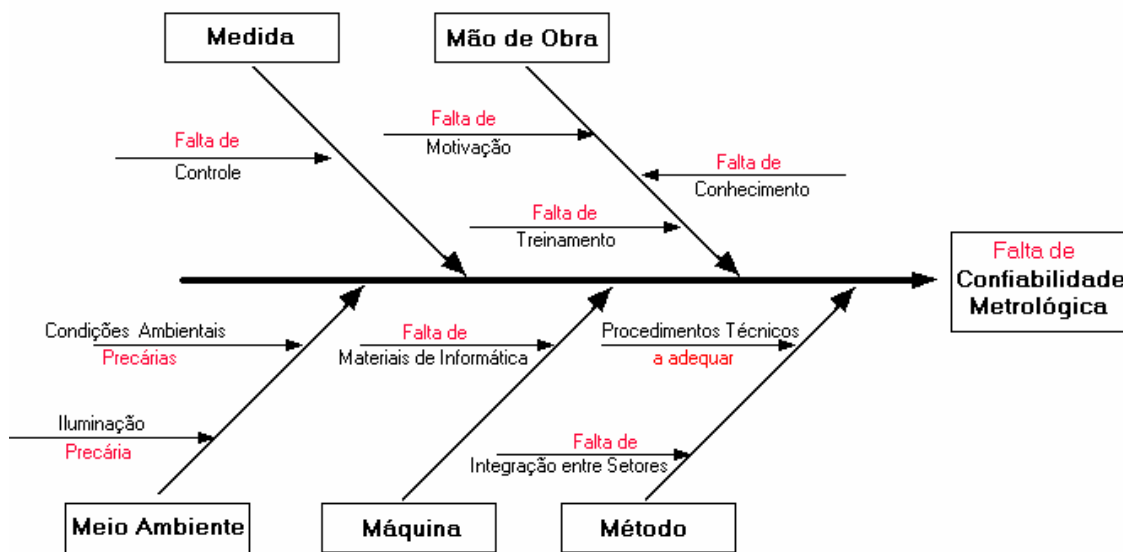


Figura 4.12 - Diagrama de causa e efeito. (do autor)

Seleção de Alternativas para Solução dos Problemas

- Mão de Obra

- Causa: Baixa motivação.

Entenda-se como falta de motivação como a falta de interesse, de assiduidade e de dedicação na realização principalmente dos serviços de calibração.

Alternativa de Solução: Na impossibilidade de aumento salarial, uma solução adotada foi a gerência participativa através de reuniões discute-se os problemas e procura-se as soluções em conjunto.

- Causa: -Falta de conhecimento do processo como um todo pelos técnicos;

-Falta de treinamento.

-Observou-se que os técnicos apresentam dificuldades na compreensão e na aplicação dos conceitos de: métodos de calibração de capacitores, princípio de funcionamento dos instrumentos de medição e de operação, incerteza de medição e alguns conceitos de matemática.

Alternativa de Solução: Treinamento sistemático através de aulas teóricas e práticas.

Quanto ao problema de mão de obra a gerência deve ainda observar que, de acordo com McCauley, em 1989 [Texto retirado do trabalho de Oliveira, José Carlos Valente de abril de 2003], “a ocupação do cargo de gerente por profissional que tivesse perfil que se enquadrasse o máximo que possível nas 16 competências referenciais citadas por McCauley, em 1989. São elas aqui apresentadas de forma resumida”:

1. Saber adaptar-se a mudanças e situações ambíguas.
2. Perseverar e se concentrar mediante obstáculos, assumir, saber o que é necessário e seguir adiante. Ser capaz de trabalhar só e também aprender com os demais.
3. Dominar rapidamente novas tecnologias.
4. Ter espírito de decisão.
5. Administrar equipes com eficácia.
6. Criar um clima propício ao desenvolvimento.
7. Saber lidar com colaboradores quando apresentam problemas.
8. Estar orientado para o trabalho em equipe.

9. Formar uma equipe de talentos: investir no desenvolvimento do potencial de seus colaboradores, identificando e oferecendo novos desafios e responsabilidade compartilhada.
10. Saber como estabelecer boas relações de trabalho, negociar quando houver problemas, conseguir cooperação.
11. Demonstrar interesse pelos demais e sensibilidade ante as necessidades de seus colaboradores.
12. Enfrentar os desafios com tranquilidade.
13. Manter o equilíbrio entre o trabalho e vida profissional.
14. Ter idéia de seus pontos fracos e fortes, e estar disposto a investir em si mesmo.
15. Apresentar bom relacionamento.
16. Atuar com flexibilidade: exercer liderança e deixar liderar-se, opinar e aceitar opiniões dos demais.”

- Medida

- Causa: Falta de Controle. Observa-se através do excesso de erros realizados pelos técnicos.

- Alternativa de Solução: Realização de auditoria interna de acordo com a norma NBR ISO 17025.

- Método

- Causa: Procedimentos a adequar. Observou-se a necessidade de adequar os procedimentos devido à necessidade contínua de re-trabalho dos serviços realizados pelos técnicos.

- Alternativa de Solução: Revisar os procedimentos e adequá-los ao nível dos técnicos do Lacin.

- Causa: Falta de Integração entre setores. Observou-se que os técnicos dos laboratórios desconhecem os serviços realizados por outros laboratórios de eletricidade da Divisão de Metrologia Elétrica.

- Alternativa de Solução: Propor a realização de seminários aos outros laboratórios tais como Latce, Lares e Lapen.

- Máquina

- Causa: Falta de material de informática. Os técnicos do Lacin não dispõem de computadores suficientes para a realização de seus serviços. O lacin necessita ainda adquirir, interfaces para a realização da automação das medições.

- Alternativa de Solução: Aquisição.

- Meio Ambiente

- Causa: Condições Ambientais Precárias e Iluminação Precária. Os laboratórios são constituídos por salas sem janelas para o meio exterior e sem qualquer tipo de som devido às necessidades técnicas, tornando assim um ambiente bastante estressante. A temperatura ambiente de 23 °C nos laboratórios é bastante cômoda para os funcionários.

A iluminação é feita através de lâmpadas fluorescentes alimentadas por tensão elétrica da empresa “Ligh” na frequência de 60 Hz, que para os funcionários que ficam quatro horas contínuas é também bastante estressante.

- Alternativa de Solução: A solução para esses problemas é a divisão do tempo de permanência entre o laboratório e os escritórios que possuem janelas.

Conclusão

A implementação das soluções de gestão de recursos humanos possibilitará a redução de re-trabalho no laboratório, como também a redução de erros sistemáticos cometidos pelos técnicos. As auditorias internas realizadas são ferramentas imprescindíveis para aumentar a confiabilidade dos resultados das calibrações.

CAPÍTULO 5

ANÁLISE DO NÍVEL ATUAL DE CONFIABILIDADE METROLÓGICA DO LABORATÓRIO. UMA APLICAÇÃO PRÁTICA

INTRODUÇÃO

Em outubro de 2002, três capacitores, um de 1 pF, outro de 10 pF e outro de 100pF, foram encaminhados ao BIPM para serem calibrados. Foram escolhidos todos da Andeen Hagerling, modelo AH11A por serem os mais estáveis do Lacin, com estabilidade $\pm 0,3$ ($\mu\text{F}/\text{F}$)/ano, de acordo com as características do fabricante.

A partir da escolha, todo o processo foi feito de acordo com o esquema da Figura 4.3, do Capítulo 4. A figura mostra apenas os detalhes que serão analisados neste capítulo.

5.1 – TRANSPORTE

Normalmente os capacitores itinerantes são transportados por um técnico do laboratório como bagagem “de mão”, na cabine do avião, Todo esse cuidado é necessário para se evitar choques mecânicos.

O primeiro procedimento antes da partida foi a realização das medições dos capacitores através do método da comparação ou da substituição. Após a calibração no BIPM, os capacitores foram novamente medidos no laboratório.

