



José Luiz Machado Kronenberg

**Contribuições para o Fortalecimento
do Laboratório Nacional Brasileiro de
Metrologia de Tempo e Frequência**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia do Centro Técnico Científico da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Área de Concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação.

Orientador: Prof. Dr. Maurício Nogueira Frota

Rio de Janeiro
Agosto de 2007



José Luiz Machado Kronenberg

Contribuições para o Fortalecimento do Laboratório Nacional Brasileiro de Metrologia de Tempo e Frequência

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora e homologada pela Coordenação Setorial de Pós-Graduação, formalizado pelas respectivas assinaturas.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Maurício Nogueira Frota

Orientador
Programa de Pós-Graduação em Metrologia (PósMQI)
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)

Prof. Dr. Giorgio Moscati

Instituto de Física da USP, CIPM/BIPM e INMETRO

Dr. Ricardo José de Carvalho

Observatório Nacional, ON/MCT

Prof. Dr. Fernando da Rocha Pantoja

Centro de Instrução Alm. Wandenkolk, CIAW

Coordenação Setorial de Pós-Graduação:

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial de Pós-Graduação do
Centro Técnico Científico (PUC-Rio)

Rio de Janeiro, 27 de agosto de 2007.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

José Luiz Machado Kronenberg

Graduou-se em Engenharia Elétrica – Especialização Eletrônica em 1975. Experiência de mais de vinte anos em laboratórios de calibração e manutenção, tendo cursos no exterior e participações em congressos e seminários. Atualmente, trabalha no Observatório Nacional – Divisão Serviço da Hora.

Ficha Catalográfica

Kronenberg, José Luiz Machado

Contribuições para o Fortalecimento do Laboratório Nacional Brasileiro de Metrologia de Tempo e Freqüência / José Luiz Machado Kronenberg ; orientador: Maurício N. Fota. – 2007.

283 p. ; 29,7 cm

Dissertação (Mestrado em Metrologia. Área de Concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Inclui bibliografia

1. Metrologia – Teses. 2. Tempo e freqüência. 3. Disseminação de data-hora. 4. Melhor capacidade de medição. 5. Incerteza de medição. 6. Sistema da qualidade. I. Fota, Maurício N.. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Metrologia. Área de Concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação. III. Título.

CDD: 389.1

DEDICATÓRIA

À vida!

À liberdade da mente!

À responsabilidade do saber!

Ao saber que a mente pode!

À chama permanente da fé!

À perseverança!

À fé na vida!

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Maurício Nogueira Frota pela confiança depositada, pelo incentivo e pelo apoio prestado nesta jornada metrológica e à PUC-Rio pelos auxílios concedidos sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Aos colegas da Divisão Serviço da Hora do Observatório Nacional que vibraram com meu engajamento nesta missão e progressos ao longo deste trabalho.

Agradecimento especial aos colegas Ivan Mourilhe Silva, Mário Noto Fittipaldi e Ricardo José de Carvalho pelo apoio dado com seus conhecimentos sobre a área de tempo e frequência e pela colaboração na coleta de dados para a composição desta dissertação.

À minha esposa Carmen e filhas Ana Carolina e Lívia, minha mãe Maria Luiza e minha irmã Maria Lucia que compartilharam comigo este período de dedicação aos estudos e minhas preocupações sobre o andamento desta caminhada de conhecimento.

RESUMO

Kronenberg, José Luiz Machado; Frota, Maurício Nogueira. **Contribuições para o Fortalecimento do Laboratório Nacional Brasileiro de Metrologia de Tempo e Frequência**. Rio de Janeiro, 2007. 283p. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Metrologia do Centro Técnico Científico da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Área de Concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação.

Objetivos: três são os objetivos centrais da presente pesquisa de mestrado em metrologia: (i) no âmbito da missão institucional da Divisão Serviço da Hora (DSHO) do Observatório Nacional (ON), desenvolver um diagnóstico da melhor capacidade de medição e do sistema da qualidade do Laboratório Primário de Tempo e Frequência (LPTF); (ii) à luz das práticas internacionais, calcular e expressar as incertezas de medição associadas à realização e disseminação das unidades de tempo e frequência em âmbito nacional; (iii) em atendimento às exigências do Acordo de Reconhecimento Mútuo celebrado pelo Brasil no âmbito da Convenção do Metro, preparar e disponibilizar a declaração da melhor capacidade de medição (CMC) do LPTF, na base de dados do *Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM).