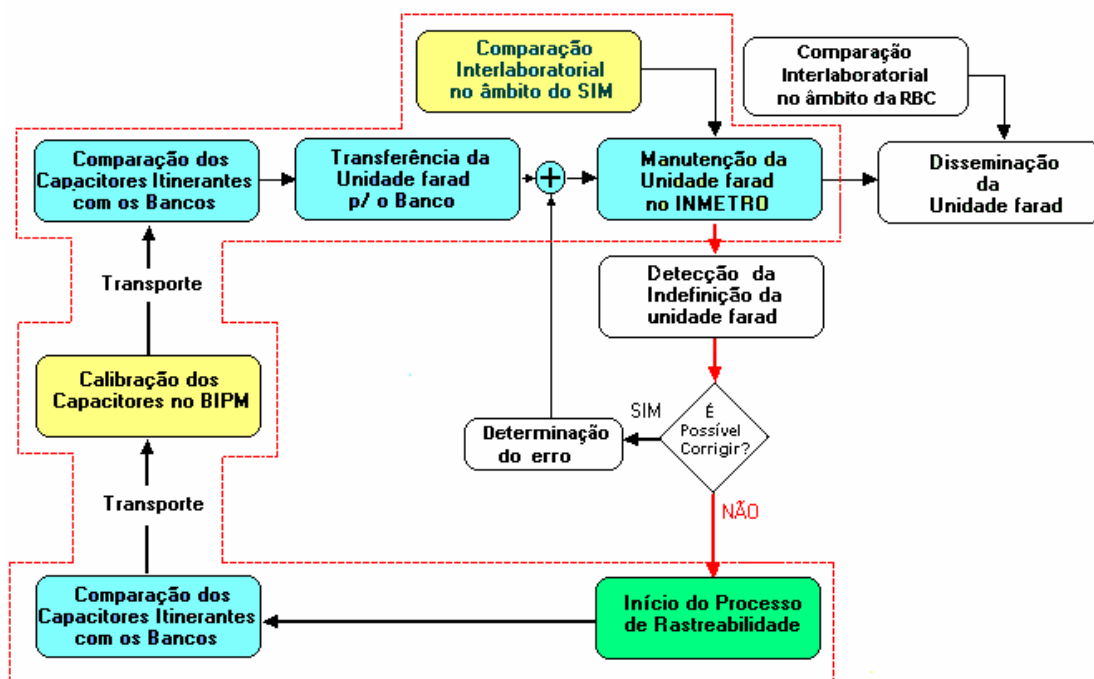


Figura 5.1 – Fluxo do Processo de Rastreabilidade do Lacin. (do autor)

Após esses procedimentos foi feita a análise da validade da calibração dos capacitores, de acordo com as condições descritas no Capítulo 4.

Os resultados foram:

- Capacitor de 10 pF, modelo AH11A, fabricante Andeen Hagerling, número de série 1209

Resultado da medição					
	Data	pF	U(mF/F)	k	DC(mF/F)
Partida	Outubro de 2002	9,99995	4	2	2
Chegada	Dezembro de 2002	9,99993	4	2	
Conclusão	Como ΔC é menor que a menor incerteza U, a calibração é válida.				

U – Incerteza de Medição.

k – Fator de Abrangência.

ΔC – É o módulo da diferença entre o valor de partida e de chegada.

Tabela 5.1.1– Resultado do transporte do Capacitor Itinerante de 10 pF. (do autor)

- Capacitor de 100 pF, modelo AH11A, fabricante Andeen Hagerling, número de série 1163.

Resultado da medição					
	Data	pF	U(mF/F)	k	DC(mF/F)
Partida	Outubro de 2002	99,9996	4	2	2
Chegada	Dezembro de 2002	9,99994	4	2	
Conclusão	Como ΔC é menor que a menor incerteza U, a calibração é válida.				

Tabela 5.1.2 – Resultado do transporte do Capacitor Itinerante de 100 pF. (do autor)

Portanto, os resultados acima indicam que as calibrações no BIPM foram válidas.

O capacitor de 1 pF apresentou problemas de instabilidade ainda nos laboratórios do BIPM, portanto não será feita análise.

5.2 - RESULTADOS DAS CALIBRAÇÕES DOS CAPACITORES NO BIPM.

A tabela abaixo mostra os resultados das calibrações dos capacitores de 10 pF e 100 pF realizadas no BIPM.

V_N (pF)	Data da Calibração	f (Hz)	V_{vc} (pF)	U(μ F/F)
10	01/12/2002	1000	9,9999570	6×10^{-8}
10	11/12/2002	1592	9,9999564	5×10^{-8}
100	11/12/2002	1000	99,999548	6×10^{-8}
100	11/12/2002	1592	99,999546	5×10^{-8}

V_N – Valor Nominal;

f – frequência de calibração;

V_{vc} – Valor verdadeiro convencional;

U – Incerteza padrão combinada.

Tabela 5.2.1 – Resultados das Calibrações no BIPM. (do autor)

Na incerteza padrão estimada dada na Tabela 5.3 não está incluída a incerteza associada ao valor recomendado de R_{K-90} , que tem um valor relativo de 1×10^{-7} .

5.3 – A TRANSFERÊNCIA

A transferência da unidade de capacitância “farad” aos capacitores de referência do Lacin foi feita calibrando-se os capacitores dos bancos de 10 pF, 100 pF e 1000 pF. Inicialmente serão expostos os cálculos referente às calibrações de 10 pF e 100 pF.

O procedimento da transferência foi de acordo com a Figura 4.10 do Capítulo 4, pelo método da comparação utilizando-se a Ponte de Capacitância 1621 da GenRad. Foram realizadas 10 repetições para cada comparação.

5.3.1 – Transferência da unidade “farad” para o Banco de 10 pF.

A Tabela 5.3.1.1 mostra os resultados das comparações entre o capacitor itinerante calibrado no BIPM com os capacitores do Banco de 10 pF. A Tabela 5.3.1.2 indica a temperatura do banco durante a calibração.

		Valores em fF à temperatura t									
d_{XS}	A - S	0,271	0,266	0,271	0,266	0,272	0,271	0,263	0,264	0,264	0,264
	B - S										
	C - S	0,174	0,175	0,182	0,176	0,183	0,165	0,172	0,167	0,173	0,173
	D - S	0,394	0,395	0,404	0,396	0,387	0,392	0,387	0,386	0,394	0,394
	E - S	0,294	0,294	0,294	0,302	0,302	0,284	0,285	0,285	0,285	0,291
d_{SX}	S - A	-0,262	-0,257	-0,259	-0,258	-0,267	-0,248	-0,255	-0,256	-0,256	-0,257
	S - B										
	S - C	-0,164	-0,167	-0,164	-0,168	-0,168	-0,157	-0,159	-0,159	-0,165	-0,166
	S - D	-0,379	-0,392	-0,388	-0,388	-0,394	-0,379	-0,385	-0,385	-0,385	-0,388
	S - E	-0,284	-0,286	-0,285	-0,286	-0,286	-0,276	-0,283	-0,277	-0,277	-0,278

Tabela 5.3.1.1 - Resultados das comparações entre o capacitor Itinerante AH11A e os capacitores do Banco de 10 pF. (do autor)

		Temperatura (°C)									
d_{XS}	A - S	22,3	22,1	21,9	22,1	21,9	22,0	22,0	22,0	22,0	22,1
	B - S										
	C - S	22,1	22,1	21,9	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,1	22,1
	D - S	22,1	22,1	21,9	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,1
	E - S	22,1	22,1	21,9	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,1
d_{SX}	S - A	22,1	22,1	21,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,1
	S - B										
	S - C	21,9	22,0	21,9	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,1
	S - D	22,0	22,0	21,9	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0
	S - E	22,0	22,0	21,9	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,1	22,0

Tabela 5.3.1.2 – Temperatura do Banco 10 pF durante a calibração. (do autor)

Os valores dos capacitores do Banco de 10 pF, indicados na Tabela 5.3.1.3, foram calculados de acordo a relação 4.3.5.1, do capítulo 4.

Os capacitores, **B** de 10 pF, **A** de 100 pF e **B** de 1000 pF foram retirados dos bancos, porque apresentam-se instáveis há alguns anos, por esse motivo as células das tabelas estão vazias.