Motivação: a presente pesquisa de mestrado foi motivada pela necessidade de se: (i) formalizar a melhor capacidade de medição na base internacional de dados *Key Comparison Data Base* (KCDB) do *Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM); (ii) adequar a nova estrutura do DSHO/ON às instalações da recém-construída infraestrutura laboratorial; (iii) estabelecer a rastreabilidade nacional em TF para atender à nova formulação introduzida pelo BIPM (método AV); (iv) implementar o Plano de Ações para melhoria do Sistema da Qualidade da DSHO, pré-condição ao reconhecimento nacional e internacional da metrologia brasileira em TF.

Contextualização: em Metrologia, as comparações interlaboratoriais constituem-se em prática e exigências para se garantir padronização e a confiança mútua nos processos de desenvolvimento e aprimoramento de métodos e processos de medição. A medição e difusão da grandeza tempo (data-hora) necessitam rastreabilidade permanente e contínua ao padrão mundial, impondo aos laboratórios que participam da cadeia de rastreabilidade uma responsabilidade e dificuldade operacional para manutenção ininterrupta deste serviço. A melhoria e manutenção do Sistema da Qualidade, a caracterização das incertezas de medição e a divulgação desses dados junto

aos foros internacionais por meio do BIPM constituem responsabilidades da missão institucional do Laboratório Primário de Tempo e Frequência.

Metodologia: o trabalho desenvolveu-se em conformidade aos seguintes preceitos metodológicos: (i) diagnóstico e caracterização dos padrões (primários e secundários), equipamentos e sistemas de medição disponíveis; (ii) identificação das variáveis críticas dos sistemas de medição, com vistas à determinação das incertezas a elas associadas, tendo como referência o *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (GUM) e a Variância de Allan (avaliação da estabilidade de osciladores); (iii) caracterização da estrutura da rastreabilidade brasileira em tempo e frequência e definição do seu *status* junto ao BIPM (formalizado mensalmente pela sua Circular-T); (iv) caracterização da melhor capacidade de medição do LPTF, para torná-la disponível na base de dados KCDB do BIPM.

Resultados: à luz das práticas internacionais, os seguintes resultados foram consolidados: (i) expressão das incertezas de medição associadas à realização e disseminação das unidades de Tempo e Frequência do LPTF do Brasil; (ii) expressão e padronização da melhor capacidade de medição em TF do LPTF para inclusão na base de dados internacional KCDB do BIPM; (iii) caracterização e equacionamento de questões críticas dos processos de calibração que afetam a melhor capacidade de medição e do Sistema da Qualidade da DSHO.

Conclusões: com base numa avaliação crítica do sistema instalado, o presente trabalho contribuiu para a consolidação de um sistema de metrologia primária de TF mais robusto no Brasil, viabilizando a implementação operacional de novos padrões e equipamentos, rotinas de monitoramento e controle. Em particular, formalizou a expressão da melhor capacidade de medição (*CMC-Calibration Measurement Capability*, Anexo-C do CIPM/MRA) do LPTF, permitindo ao Brasil cumprir exigência do acordo de reconhecimento mútuo do sistema brasileiro de medição (de TF) celebrado com o *Comité International des Poids et Mesures* (CIPM), do qual participam atualmente 45 Estados-Membros, 20 associados da CGPM e 2 organizações internacionais (ISO e OIML).

Palavras-Chave

1. Metrologia. 2. Tempo e Frequência. 3. Disseminação de data-hora. 4. Melhor Capacidade de Medição. 5. Incerteza de Medição. 6. Sistema da Qualidade.

ABSTRACT

Kronenberg, José Luiz Machado; Frota, Maurício Nogueira. **Contributions for the Strengthening of the Brazilian National Laboratory of Time and Frequency**. Rio de Janeiro, 2007. 283p. M. Sc. Dissertation - Programa de Pós-Graduação em Metrologia do Centro Técnico Científico da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Área de Concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação.