C _x (t) em pF										
A	10,000224	10,000219	10,000222	10,000219	10,000227	10,000217	10,000216	10,000217	10,000217	10,000218
B										
C	10,000126	10,000128	10,000130	10,000129	10,000133	10,000118	10,000123	10,000120	10,000126	10,000127
D	10,000344	10,000351	10,000353	10,000349	10,000348	10,000343	10,000343	10,000343	10,000347	10,000348
E	10,000246	10,000247	10,000247	10,000251	10,000251	10,000237	10,000241	10,000238	10,000238	10,000242

Tabela 5.3.13 – Valores dos capacitores do Banco de 10 pF à temperatura t. (do autor)

A Tabela 5.3.1.4 indica os valores dos capacitores à temperatura de 23 °C, que foram obtidas de acordo com a relação 4.1, do Capítulo 4.

C _x (23°C) em pF										
A	10,000248	10,000246	10,000269	10,000248	10,000258	10,000247	10,000246	10,000247	10,000247	10,000245
B										
C	10,000166	10,000166	10,000173	10,000169	10,000172	10,000158	10,000162	10,000160	10,000164	10,000162
D	10,000392	10,000399	10,000409	10,000400	10,000399	10,000394	10,000394	10,000394	10,000398	10,000396
E	10,000280	10,000281	10,000286	10,000287	10,000287	10,000273	10,000277	10,000274	10,000272	10,000275

Tabela 5.3.1.4 – Valores dos capacitores do Banco de 10 pF à temperatura 23 °C. (do autor)

- Determinação de Incerteza

A incerteza de calibração foi calculada de acordo com a Tabela 4.10, do Capítulo 4.

	\bar{C}_x (pF)	σ_e (pF)	R (pF)	δC_S (pF)	$(\delta C_S)_t$ (pF)	δV_{resol} (pF)	δC_T (pF)	uc (pF)
A	10,000249	8E-06	3E-06	1E-06	2E-06	3E-07	1,2E-05	1,2E-05
B								
C	10,000165	5E-06	2E-06	1E-06	2E-06	3E-07	1,5E-05	1,6E-05
D	10,000398	5E-06	2E-06	1E-06	2E-06	3E-07	2,0E-05	2,0E-05
E	10,000279	6E-06	2E-06	1E-06	2E-06	3E-07	1,4E-05	1,4E-05

Tabela 5.3.1.5 - Planilha de Cálculo de Incerteza para a transferência de 10 pF. (do autor)

Os valores da Tabela 5.3.1.5 foram calculados de acordo com os itens a seguir, tomando como base os dados da Tabela 5.3.1.4.

a) Cálculo da estimativa da grandeza C_x

\bar{C}_x - é a estimativa da grandeza C_x que foi determinada de acordo com a equação 4.3.5.2, do Capítulo 4;

- b) σ_e – é o desvio padrão experimental;
- c) R - é a Repetitividade - (distribuição de probabilidade normal), que foi determinada de acordo com a equação 9, do item 2.4.3, capítulo 2;
- d) δC_S – é devida a variável que depende da incerteza de calibração do capacitor itinerante dado pelo BIPM - (distribuição de probabilidade normal).

A incerteza do padrão de referência de acordo com o BIPM é a composição da incerteza padrão combinada relativa igual a $0,6 \times 10^{-8}$ e a incerteza da definição do R_{K90} igual a 1×10^{-7} . δC_S é obtida fazendo a soma quadrática dessas duas incertezas. Obteve-se para $\delta C_S = 1,2 \times 10^{-7}$, em valor relativo.

- e) $(\delta C_S)_t$ – é devida a variável estabilidade temporal V_t do capacitor padrão AH11A que, de acordo com o fabricante Andeen Hagerling, é igual a $(0,3 \mu\text{F}/\text{F})/\text{ano}$ - (distribuição de probabilidade retangular);
- f) δV_{resol} – é devida a variável V_{resol} , que depende da resolução da Ponte de Capacitância - (distribuição de probabilidade retangular). A resolução para a medição do capacitor de 10 pF foi de 1×10^{-6} pF;
- g) δC_T - é devida à variável V_T que foi obtida compondo-se as influências da temperatura.

O termômetro de líquido em vidro utilizado tem as seguintes características:

- Resolução igual a $0,01 \text{ }^\circ\text{C}$;
- Incerteza de calibração igual a $0,03 \text{ }^\circ\text{C}$ (obtido no certificado do termômetro);

O desvio padrão experimental das medições de temperatura foi calculado e obteve-se $\sigma_T = 0,13 \text{ }^\circ\text{C}$;

A influência devido à variável $V_{\Delta T}$ determinada no item 4.3.2.1, é $\delta(\Delta T) = 0,25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Compondo essas influências obteve-se $\delta T = \pm 0,4 \text{ }^\circ\text{C}$.

O valor de δC_T é calculada pela relação: $\delta C_T = \alpha \times \delta T \times C$

A Tabela 5.3.1.6 mostra a influência da variável V_T sobre a medição de capacitores.

CAPACITOR 1404C (10pF)		
	α ($\mu\text{F}/\text{F}^\circ\text{C}$)	δC_T (pF)
A	3,00E-06	1,2E-05
C	3,95E-06	1,5E-05
D	5,10E-06	2,0E-05
E	3,55E-06	1,4E-05

Tabela 5.3.1.6 – A variável de influência da temperatura. (do autor)

h) u_c – é a incerteza combinada, que é obtida pela soma quadrática das componentes (R , δC_S , $(\delta C_S)_t$, δV_{resol} , δC_T).

O grau de liberdade efetivo foi calculado utilizando-se a fórmula da equação 17, do item 2.4.5.1, do Capítulo 2. Obteve-se, em todas as medições $v_{\text{eff}} \gg 100$ portanto, para todos os casos, o fator de abrangência k é igual a 2, para uma probabilidade de abrangência de 95,45%.

A incerteza padrão expandida de medição foi obtida pela relação 16, do item 2.4.5.1, Capítulo 2.

A tabela 5.3.1.7 mostra o valor verdadeiro convencional (V_{vc}) de cada capacitor e a sua respectiva incerteza de medição.

	V_{vc} (pF)	U ($\mu\text{F}/\text{F}$)	k
A	10,000249	2,4	2
B			
C	10,000165	3,1	2
D	10,000398	4,0	2
E	10,000279	2,8	2

\bar{C}_{2003} (10 pF) = 10,000273 pF $\pm 3,1 \mu\text{F}/\text{F}$

Tabela 5.3.1.7 - Valores de 10 pF após a transferência em 2003. (do autor)

Como \bar{C}_{2003} (10pF), a média dos valores dos quatro capacitores, é um artifício utilizado para realizar a manutenção da unidade “farad”, e como depende da medição de cada um dos capacitores, estimou-se a sua incerteza como a média das incertezas de cada

capacitor. Sendo uma estimativa, a distribuição de probabilidade será considerada retangular.

A média $\bar{C}_{2003}(10 \text{ pF}) = 10,000273 \text{ pF} \pm 3,1 \mu\text{F}/\text{F}$ será mantida constante até a próxima calibração no BIPM.

5.3.2 - Transferência da unidade farad para o Banco de 100 pF

A Tabela 5.3.2.1 mostra os resultados das comparações entre o capacitor itinerante calibrado no BIPM com os capacitores do Banco de 100 pF. A Tabela 5.3.2.2 indica a temperatura do banco durante a calibração.

		Valores em fF à temperatura t									
d_{XS}	A - S										
	B - S	-0,361	-0,159	-0,157	-0,156	-0,149	-0,168	-0,177	-0,164	-0,158	-0,174
	C - S	-0,096	-0,075	-0,066	-0,065	-0,057	-0,085	-0,088	-0,057	-0,057	-0,074
	D - S	2,734	2,751	2,752	2,753	2,747	2,744	2,729	2,754	2,753	2,745
	E - S	-0,237	-0,227	-0,227	-0,227	-0,227	-0,237	-0,256	-0,229	-0,245	-0,252
d_{SX}	S - A										
	S - B	0,273	0,256	0,254	0,235	0,252	0,272	0,262	0,263	0,264	0,262
	S - C	0,185	0,172	0,163	0,156	0,148	0,177	0,145	0,163	0,164	0,162
	S - D	-2,656	-2,666	-2,667	-2,668	-2,674	-2,657	-2,688	-2,671	-2,665	-2,667
	S - E	0,333	0,324	0,324	0,324	0,323	0,341	0,321	0,335	0,344	0,341

Tabela 5.3.2.1 - Resultados das comparações entre o capacitor Itinerante AH11A e os capacitores do Banco de 100 pF. (do autor)

		Temperatura (°C)									
d_{XS}	A - S										
	B - S	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	22,0	22,0	21,8	21,7	22,0
	C - S	21,7	21,7	21,7	21,7	21,6	22,0	22,0	21,8	21,7	22,0
	D - S	21,7	21,7	21,7	21,6	21,7	22,0	22,0	21,8	21,7	22,0
	E - S	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	22,0	22,0	21,8	21,7	22,0
d_{SX}	S - A										
	S - B	21,7	21,7	21,7	21,6	21,7	21,9	21,9	21,7	21,8	21,8
	S - C	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	22,0	21,9	21,7	21,7	21,8
	S - D	21,7	21,7	21,7	21,7	21,6	21,9	21,9	21,7	21,7	21,8
	S - E	21,7	21,7	21,6	21,7	21,7	21,9	21,9	21,7	21,8	21,8

Tabela 5.3.2.2 – Temperatura do Banco de 100 pF durante a calibração. (do autor)

Os valores dos capacitores do Banco de 100 pF, indicados na Tabela 5.3.2.3, foram calculados de acordo a relação 4.3.5.1, do capítulo 4.

C _x (t) em pF										
A										
B	99,9992	99,9993	99,9993	99,9994	99,9993	99,9993	99,9993	99,9993	99,9993	99,9993
C	99,9994	99,9994	99,9994	99,9994	99,9994	99,9994	99,9994	99,9994	99,9994	99,9994
D	100,0022	100,0023	100,0023	100,0023	100,0023	100,0022	100,0022	100,0023	100,0022	100,0022
E	99,9993	99,9993	99,9993	99,9993	99,9993	99,9993	99,9993	99,9993	99,9992	99,9992

Tabela 5.3.2.3 – Valores dos capacitores do Banco de 100 pF à temperatura t. (do autor)

A Tabela 5.3.2.4 indica os valores dos capacitores à temperatura de 23 °C, que foram obtidas de acordo com a relação 4.1, do Capítulo 4.

C _x (23°C) em pF										
A										
B	99,99964	99,99975	99,99975	99,99978	99,99976	99,99965	99,99965	99,99972	99,99973	99,99967
C	99,99977	99,99979	99,99980	99,99980	99,99982	99,99969	99,99972	99,99978	99,99979	99,99973
D	100,00258	100,00260	100,00260	100,00261	100,00261	100,00252	100,00252	100,00258	100,00259	100,00253
E	99,99964	99,99965	99,99967	99,99965	99,99965	99,99956	99,99956	99,99962	99,99961	99,99957

Tabela 5.3.2.4 – Valores dos capacitores do Banco de 100 pF à temperatura 23 °C. (do autor)

- Determinação de Incerteza

O procedimento de determinação da incerteza para a transferência da unidade para o Banco de 100 pF é o mesmo utilizado para o cálculo da incerteza para o Banco de 10 pF, portanto aqui será mostrado apenas o resultado final.

	V _{vc} (pF)	U (μF/F)	k
A			
B	99,99971	2,5	2
C	99,99977	2,2	2
D	100,00258	2,0	2
E	99,99962	2,3	2

\bar{C}_{2003} (100 pF) = 100,00042 pF ±2,2 μF/F
--

Tabela 5.3.2.5 - Valores de 10 pF após a transferência em 2003. (do autor)

A média \bar{C}_{2003} (100 pF) = 100,00042 pF ±2,2μF/F será mantida constante até a próxima calibração no BIPM.

5.3.3 - Transferência da unidade farad para o Banco de 1000 pF

A Tabela 5.3.3.1 mostra os resultados das comparações entre o capacitor itinerante de 100 pF calibrado no BIPM com os capacitores do Banco de 1000 pF. A Tabela 5.3.3.2 indica a temperatura do banco durante a calibração.

		Valores em fF na temperatura t				
d_{XS}	A - S	-0,447	-0,437	-0,435	-0,433	-0,427
	B - S					
	C - S	-1,125	-1,104	-1,079	-1,075	-1,065
	D - S	2,452	2,457	2,467	2,475	2,478
	E - S	2,514	2,522	2,525	2,525	2,533
d_{SX}	S - A	0,477	0,475	0,473	0,464	0,471
	S - B					
	S - C	1,134	1,122	1,105	1,086	1,084
	S - D	-2,434	-2,444	-2,448	-2,463	-2,458
	S - E	-2,487	-2,503	-2,496	-2,514	-2,512

Tabela 5.3.3.1 - Resultados das comparações entre o capacitor Itinerante de 100 pF da AH11A e os capacitores do Banco de 1000 pF. (do autor)

		Temperatura (°C)				
d_{XS}	A - S	22,3	22,4	22,4	22,4	22,4
	B - S					
	C - S	22,3	22,4	22,4	22,4	22,4
	D - S	22,3	22,4	22,4	22,4	22,4
	E - S	22,3	22,4	22,4	22,4	22,4
d_{SX}	S - A	22,3	22,4	22,4	22,4	22,4
	S - B					
	S - C	22,3	22,4	22,4	22,4	22,4
	S - D	22,3	22,4	22,4	22,4	22,4
	S - E	22,3	22,4	22,4	22,4	22,4

Tabela 5.3.3.2 – Temperatura do Banco de 1000 pF durante a calibração. (do autor)

Como neste caso a comparação dos capacitores é (100 pF) x (1000 pF) e (1000 pF) x (10 pF), isto é, **1 : 10** e **10 : 1** respectivamente, os valores dos capacitores foram calculados pelas relações:

$$C_X = 10 \times (C_S + d_{SX}) \quad (5.3.1), \text{ e}$$

$$C_X = \frac{1}{0,1} \times (C_S - d_{SX}) \quad (5.3.2),$$

respectivamente.

Os valores $C_X(t)$ da Tabela 5.3.3.3 foram calculados de acordo com a relação 5.3.1.

	$C_X(t)$ em pF				
A	999,9910	999,9911	999,9911	999,9912	999,9912
B					
C	999,9842	999,9844	999,9847	999,9847	999,9848
D	1000,0200	1000,0201	1000,0202	1000,0202	1000,0203
E	1000,0206	1000,0207	1000,0207	1000,0207	1000,0208

Tabela 5.3.3.3 – Valores de $C_X(t)$ obtidos pela relação 1:10. (do autor)

Os valores $C_X(t)$ da Tabela 5.3.3.4 foram calculados de acordo com a relação 5.3.2.

	$C_X(t)$ em pF				
A	999,9907	999,9907	999,9908	999,9908	999,9908
B					
C	999,9841	999,9843	999,9844	999,9846	999,9846
D	1000,0198	1000,0199	1000,0200	1000,0201	1000,0201
E	1000,0204	1000,0205	1000,0204	1000,0206	1000,0206

Tabela 5.3.3.4 – Valores de $C_X(t)$ obtidos pela relação 10:1. (do autor)

Corrigindo-se os valores das Tabelas 5.3.3.3 e 5.3.3.4 para a temperatura de 23 °C, obtiveram-se as tabelas 5.3.3.5 e 5.3.3.6, respectivamente.

	$C_X(23\text{ °C})$ em pF				
A	999,9931	999,9929	999,9929	999,9929	999,9930
B					
C	999,9878	999,9875	999,9877	999,9878	999,9879
D	1000,0218	1000,0216	1000,0217	1000,0218	1000,0218
E	1000,0232	1000,0229	1000,0229	1000,0229	1000,0230

Tabela 5.3.3.5 – Valores de $C_X(23\text{ °C})$ obtidos pela relação 1:10. (do autor)

	$C_X(23\text{ °C})$ em pF				
A	999,9928	999,9925	999,9925	999,9926	999,9926
B					
C	999,9877	999,9873	999,9875	999,9877	999,9877
D	1000,0216	1000,0215	1000,0215	1000,0217	1000,0216
E	1000,0229	1000,0227	1000,0226	1000,0228	1000,0228

Tabela 5.3.3.6 – Valores de $C_X(23\text{ °C})$ obtidos pela relação 10:1. (do autor)

A tabela 5.3.3.7 corresponde à média dos valores obtidos nas Tabelas 5.3.3.5 e 5.3.3.6.