Objectives: the three main objectives of the present research project are as follows: (i) to develop a diagnosis of the best calibration and measuring capability and the quality system of the Brazilian National Time and Frequency Primary Laboratory (LPTF) of the Time Service Division (DSHO) of the National Observatory (ON) ; (ii) to calculate and express, in accordance with international practices, the measuring uncertainties associated with the achievement and dissemination of the time and frequency units within the country and (iii) to prepare and make available the declaration of the best calibration and measurement capability (CMC) of the LPTF according to the database of the Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) as required by the Mutual Recognition Agreement (signed by Brazil within the scope of the Convention of the Metre).

Motivation: several factors motivated this master's degree research project: (i) the necessity of making available the best calibration and measurement capability according with the international Key Comparison Data Base (KCDB) of the Bureau International de Poids et Mesures (BIPM); (ii) the need to adapt the new structure of the Time Service Division (DSHO) of the National Observatory (ON) to the recently built laboratory infrastructure; (iii) the necessity of establishing a national traceability of TF according to the new format introduced by the BIPM (AV method) and (iv) the urgent need to implement the Action Plan to improve the Quality System of the DSHO, a pre-established condition to both, national and international recognition.

Context: In metrology, interlaboratory comparisons are common practice. This is the recommended procedure to guarantee standardization and mutual recognition in the development and improvement of methods of measurement. Measurement and dissemination of time (date-hour), in particular, requires continuous and permanent traceability to international standards as they impose to time and frequency laboratories an uninterrupted provision of this service. The improvement and surveillance of the Quality System, the characterization of the measuring uncertainties and dissemination

of time and frequency data to the relevant international fora to meet BIPM requirements constitute responsibilities of the institutional mission of any Primary Time and Frequency Laboratory.

Methodology: the present work was developed in accordance with the following methodological principles: (i) diagnosis and characterization of the standards (primary and secondary), equipment and measuring systems available at the LPTF; (ii) identification of the critical variables of the measuring systems to determine the uncertainties associated with the measuring of time and frequency, having the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) and the Allan Variance (oscillators stability evaluation) as reference; (iii) characterization of the Brazilian time and frequency traceability structure and its formalization in accordance with the monthly formalized BIPM Circular-T; (iv) characterization of the CMC of the LPTF to make it available at the KCDB of the BIPM.

Results: according to international practices, the following results were consolidated: (i) expression of the measuring uncertainties associated to the realization and dissemination of time and frequency; (ii) expression and standardization of the best calibration and measuring capability in time and frequency of the LPTF to be included in the BIPM Key Comparison Data Base; (iii) characterization and understanding of critical issues inherent to calibration processes which directly affect the best measurement capability and the Quality System of the DSHO.

Conclusion: based on a critical evaluation of the metrological system in place, the present work has contributed to the consolidation of a more robust primary system of time and frequency in Brazil. Such system allows for the implementation of new operational standards, new metrology equipment and controlling of monitoring routines. In particular, It has made available the declaration of the best calibration and measuring capability of the LPTF, which allowed the development of the Calibration Measurement Capability (CMC, Appendix-C of the CIPM/MRA). As a resulted, Brazil fulfills the major requirement of the mutual recognition system (in TF) signed with the Comit e International des Poids et Mesures (CIPM) of which participate 45 Member States and 2 international organizations (ISO e OIML).

KeyWords

1. Metrology. 2. Time and Frequency. 3. Date-Time dissemination. 4. Best Measurement Capability. 5. Uncertainty in measurement. 6. Quality System.

SUMÁRIO

1. MOTIVAÇÃO, OBJETIVOS E METODOLOGIA	23
2. FUNDAMENTOS DE METROLOGIA DE TEMPO E FREQUÊNCIA	27
2.1. Sistema Internacional de Unidades (SI): um breve histórico	27
2.2. Unidades de tempo e frequência (TF): uma visão histórica	29
2.3. Definição do segundo, escalas de tempo e fusos horários	34
2.4. A navegação e a necessidade de relógios estáveis	41
2.5. Tempo, período e frequência	44
2.6. Exatidão e estabilidade	45
2.7. Padrões atômicos de TF e o tempo atômico	49
2.8. Padrões atômicos de TF: estado-da-arte	60
3. CALIBRAÇÃO DE TEMPO E FREQUÊNCIA	69
3.1. Calibração de frequência e rastreabilidade	69
3.2. Estabilidade	76
3.3. Métodos de calibração de frequência	82
3.4. Calibração de tempo, padrões de transferência e os sistemas de satélites	84
3.4.1. Sistema GPS	85
3.4.2. Sistema GLONASS e GALILEO	90
3.5. Métodos de transferência por satélites	91
3.5.1. Método Visada Comum	91
3.5.2. Método TWSTFT	93
3.5.3. Método <i>All-in-View</i>	94
4. CADEIA DE RASTREABILIDADE DE TF	95
4.1. A Estrutura de rastreabilidade	95
4.2. Estabelecendo rastreabilidade a um NMI	96
4.2.1. Aplicações que requerem rastreabilidade de TF	98
4.2.2. O Tempo Atômico Internacional e o Tempo Universal Coordenado	100
4.2.3. Circular-T do BIPM	103
4.3. Organizações internacionais e regionais de metrologia	104
4.3.1. O Tratado Diplomático da Convenção do Metro	105
4.3.2. O <i>Bureau International des Poids et Mesures</i>	106