$\bar{C}_X (23^\circ\text{C})$ em pF					
A	999,9930	999,9927	999,9927	999,9928	999,9928
B					
C	999,9878	999,9874	999,9876	999,9877	999,9878
D	1000,0217	1000,0215	1000,0216	1000,0217	1000,0217
E	1000,0230	1000,0228	1000,0228	1000,0229	1000,0229

Tabela 5.3.3.7 – Valores de $\bar{C}_X (23^\circ\text{C})$. (do autor)

- Determinação de Incerteza

O procedimento de determinação da incerteza para a transferência da unidade para o Banco de 1000 pF é similar ao utilizado para o cálculo da incerteza para o Banco de 10 pF, portanto, aqui será mostrado apenas o resultado final.

	Vvc (pF)	U ($\mu\text{F}/\text{F}$)	k
A	999,9928	1,5	2
B			
C	999,9877	2,0	2
D	1000,0217	2,6	2
E	1000,0229	1,8	2

$\bar{C}_{2003} (1000\text{pF}) = 1000,0063 \text{ pF} \pm 2,0 \mu\text{F}/\text{F}$
--

Tabela 5.3.3.8 - Valores de 1000 pF após a transferência em 2003. (do autor)

A média $\bar{C}_{2003} (1000 \text{ pF}) = 1000,0063 \text{ pF} \pm 2,0 \mu\text{F}/\text{F}$ será mantida constante até a próxima calibração no BIPM.

5.4 - A MANUTENÇÃO DA UNIDADE DE CAPACITÂNCIA “farad”

A primeira manutenção da unidade no Lacin, após a transferência, foi realizada utilizando a Ponte de Capacitância 1621 da GenRad e, conforme o esquema da Figura 4.11, para os três Bancos de capacitores, de 10 pF, 100 pF e 1000 pF.

Os resultados da manutenção do Banco de 10 pF estão indicados na Tabela 5.4.1.

A primeira linha, quarta coluna é obtida comparando-se Ax C isto é, $A - C = 0,092$ fF (10^{-9} F) e, a terceira linha, primeira coluna corresponde à comparação CxA isto é $C - A = -0,109$ fF. Cada célula contém cinco repetições.

Valores de δ em femto farad	A	B	C	D	E
A			0,092	-0,136	-0,045
			0,086	-0,135	-0,037
			0,093	-0,134	-0,037
			0,111	-0,129	-0,038
			0,112	-0,128	-0,036
B					
C	-0,109			-0,227	-0,136
	-0,129			-0,226	-0,135
	-0,109			-0,226	-0,129
	-0,097			-0,234	-0,136
	-0,116			-0,228	-0,129
D	0,13		0,197		0,111
	0,13		0,198		0,111
	0,131		0,198		0,111
	0,131		0,223		0,111
	0,132		0,224		0,112
E	0,033		0,131	-0,096	
	0,034		0,131	-0,095	
	0,035		0,133	-0,095	
	0,035		0,132	-0,096	
	0,034		0,132	-0,097	

Temperatura (°C)	A	B	C	D	E
A			22,3	22,3	22,3
			22,4	22,4	22,4
			22,3	22,3	22,3
			22,4	22,4	22,4
			22,3	22,3	22,3
B					
C	22,3			22,3	22,3
	22,3			22,3	22,3
	22,3			22,3	22,3
	22,3			22,3	22,3
	22,2			22,2	22,2
D	22,3		22,3		22,3
	22,3		22,3		22,3
	22,3		22,3		22,3
	22,3		22,3		22,3
	22,4		22,4		22,4
E	22,3		22,3	22,3	
	22,3		22,3	22,3	
	22,3		22,3	22,3	
	22,3		22,3	22,3	
	22,3		22,3	22,3	

Tabela 5.4.1 – Resultados das Comparações – 10 pF e a Temperatura de Medição. (do autor)

Os valores da temperatura durante as comparações estão também indicados na tabela 5.4.1.

Os valores das capacitâncias de A, C, D e E foram calculados de acordo com a relação 28, do item 2.7.2.4, do Capítulo 2, repetido abaixo:

$$\hat{C}_n = \bar{C} + \frac{1}{2k} \left(\sum_{i=1}^k d_{ni} - \sum_{i=1}^k d_{in} \right),$$

Valores dos Capacitores à temperatura T = 22,3 °C					
A _T (pF)	B _T (pF)	C _T (pF)	D _T (pF)	E _T (pF)	\bar{C}_T (pF)
10,00023		10,00014	10,00036	10,00027	10,00025
10,00023		10,00013	10,00036	10,00026	10,00025
10,00023		10,00013	10,00036	10,00026	10,00025
10,00023		10,00013	10,00036	10,00026	10,00025
10,00023		10,00013	10,00036	10,00026	10,00025
Média X(pF)	10,00023	10,00013	10,00036	10,00026	10,00025

Tabela 5.4.2– Os valores dos capacitores à temperatura de 22,3 °C. (do autor)

Onde \bar{C} é a média do Banco calculada na época da transferência, cujo valor à temperatura T=23 °C é igual a: $\bar{C}_{2003}(10 \text{ pF}) = 10,000273 \text{ pF} \pm 3,1 \mu\text{F}/\text{F}$. Os valores dos capacitores à temperatura de 22,3 °C estão indicados na Tabela 5.4.2.

Para exemplificar a determinação dos valores de capacitância, foi montada uma nova tabela 5.4.3 correspondente à Tabela 5.4.1, sem as repetições.

(fF)	A	B	C	D	E
A			0,092	-0,136	-0,045
B					
C	-0,109			-0,227	-0,136
D	0,13		0,197		0,111
E	0,033		0,131	-0,096	

(°C)	A	B	C	D	E
A			22,3	22,3	22,3
B					
C	22,3			22,3	22,3
D	22,3		22,3		22,3
E	22,3		22,3	22,3	

Tabela 5.4.3- Resultados das Comparações– 10 pF e a temperatura de Medição, sem repetições. (do autor)

A Tabela 5.4.3 mostra que a temperatura durante as medições foi de 22,3 °C.

Corrigindo o valor da média para a temperatura de medição obtém-se:

$$\bar{C}_{2003}(10 \text{ pF}) = 10,000246 \text{ pF} \pm 3,1 \text{ mF}/\text{F}.$$

Para k = 4 (nº de capacitores), tem-se:

$$\hat{C}_A = A_{22,3^\circ\text{C}} = 10,000246 + \frac{1}{2 \times 4} [0,092 + (-0,136) + (-0,045) - (-0,109) - 0,130 - 0,033] \times 10^{-3} = 10,000228$$

Portanto, $A_{22,3^\circ\text{C}} = 10,000228 \text{ pF}$

A Tabela 5.4.4 indica os valores dos capacitores calculados à temperatura de 23 °C, que foram obtidos a partir da tabela 5.4.2, aplicando-se a relação 4.1, do item 4.3.2.1, do capítulo 4. Por exemplo, para o capacitor A, $\alpha = 3 \times 10^{-6} \mu\text{F}/\text{F}$ e,

$$A_{23^\circ\text{C}} = A_{22,3^\circ\text{C}} \times (1 + \alpha \times (23 - 22,3)) = 10,000228 \times (1 + 3,0 \cdot 10^{-6} \times (23 - 22,3)) = 10,000249 \text{ pF}.$$

Valores dos Capacitores à temperatura T = 23 °C					
A _{23 °C} (pF)	B _{23 °C} (pF)	C _{23 °C} (pF)	D _{23 °C} (pF)	E _{23 °C} (pF)	$\bar{C}_{23 °C}$ (pF)
10,000249		10,000162	10,000392	10,000288	10,000273
10,000252		10,000160	10,000393	10,000287	10,000273
10,000250		10,000162	10,000393	10,000286	10,000273
10,000251		10,000157	10,000396	10,000287	10,000273
10,000254		10,000156	10,000396	10,000286	10,000273
Média X(pF)	10,000251	10,000159	10,000394	10,000287	10,000273
σ (pF)	1,8E-06	3,0E-06	2,0E-06	7,8E-07	

Tabela 5.4.4 – Valores dos capacitores à temperatura de 23 °C. (do autor)

A última coluna da Tabela 5.4.4 mostra que a média dos capacitores, que como se observa, é a mesma da época da transferência. A penúltima linha indica a média das repetições para cada capacitor, e a última linha indica o desvio padrão experimental de cada conjunto de medições.

- Determinação da Incerteza de Medição

Para determinar a incerteza de medição, serão feitas algumas considerações sobre a equação 28 do item 2.7.2.3 do Capítulo 2.

$$\hat{C}_n = \bar{C} + \frac{1}{2k} \left(\sum_{i=1}^k d_{ni} - \sum_{i=1}^k d_{in} \right)$$

Para facilitar será feita uma análise para o caso onde $n = 1$, considerando que o capacitor B foi excluído do Banco de 10 pF, que para $d_{nn}=0$ e que $d_{ni} = C_n - C_i$, $d_{in} = C_i - C_n$, obtém-se:

$$\hat{C}_1 = C_A = \bar{C} + \frac{1}{4} \times \left(\frac{d_{13} - d_{31}}{2} + \frac{d_{14} - d_{41}}{2} + \frac{d_{15} - d_{51}}{2} \right) = \bar{C} + \frac{3}{4} C_1 - \left[\frac{1}{4} C_3 + \frac{1}{4} C_4 + \frac{1}{4} C_5 \right]$$

Então a contribuição das variáveis que influenciam na calibração do capacitor A é:

$$\delta C_A = \delta \bar{C} + (\delta \bar{C})_t - R_A - \delta V_r + \left[\frac{3}{4} (\delta C_1)_T - \left(\frac{1}{4} (\delta C_3)_T + \frac{1}{4} (\delta C_4)_T + \frac{1}{4} (\delta C_5)_T \right) \right]$$

Onde:

- $\delta \bar{C}$ - é a incerteza da determinação de \bar{C} na transferência, $\delta \bar{C} = 3,1 \mu\text{F}/\text{F}$; (distribuição de probabilidade retangular)

- $(\delta \bar{C})_t$ - é a estabilidade do capacitor de 10 pF determinada no Capítulo 4,
 $(\delta \bar{C})_t = 3\mu\text{F}/\text{F}$; (distribuição de probabilidade retangular)
- R_A - é a repetitividade das medições, $R_A = \frac{\sigma_e}{\sqrt{5}}$; (distribuição de probabilidade normal)
- δV_r - é a variável devida a resolução, $\delta V_r = \frac{r}{\sqrt{3}}$, sendo $r = 1$ pF; (distribuição de probabilidade retangular)
- $\frac{3}{4} \times (\delta C_1)_T$, $\frac{1}{4} \times (\delta C_3)_T$, $\frac{1}{4} \times (\delta C_4)_T$ e $\frac{1}{4} \times (\delta C_5)_T$, são as variáveis devido a influência da temperatura que é obtida na Tabela 4.3, do item 4.3.2.1, Capítulo 4.
 $(\delta C_1)_T = 7,5 \times 10^{-6}$, $(\delta C_3)_T = 9,9 \times 10^{-6}$, $(\delta C_4)_T = 1,3 \times 10^{-5}$, $(\delta C_5)_T = 8,9 \times 10^{-6}$
(distribuição de probabilidade retangular).

Portanto, as componentes de incerteza da medição do capacitor **A** são:

R (pF)	$\delta \bar{C}$ (pF)	$(\delta \bar{C})_t$ (pF)	δV_r (pF)	$(\delta C_1)_T$ (pF)	$(\delta C_3)_T$ (pF)	$(\delta C_4)_T$ (pF)	$(\delta C_5)_T$ (pF)
8,7E-07	2E-05	2E-05	6E-07	3E-06	1E-06	2E-06	1E-06

Tabela 5.4.5 – Componentes da incerteza de medição do Capacitor A. (do autor)

A incerteza combinada u_c é dada pela raiz quadrada da soma dos quadrados de cada componente. O fator de abrangência k é igual a dois para o grau de liberdade efetivo determinado, e a incerteza padrão $U = k \cdot u_c$. O resultado final é apresentado na Tabela 5.4.6.

u_c (pF)	v_{eff}	k	U (pF)
3E-05	3E+06	2E+00	5,1E-05

Tabela 5.4.6 – Os resultados de u_c , u_{eff} e U . (do autor)

O procedimento para a determinação da incerteza para outros valores é similar à determinação da incerteza para o capacitor **A**, portanto a seguir serão apresentados somente os resultados da manutenção da unidade de outros Bancos.

	(pF)	U (pF)	k		(pF)	U (pF)	k		(pF)	U (pF)	k
A	10,000251	5,1E-05	2	A				A	999,9926	3,3E-03	2
B				B	99,99972	3,6E-04	2	B			
C	10,000159	5,1E-05	2	C	99,99976	3,6E-04	2	C	999,9870	3,3E-03	2
D	10,000394	5,1E-05	2	D	100,00258	3,5E-04	2	D	1000,0226	3,3E-03	2
E	10,000287	5,1E-05	2	E	99,99962	3,6E-04	2	E	1000,0230	3,3E-03	2

Tabela 5.4.7 – Resultado da Manutenção da unidade. (do autor)

5.5 - A COMPARAÇÃO INTERLABORATORIAL

Como exposto anteriormente, a comparação interlaboratorial dentro do Sistema Interamericano de Metrologia - SIM irá iniciar somente em fevereiro de 2004 e a participação do Lacin ocorrerá apenas em setembro de 2004. Três capacitores Padrão irão circular pelos NMI's dos países das três Américas: NIST /Estados Unidos, que será o laboratório piloto, NRC/Canadá, CENAM/México, ICE/Costa Rica, UTE/Uruguai, INTI/Argentina e INMETRO/Brasil.

Dois capacitores serão do fabricante Andeen Hagerling, de 10 pF e 100 pF, e um capacitor do fabricante General Radio de 1000 pF. Deverão ser medidos nas frequências de 1000 Hz e 1592 Hz. Cada laboratório terá um prazo de duas semanas para realizar as medições.

Devido a impossibilidade de realizar essa comparação em tempo hábil, até o término desta dissertação, será realizada uma simulação de uma comparação interlaboratorial.

Como já foi citado, em novembro de 2003, o Lacin adquiriu uma Ponte de Capacitância do fabricante Andeen Hagerling, modelo AH2700A, de alta exatidão ($\pm 5 \mu\text{F}/\text{F}$) e estabilidade de ($\pm 1 \mu\text{F}/\text{F}/\text{ano}$). Para realizar a simulação, será utilizada esta ponte como um padrão de referência, contra a referência mantida pelos Bancos de capacitores que realizam a Manutenção da unidade no Inmetro.

5.5.1 - Metodologia

Três capacitores, dois do fabricante Andeen Hagerling, modelo AH11A de 10 pF, 100 pF e um do fabricante General Radio, modelo 1404A de 1000 pF, que não fazem partes dos bancos, serão utilizados como “Padrões de Transferência”.

Todos capacitores serão medidos com a Ponte de Capacitância AH2700A e em seguida serão comparados com os Bancos de capacitores do Lacin. Os padrões de 10 pF e 100 pF têm baixíssimo coeficiente de temperatura (0,3 $\mu\text{F}/\text{F}$)/ $^{\circ}\text{C}$ e são mantidos num recipiente com temperatura constante.

5.5.2 - Resultados

A Tabela 5.5.2.1 mostra os resultados da calibração dos capacitores de transferência com a Ponte AH 2700A, com as respectivas incertezas. As incertezas são todas iguais a ($\pm 5 \mu\text{F}/\text{F}$), porque devem estar de acordo com o certificado de calibração emitido pelo fabricante. Foram realizadas cinco repetições para capacitor.

	(pF)	U(pF)
10pF	9,99996	5,E-05
100pF	99,9996	5,E-04
1000pF	999,998	5,E-03

Tabela 5.5.2.1 – Resultados das medições com a Ponte AH2700A. (do autor)

A tabela 5.5.2.2 mostra os resultados das comparações dos capacitores de transferência com os Bancos de 10 pF, 100 pF e 1000 pF. Foram realizadas cinco repetições para capacitor.