4.3.3. Conferência Geral de Pesos e Medidas	107
4.3.4. Comitê Internacional de Pesos e Medidas	107
4.3.5. Comitê Consultivo para Tempo e Freqüência	108
4.3.6. European Collaboration in Measurement Standards	108
4.3.7. Sistema Inter-americano de Metrologia	110
4.3.8. Euro-Asian Cooperation of State Metrology Institutions	110
4.3.9. Southern African Development Community Cooperation in Measurement Traceability	111
4.3.10. Asia Pacific Metrology Programme	111
4.3.11. International Earth Rotation and Reference Systems Service	111
4.3.12. International GPS Service	112
4.4. Institutos Nacionais de Metrologia (NMI)	112
4.4.1. Observatório de Paris e o LNE-SYRTE	113
4.4.2. Observatório Nacional e Divisão Serviço da Hora	113
4.4.3. Physikalisch-Technische Bundesanstalt	118
4.4.4. National Physical Laboratory	118
4.4.5. National Institute of Standards and Technology	119
4.4.6. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial	119
5. ACORDO DE RECONHECIMENTO MÚTUO E MELHOR CAPACIDADE DE MEDIÇÃO	121
5.1. O Acordo de Reconhecimento Mútuo (CIPM MRA)	121
5.2. Joint Committee of the Regional Metrology Organizations and BIPM	123
5.3. Base de dados KCDB e Melhor Capacidade de Medição	123
5.3.1. Base de dados KCDB – Anexo A	124
5.3.2. Base de dados KCDB – Anexo B	124
5.3.3. Base de dados KCDB – Anexo C	124
5.3.4. Base de dados KCDB – Anexo D	129
6. FUNDAMENTOS DA EXPRESSÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO DE TF	131
6.1. Conceitos básicos sobre a expressão da incerteza de medição	131
6.1.1. Linhas gerais e definições	131
6.1.2. Avaliação das incertezas de medição das estimativas de entrada	133
6.1.3. Avaliação do Tipo A da incerteza padrão	133
6.1.4. Avaliação do Tipo B da incerteza padrão	135

6.1.5. Cálculo da incerteza padrão da estimativa de saída	136
6.1.6. Incerteza expandida da medição	138
6.1.7. Declaração da incerteza de medição nos certificados de calibração	139
6.1.8. Procedimento passo-a-passo para o cálculo da incerteza de medição	140
6.1.9. Fontes de incerteza de medição	141
6.1.10. Fatores de abrangência derivados dos graus efetivos de liberdade	142
6.2. Estabilidade de frequência e variância de Allan	143
6.3. Propagação da incerteza de medição de TF	146
7. APRIMORAMENTO DO SISTEMA METROLÓGICO DO LABORATÓRIO PRIMÁRIO DE TEMPO E FREQUÊNCIA	151
7.1. O LPTF e sua rastreabilidade ao Sistema Internacional de Unidades	153
7.2. LPTF e sua estrutura interna de calibração de TF	179
7.3. Caracterização dos sistemas de medição e incertezas associadas	180
7.3.1. Sistemas de rastreamento de satélites	180
7.3.1.a. Receptor GPS monocanal TTR-6	180
7.3.1.b. Receptor GPS multicanal TTS-2	181
7.3.1.c. Receptor GPS multicanal SIM	181
7.3.2. Sistemas de calibração interna	182
7.3.2.a. Padrão de frequência de feixe de césio	183
7.3.2.b. Amplificador distribuidor	184
7.3.2.c. Contador de intervalo de tempo	186
7.3.2.d. Sintetizadores de frequência	194
7.3.2.e. Analisador de intervalo de tempo e frequência - TSC5110A	197
7.3.2.f. Equipamento – CRONOMED	199
7.3.2.g. Equipamento – TACOMEDE	207
7.3.2.h. Equipamento – AUTOMED2	211
7.3.2.i. Equipamento comparador de fase e registrador	215
8. EXPRESSÃO DA MELHOR CAPACIDADE DE MEDIÇÃO DO LPTF	217
8.1. CMC <i>Time Scale Difference</i>	217
8.1.1. Relógio local e comparação direta com UTC(ONRJ)	220
8.1.2. Relógio local e comparação com UTC	221
8.2. CMC <i>Frequency</i>	221
8.2.1. Oscilador padrão local com padrão de frequência do ONRJ	222
8.2.2. Gerador de frequência com padrão de frequência do ONRJ	223
8.2.3. Contador de frequência local com padrão do ONRJ	224