	(pF)	U(pF)
10pF	9,999968	3,5E-05
100pF	99,99975	2,3E-04
1000pF	999,9976	2,7E-03

Tabela 5.5.2.2 – Resultados das Comparações com os Bancos do Lacin. (do autor)

Como visto no Capítulo 4, para verificar se as medições realizadas no laboratório são aceitáveis, deve-se determinar o erro normalizado $E_n = \frac{|R_{\text{Lab}} - R_{\text{Ref}}|}{\sqrt{(U_{\text{Lab}}^2 + U_{\text{Ref}}^2)}}$, fórmula

4.3.6.1 do item 4.3.6, e deve-se verificar se é respeitada a condição de que **$E_n < 1$** .

Mais especificamente, para a comparação no valor de 10 pF:

$$E_n(10\text{pF}) = \frac{|C_{\text{Lacin}}(10\text{pF}) - C_{\text{Ref}}(10\text{pF})|}{\sqrt{(U_{\text{Lab}}^2 + U_{\text{Ref}}^2)}} = \frac{|9,99996 \times 10^{-6} - 9,999968 \times 10^{-6}|}{\sqrt{(3,5 \times 10^{-5})^2 + (5 \times 10^{-5})^2}} = 0,09 < 1$$

Conclui-se que, de acordo com essa comparação, as medições no valor de 10 pF realizadas no Lacin são aceitáveis.

Para os capacitores de 100 pF e 1000 pF obteve-se, $En(100 \text{ pF}) = 0,3 < 1$ e $En(1000 \text{ pF}) = 0,04 < 1$. Logo, conclui-se que as medições realizadas no Lacin em 100 pF e 1000 pF são aceitáveis.

5.5.3- Conclusão

O resultado obtido nesta simulação dá um grande indicativo de que o Lacin obterá êxito na comparação interlaboratorial que será realizado pelo Sistema Interamericano de Metrologia neste ano de 2004.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

6.1 - QUANTO AOS OBJETIVOS

Todos os principais objetivos propostos foram atingidos. As variáveis que influenciam no processo de rastreabilidade das medições foram determinadas. Algumas delas estão sendo minimizadas, tais como as condições ambientais e os recursos humanos. Além disso, outras foram quantificadas por meio da determinação da incerteza de medição, por exemplo a variável estabilidade temporal e a variável temperatura.

O Acordo de Reconhecimento Mútuo entre os NMI's ainda não foi confirmado porque o Lacin está exatamente nesse processo. Como já citado durante a evolução da pesquisa, a comparação interlaboratorial de capacitores-padrão proposto pelo SIM irá iniciar em fevereiro de 2004, sendo que a participação do laboratório ocorrerá em setembro deste mesmo ano. A outra etapa do processo será a Avaliação Técnica do laboratório Lacin, de acordo com a Norma NBR ISO /IEC 17025, que ocorrerá em março de 2004.

Embora a comparação interlaboratorial não tenha ainda ocorrido, a simulação realizada no laboratório deu um bom indicativo de que a pesquisa atingiu o êxito esperado.

Na verdade, pode-se considerar que a pesquisa foi além dos objetivos previstos, porque apresentou um procedimento completo para a realização da rastreabilidade da medição da grandeza capacitância e apresentou também todo o processo de determinação de incerteza.

Esses procedimentos e processos são de fundamental importância para o Sistema metrológico do Brasil, pois sem eles o Inmetro, como um Instituto Nacional de Metrologia – NMI, não teria condições de garantir com confiabilidade metrológica a rastreabilidade da unidade de capacitância às indústrias, aos Centros de Pesquisas e às Universidades.

6.2 - QUANTO Á SOLUÇÃO DO PROBLEMA PROPOSTO: “DIFICULDADES NA EXECUÇÃO DA RASTREABILIDADE DA UNIDADE DE CAPACITÂNCIA COM CONFIABILIDADE METROLÓGICA”.

A determinação das variáveis que influenciam no processo de rastreabilidade foi a chave mestra para reduzir ou mesmo eliminar a dificuldade para a execução da rastreabilidade da unidade de capacitância com confiabilidade metrológica. Foram dados novos rumos para a determinação de incerteza, e para a orientação das pessoas que atuam tecnicamente no laboratório.

6.3 - SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Os fabricantes de instrumentos de medição, devido aos avanços tecnológicos, vêm desenvolvendo instrumentos cada vez mais exatos e de menor incerteza de medição, e vêm facilitando a sua aquisição. Os NMI's devem se preparar, desenvolvendo em seus laboratórios sistemas que tenham incertezas de medição no mínimo dez vezes menor que tais instrumentos.

Em curto prazo sugere-se que Lacin adquira novos Bancos de capacitores, 1 pF, 10 pF e 100 pF que tenham estabilidade temporal inferior a 1×10^{-6} , em valor relativo e que venham instalados em recipientes termo-regulados. Atualmente no mercado internacional estão à venda os capacitores do fabricante Andeen Hagerling, cuja estabilidade temporal é de $0,3 \times 10^{-6}$, em valor relativo e recipientes com regulação de temperatura inferior a 0,1 °C. (Prazo Máximo: 2 anos).

Em médio prazo, sugere-se que o Lacin desenvolva e implante o sistema de reprodução da unidade “farad” descrito no item 2.6.3, Capítulo 2.(Prazo Máximo: 4 anos).

Em longo prazo, sugere-se que o Lacin desenvolva junto às Universidades, o sistema baseado no novo princípio para a realização da unidade de capacitância “farad” que é baseado no sistema SET (Single Elétron Tunneling).

“A idéia básica do experimento é carregar um capacitor de capacitância C com um número bem definido de n elétrons e medir a tensão elétrica U em seus terminais. A capacitância, de acordo com a sua própria definição, é dada por $C = \frac{n \cdot e}{U}$. A contagem dos elétrons pode ser feita com a ajuda de um circuito especial de SET, a chamada “bomba

SET”. A tensão U é determinada através da Tensão Padrão de Josephson de acordo com $U = \frac{i \cdot f \cdot h}{2 \cdot e}$, sendo que (i) é o número do patamar do efeito Josephson, (f) é a frequência do sinal aplicado na junção, (h) é a constante de Planck, e (e) é a carga elétrica. Assim, a capacitância C pode ser expressa em termos de constantes físicas fundamentais, (e) e (h), a frequência (f), e dois números inteiros (n) e (i). Assim, o experimento permite a determinação da capacitância elétrica em bases Quânticas, como já é hoje usual para a tensão Elétrica U (que utiliza o Efeito Josephson) e a Resistência Elétrica R (que utiliza o Efeito Hall Quântico).

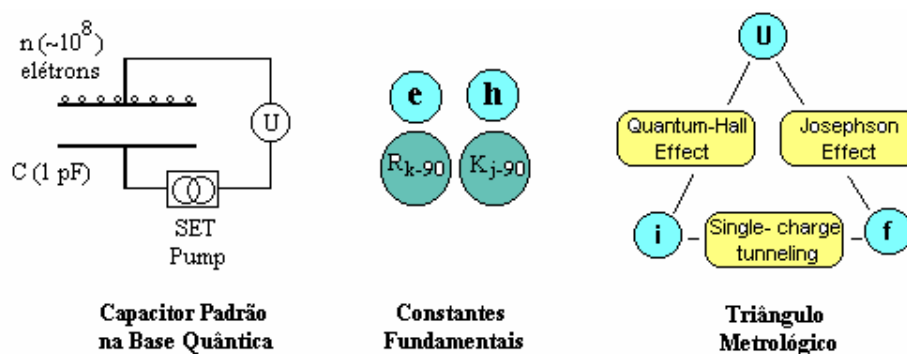


Figura 6.3 – Bases Quânticas para a definição da unidade de capacitância (Portal do PTB, p.1)

Se o experimento é realizado com exatidão metrológica, isto é, com uma incerteza relativa $< 10^{-7}$, isto abrirá uma perspectiva interessante como a mais exata determinação das constantes fundamentais (isto é, (e) e (h) ou a constante da estrutura fina), e oferece uma alternativa possível para fechar o triângulo metrológico” (Portal do PTB, p.1). (Prazo Máximo: 8 anos)

6.4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

A maior importância da elaboração desta pesquisa, para o autor, foi aprender a procurar pelo desconhecido, a organizar conceitos e principalmente, descobrir que na metrologia, embora considerada recentemente como ciência, há muito que se estudar.