9. SÍNTESE DOS RESULTADOS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	227
9.1. Balizadores	227
9.2. Síntese dos Resultados	228
9.3. Principais conclusões	229
9.4. Recomendações	230
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	233
SITES CONSULTADOS	237
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR	239
ANEXO A - Decreto nº 2.784 de 18 de junho de 1913.	241
ANEXO B - Decreto nº 10.546 de 5 de novembro de 1913.	243
ANEXO C - Decreto nº 4264 de 10 de junho de 2002.	245
ANEXO D - Formato GGTTTS GPS DATA FORMAT, VERSION 01	247
ANEXO E - Circular-T 222 BIPM	251
ANEXO F - Circular-T 225 BIPM	261
ANEXO G - Circular-T 227 BIPM	271
ANEXO H – Determinação do fim da disponibilidade seletiva (SA)	281

SIGLAS

- **BIPM** – *Bureau International des Poids et Mesures*
- **CCDS** – *Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde*
- **CCTF** – *Comité Consultatif du Temps et des Fréquences (Consultative Committee for Time and Frequency)*
- **CGPM** – *Conférence Générale des Poids et Mesures (International Committee for Weights and Measures)*
- **CIPM** – *Comité International des Poids et Mesures*
- **CNRS** – *Centre National de la Recherche Scientifique*
- **COOMET** – *Euro-Asian Cooperation of State Metrology Institutions*
- **DoD** – *U.S. Department of Defense*
- **EURAMET** – *European Association of National Metrology Institutes*
- **EUROMET** – *European Collaboration in Measurement Standards*
- **GGTTS** – *Group on GPS Time Transfer Standards, parte do CCTF*
- **GLONASS** – *Global Navigation Satellite System*
- **GNSS** – *Global Navigation Satellite System*
- **GPS** – *Global Positioning System*
- **IAU** – *International Astronomical Union*
- **IEEE** – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*
- **IERS** – *International Earth Rotation & Reference Systems Service*
- **IGS** – *International GNSS Service ou International GPS Service*
- **INMETRO** – *Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial*
- **KCDB** – *Key Comparison Data Base*
- **LNE-SYRTE** – *Laboratoire national de métrologie et d'essais - Système de Références Temps-Espace que corresponde ao antigo **BNM-SYRTE** - Bureau National de Métrologie - Système de Référence Temps-Espace*
- **MRA** – *Mutual Recognition Arrangement*
- **NAVSTAR** – *Navigation **S**atellite **T**iming and **R**anging*
- **NBS** – *National Bureau of Standard*
- **NIST** – *National Institute of Standards and Technology*
- **NMI** – *National Metrology Institute*
- **RMO** – *Regional Metrology Organization*
- **SADCMET** – *Southern African Development Community Cooperation in Measurement Traceability*
- **SIM** – *Sistema Inter-americano de Metrologia*