Espera-se que este trabalho seja o início de muitos outros.

CAPÍTULO 7

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

7.1 - OBRAS CITADAS

COMITÊ BRASILEIRO DE METROLOGIA - CBM, *Diretrizes Estratégicas para a Metrologia Brasileira 2003-2007*, Rio de Janeiro, 29/01/2003, 39 p.

DOQ-DIMCI-03, Revisão 00- Junho de 1999 – Inmetro – *Orientações sobre Calibração e Rastreabilidade das Medições em Laboratórios*. Rio de Janeiro.11.p.

DOC-DIMCI-005, Revisão 00; agosto de 1999 - Inmetro “*Orientações para Organização de Comparações Interlaboratoriais pelas Comissões Técnicas da RBC*”. Rio de Janeiro. 10 p.

FLUKE – *Calibration: Philosophy and Practice*, Second Edition, 1994, Fluke Corporation, P.O. Box 9090, Everett, WA 98206-9090, USA, Library of Congress Catalogue Number: 93-90764, p. 12-3 a 12-12.

GIL, Antonio Carlos ; *Métodos e técnicas de pesquisa social*. 5.ed. São Paulo: Atlas, 1999. 206 p.

IHLENFELD, W.G. Kürten: *Maintenace of Measuring Electrical Units Trough Intercomparison Program of Standards, using the Least Squares Method*. Curitiba/Pr, Laboratório Central de Eletrotécnica e Eletrônica. 1989. 76 p.

INMETRO. *Vocabulário internacional de Termos Fundamentais e Gerais da Metrologia – VIM*, 2. ed. Brasília, SENAI/DN, 2000. 75 p.

INMETRO, Programa RH-Metrologia e da Sociedade Brasileira de Metrologia, Tradução autorizada pela European Co-operation for Accreditation (EA), *Expressão da Incerteza de Medição na Calibração*, Referência Original do Editor : EAL-R2, Primeira edição brasileira do EA-4/02 – Rio de Janeiro: Inmetro, ABNT, SBM, 1999, 34 p.

ISOGUM, INMETRO, Programa RH-Metrologia, Sociedade Brasileira de Metrologia e ABNT; *Guia para Expressão da Incerteza da Medição*, Primeira Edição Brasileira – Rio de Janeiro: Inmetro, 1997, 120 p.

JEFFERY, A., Elmquist, R.E., SHIELDS, J.Q., LEE, L.H., CAGE, M.E., SHIELDS, S.H., and DZIUBA, R.F., *Determination of the von Klitzing Constant through a Comparison of the Quantized Hall Resistance and the Ohm Derived from the NIST Calculable Capacitor*, *Metrologia* . USA. Vol. 35, pp. 83-96, 1998.

KIND, Dieter, QUINN, Terry, *Metrology: Quo Vadis?*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, v.44, n.2, April 1995, p.85-89.

KYRIAZIS, Gregory A. - *Comparação da Capacitância com a Resistência Hall Quantizada no Inmetro – Uma Proposta de Projeto* . SEMETRO 2000. Rio de Janeiro. 6 p.

LEE, Era Duk; KIM, Han Jun; Small, GREIG W., *International Comparison of Standard Capacitors Under the Ásia/Pacific Metrology Programme*, IEEE Transactions Instrumentation and Measurement, v.44, n.2, April 1995, pg 443-446.

MARTINS, Regina Copello, *Gestão de Pessoas em uma Organização Pública: uma proposta de melhoria*; Dissertação (Mestrado em Sistema de Gestão), Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2003.

NBR ISO/IEC 17025, *Requisitos Gerais para Competência de Laboratórios de Ensaio e Calibração*, Rio de Janeiro - Brasil, ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Janeiro de 2001, 20 p.

PORTAL DO PTB – (<http://www.ptb.de/de/en/org/2/24/242/e-setcap-1.htm>) “Technical Divisions – Division 2/Department 2.4 – Section 2.42” Homepage, *Capacitance Standard on Set – Basis*, p.1

SAAD, Fuad Daher, et al. Grupo de Estudos em Tecnologia de Ensino da Física - Getef, *Física Auto Instrutivo-FAI-1*, 5.Ed.São Paulo: Saraiva, 1974. p. 44- 48.

SILVA, Luiz Roberto Oliveira da; *Metrologia: Uma ferramenta indispensável no Controle Produtivo para a QS 9000*; ENQUALAB – 2003. São Paulo.
 INMETRO. *SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES –SI*. 6.ed Brasília, SENAI/DN, 2000. 114p. Convênio SENAI/DN/INMETRO.

THEISEN, Álvaro Medeiros de Farias, *Fundamentos da Metrologia Industrial: Aplicação no processo de certificação ISO 9000*, 1.Ed Porto Alegre: Suliani-Editografia Ltda. 1997. 205 p.

THOMPSON, A.M., and LAMPARD, D.G., *A New Theorem in Electrostatics and its Application to Calculable Standards of Capacitance*, Nature, Vol.177, pp. 888, 1956.

7.2 - OBRAS CONSULTADAS

BACKMAIR, H., et al., IEEE Transactions on Instrument, Vol. 44, nº 2, april 1995, *Realization and Maintenance of the Unit of Capacitance with the PTB Cross Capacitor during the Last Ten Years*, p. 440-442.

BELLON, M., FAU, A., *Détermination Direct du farad et de l'ohm au LCIE*, Bulletin BNM nº 73, Juillet 1988, p20-29.

CAMERON, J.M., **The Use of the Method of Least Squares in Calibration**, U.S. Department of Commerce – National Bureau of Standards , September 1974.

DELAHAYE, F., AWAN, S. A. , Bureau International des Poids e Mesures, *Bilateral Comparison of 10 pF and 100 pF Capacitance Standards Between NPL and BIPM*, April/may 2002, 10 p.

EAL - European Cooperation for Accreditation of Laboratories

_____ EAL – G12 - *Traceability Measuring and Test Equipment to National Standards*, Edition 1, November 1995, 16 p.

_____ EAL – 2/07 – *EAL Strategy to Achieve Comparability of Results in Calibration and Testing*, Edition 1, May 1997, 8 p.

EHRlich, C. D., RASBERRY, S. D., Journal of Reserch of the National Institute of Standards and Technology, Volume 103, Number 1, January-February 1998, *Metrological Timelines in Traceability* , p. 93-105.

GENERAL RADIO, *Bridges and Standards*, USA. 1984, 46 p.

GENEVES, G., TRAPON, G., et. Al., *Travaux Recents en Metrologie Électriques Fondamentale*, BNM-LCIE – France. mai 1995, 9 p.

HONDA, M., *A Guide to Measurement Technology and Techniques, The Impedance Measurement Handboob*, Yokogawa-Hewlett Packard LTD, 1989.

ILAC – G2:1994, *Internactional Laboratory Accreditation Cooperation –Traceability of Measurements*, 1996, 54 p.

KIBBLE, B.P., RAYNER, G.H., *Coaxial AC Bridges*, 1984, Published by Adam Hilger Ltd, Techno House, Redcliffe Way, Bristol BSI 6NX. 193 p.

KOSE, V., SIEBERT, B.R.L., WÖGER, W., Institute of Physics Publishing, *Metrologia* 40 (2003) *General Principles for the Definition of the Base Units in the SI*, p. 146-153, 2003.

LAMPARD, D:G., Institution Monograph, January 1957. *A New Theorem in Eletrostatics with Applications to Calculable Standards of Capacitance*. p. 271-280.

NIS – 3003, NAMAS, *The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement for Calibrations*, Edition 8, May 1995, 45 p.

PERRIN, J.C., *Constitution D'un Laboratoire Type D'Etalonnage*, Laboratoire Central des Industries Electriques, France, 1979, 15 p.

STOUT, M.B., *Curso Básico de Medidas Elétricas*, tradução Armando Bandeira de Lima. Rio de Janeiro, Livros técnicos e Científicos; São Paulo, Ed. da Universidade de São Paulo, 1974. 511 p.