- **TAI** – Tempo Atômico Internacional (*International Atomic Time*). TAI é calculado pelo BIPM a partir dos dados de mais de 200 relógios atômicos distribuídos ao redor do mundo.
- **TC** – Tempo Coordenado (*Coordinated Time*). Tempo Coordenado fornece um sistema de datação de eventos em um sistema de referência especificado. É a base de tempo (coordenado) a ser usada na teoria de movimentos deste referido sistema.
- **TT** – *Terrestrial Time*. TT é o tempo coordenado na superfície da Terra.
- **TUR** – *Test Uncertainty Ratio* = razão de incerteza de teste.
- **TWSTFT** – *Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer*
- **USNO** – *United States Naval Observatory*
- **UT** – *Universal Time*
- **UTC** – Tempo Universal Coordenado (*Coordinated Universal Time*). UTC = TAI - *leap seconds*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Observação do movimento aparente do Sol na esfera celeste	30
Figura 2 - Divisão em 12 partes para acompanhar o deslocamento da sombra	31
Figura 3 - Relógio de Sol do Observatório Nacional	31
Figura 4 - Rotação terrestre e a hora solar	32
Figura 5 - Gráfico da equação do tempo	32
Figura 6 - Relógio de água	33
Figura 7 – Ampulheta Francesa	33
Figura 8 - Meridiano de Greenwich	33
Figura 9 - Dia Sideral e o Dia Solar Médio	35
Figura 10 - Meridiano e Fuso Horário	37
Figura 11 - Fusos Horários com Horário de Verão	37
Figura 12 - Fusos horários no Brasil	38
Figura 13 - Brasil, os fusos horários e o horário de verão 2006/2007	39
Figura 15 - Linha internacional de mudança de data	40
Figura 16 - Estrela Polar	41
Figura 17 - Latitude e a Estrela Polar	42
Figura 18 - Astrolábio português (séc. XVII)	42
Figura 19 – Sextante moderno	42
Figura 20 - Relógio de Harrison	43
Figura 21 - Períodos de eventos repetitivos	44
Figura 22 - Linha do tempo e a evolução dos relógios (<i>clocks</i>)	45
Figura 23 - Curvas de ressonância	46
Figura 24 - Curva de ressonância e o Fator-Q	47
Figura 25 - Curva típica de estabilidade de um oscilador	48
Figura 26 - Ressonador com moléculas de amônia	49
Figura 27 - Princípio de funcionamento do padrão atômico de amônia	50
Figura 28 - Essen (à direita) e Jack Parry, no NPL, com o padrão de césio que desenvolveram, em 1955, e com estabilidade de 1 s em 300 anos.	51
Figura 29 - Tabela periódica de elementos com indicação do césio	51
Figura 30 - Padrão de frequência de césio: visualização interna	52
Figura 31 - Interações Energéticas	52
Figura 32 - Absorção e emissão de energia entre diferentes níveis energéticos	53
Figura 33 - Transição Hiperfina em um Padrão de Césio	54

Figura 34 - Diagrama Simplificado de um Tubo de Césio	54
Figura 35 - Curva típica de resposta do tubo de feixe de césio	55
Figura 36 - Padrão de freqüência de feixe de césio: diagrama simplificado	56
Figura 37 - GPS	58
Figura 38 - TWSTFT	58
Figura 39 - Diagrama de Enlaces	58
Figura 40 - Logo do IERS	59
Figura 41 - Princípio de funcionamento de um padrão de freqüência de rubídio	60
Figura 42 - Maser Ativo de Hidrogênio: diagrama de blocos (Ball-Efratom, 1993)	62
Figura 43 - Maser Passivo de Hidrogênio: diagrama de blocos (Ball-Efratom, 1993)	62
Figura 44 - Padrão de césio <i>Fontaine</i> do LNE-SYRTE (<i>Site</i> LNE-Syrte, 2006-2007)	64
Figura 45 - Padrão de césio fonte: princípio de funcionamento (<i>Site</i> LNE-Syrte, 2006-2007)	65
Figura 46 - Estabilidade de freqüência	77
Figura 47 - Categorias de osciladores a quartzo baseadas na compensação de variação de freqüência com a temperatura (Ball-Efratom, 1993).	79
Figura 48 - Evolução dos padrões de freqüência do NIST	81
Figura 49 - Estabilidade de dispositivos de marcação de tempo <i>versus</i> períodos de observação	82
Figura 50 - Diagrama de blocos do método do contador de intervalo de tempo	83
Figura 51 - Diagrama de blocos do método heterodino	83
Figura 52 - Diagrama de blocos do método de diferença de tempo com duplo misturador	84
Figura 53 - Constelação GPS	85
Figura 54 - Oscilador de césio x GPS (intervalo de 100 s)	89
Figura 55 - Oscilador de césio x GPS (intervalo de 1 semana)	90
Figura 56 - Método CV (<i>Common View</i>)	92
Figura 57 - Método TWSTFT	93
Figura 58 - Pirâmide de Rastreabilidade	95
Figura 59 - Representação de uma cadeia típica de rastreabilidade	97
Figura 60 - Serviços de TF prestados pela DSHO	98
Figura 61 - Exemplo de uma Circular-T do BIPM	103
Figura 62 - Organograma do BIPM (<i>site</i> BIPM).	106
Figura 63 – Organizações Regionais de Metrologia (RMO)	109
Figura 64 - Logo do CIPM MRA	121

Figura 65 - <i>Site</i> KCDB do BIPM	124
Figura 66 – <i>Site</i> do Anexo-C da KCDB do BIPM	126
Figura 67 – <i>Site</i> Anexo-C da KCDB – Lista de áreas de metrologia	126
Figura 68 – <i>Site</i> CMC TF	127
Figura 69 – Lista de países com arquivos CMC disponíveis na área de TF	127
Figura 70 – Escolha de ramo, serviço e sub-serviço na página da CMC TF	128
Figura 71 – Formato padrão de uma tabela de CMC preenchida conforme recomendação do CCTF.	130
Figura 72 – Estabilidade de frequência e desvio de Allan	146
Figura 73 – Desvio de Allan: curva típica de estabilidade de frequência (Ball-Efratom, 1993).	147
Figura 74 – Incertezas tipo A e tipo B declaradas na Circular-T para os valores de UTC-UTC(ONRJ)	149
Figura 75 – Estrutura de calibração do Laboratório Primário de Tempo e Frequência até novembro de 2006	152
Figura 76 – Dados do receptor GPS no formato GGTTS GPS DATA VERSION 1.	154
Figura 77 – Cabeçalho do relatório com dados do receptor GPS no formato GGTTS GPS DATA VERSION 1.	155
Figura 78 – Coordenadas pelo sistema WGS84	155
Figura 79 – Equivalência de coordenadas geocêntricas e geodésicas.	156
Figura 80 – Sistema de medição de retardo do cabo.	157
Figura 81 – Extrato dos resultados da medição de retardo de um cabo.	158
Figura 82 – Configuração para caracterização da incerteza do sistema.	159
Figura 83 – Resultado das medições para caracterização da incerteza do sistema.	159
Figura 84 – REF DLY no receptor monocanal.	160
Figura 85 – Extrato dos resultados da medição de retardo do cabo REF DLY .	161
Figura 86 – Estrutura de calibração do Laboratório Primário de Tempo e Frequência após novembro de 2006	163
Figura 87 – REF DLY no receptor monocanal, após correção.	165
Figura 88 – Correção do REF DLY no receptor monocanal.	166
Figura 89 – Planilha UTC junho a outubro 2006.	167
Figura 90 – Gráfico ($\Delta f / f$) versus data-hora junho a outubro 2006.	168
Figura 91 – Gráfico UTC-UTC(ONRJ) versus data-hora junho a outubro 2006.	168
Figura 92 – Desvio de Allan junho a outubro 2006.	169
Figura 93 – Dados extrapolados novembro e dezembro 2006.	170
Figura 94 – Gráfico com dados obtidos direto dos satélites por meio do	

receptor GPS monocanal TTR-6.	171
Figura 95 - Extrato da planilha com os dados obtidos direto dos satélites por meio do receptor GPS monocanal TTR-6.	172
Figura 96 – Extrato da planilha com inclusão de dados obtidos direto dos satélites visíveis e [UTC-GPS Time] das Circulares-T.	173
Figura 97 – Extrato da planilha contendo cálculos a partir dos dados dos satélites visíveis e [UTC-GPS Time] das Circulares-T	174
Figura 98 – Gráfico combinando dados direto do receptor GPS TTR-6 e Circular-T.	175
Figura 99 – Ajustes referentes previsão [UTC-T130] e menor desvio médio quadrático.	176
Figura 100 – Extrato da planilha desvio de Allan acumulado para o T130.	178
Figura 101 – Estrutura básica de calibração de TF realizada internamente.	179
Figura 102 – Receptor GPS TTR6.	180
Figura 103 – Receptor GPS TTS-2.	181
Figura 104 – Receptor SIM GPS CV.	182
Figura 105 – Estabilidade de frequência do HP5071A.	183
Figura 106 – Caracterização de incerteza de medição do sistema amplificador distribuidor e cabo.	185
Figura 107 – Desvio de Allan considerando o amplificador distribuidor e cabo.	185
Figura 108 – Incerteza característica do contador SR-620 – Base de Tempo.	187
Figura 109 – Incerteza característica do contador SR-620 – <i>trigger</i> .	188
Figura 110 – Incerteza característica do contador SR-620 – intervalo de tempo.	189
Figura 111 – Incerteza característica do contador SR-620 – frequência.	190
Figura 112 – Incerteza característica do contador SR-620 – período.	191
Figura 113 – Incerteza característica do contador SR-620 – fase.	192
Figura 114 – Incerteza característica do contador SR-620 – contagem.	193
Figura 115 – Especificações do gerador HP3325A	194
Figura 116 – Especificações do gerador HP8663A	195
Figura 117 – Diagrama em blocos do Analisador de Intervalo de tempo e frequência - Modelo TSC5110A.	197
Figura 118 – Caracterização de incerteza de medição do TSC5110A.	197
Figura 119 – Tela com a tabela desvio de Allan associada ao TSC5110A.	198
Figura 120 – Desvio de Allan associado à incerteza de medição do TSC5110A.	198
Figura 121 – Equipamento CRONOMED DSHO-49.	199
Figura 122 – Painéis CRONOMED DSHO-49.	199

Figura 123 – disparo/parada durante medição usando CRONOMED DSHO-49.	200
Figura 124 – Sistema para calibração de temporizadores.	201
Figura 125 – Sistema para medição retardos <i>start/stop</i> do CRONOMED DSHO-49.	202
Figura 126 – Planilha com resultados das medições dos retardos <i>start/stop</i> do CRONOMED DSHO-49.	203
Figura 127 – Exemplo 1 do retardo <i>start</i> da manopla do CRONOMED DSHO-49.	204
Figura 128 – Exemplo 2 do retardo <i>start</i> da manopla do CRONOMED DSHO-49.	204
Figura 129 – Exemplo 1 do retardo <i>stop</i> da manopla do CRONOMED DSHO-49.	204
Figura 130 – Exemplo 2 do retardo <i>stop</i> da manopla do CRONOMED DSHO-49.	205
Figura 131 – Exemplo do retardo <i>start</i> do painel do CRONOMED DSHO-49.	205
Figura 132 – Exemplo do retardo <i>stop</i> do painel do CRONOMED DSHO-49.	206
Figura 133 – Planilha medições dos retardos <i>start/stop</i> via manopla com novo disparador.	206
Figura 134 – TACOMEDE DSHO-51.	207
Figura 135 – CALTACOMEDE DSHO-61.	207
Figura 136 – Calibração de um tacômetro digital.	208
Figura 137 – Calibração do TACOMEDE.	208
Figura 138 – Sistema de Calibração do TACOMEDE.	209
Figura 139 – Incerteza de medição do sistema de calibração do TACOMEDE.	210
Figura 140 – Incerteza de medição associada ao sistema de calibração do TACOMEDE.	211
Figura 141 – Sistema AUTOMED2.	212
Figura 142 – Configuração para caracterização da incerteza de medição do sistema AUTOMED2.	212
Figura 143 – Extrato das medições para caracterização da incerteza de medição do sistema AUTOMED2.	214
Figura 144 – Serviços da DSHO na CMC.	218
Figura 145 – Exemplo de extrato da declaração das faixas e parâmetros que influenciam na medição.	219
Figura 146 – Exemplo de extrato da declaração das incertezas de medição.	219
Figura 147 – Declaração CMC da DSHO (laboratório ONRJ).	225
Figura 148 – Extrato da declaração CMC da DSHO (laboratório ONRJ) ilustrada pela figura 147.	226

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de relógios e seus valores típicos de Fator-Q.....	47
Tabela 2 - Exemplos de desvio de frequência	76
Tabela 3 - Características de diferentes tipos de osciladores	80
Tabela 4 – Tabela para análise de incerteza de medição	138
Tabela 5 – Fatores de Abrangência k para diferentes graus de liberdade ν_{eff}	143
Tabela 6 – Exemplo de cálculo de estabilidade usando variância de Allan	145
Tabela 7 – Incertezas associadas ao enlace de tempo para o ONRJ	164

