

Universidade Federal de Santa Catarina  
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

**Sistema Automatizado para  
Calibração de Cronômetros**

Tese submetida à Universidade Federal de Santa Catarina para  
Obtenção do grau de Doutor em Engenharia Mecânica

Doutorando : João Bernardes da Rocha Filho  
Orientador : Dr. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior

Florianópolis  
Santa Catarina - Brasil  
14 de maio de 1999

# SISTEMA AUTOMATIZADO PARA CALIBRAÇÃO DE CRONÔMETROS

JOÃO BERNARDES DA ROCHA FILHO

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

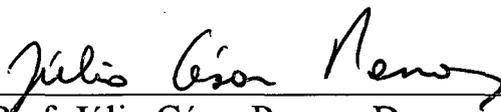
**“DOUTOR EM ENGENHARIA”**

Especialidade ENGENHARIA MECÂNICA – Área de concentração  
METROLOGIA E INSTRUMENTAÇÃO, e aprovada em sua forma final pelo  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



---

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng.  
ORIENTADOR



---

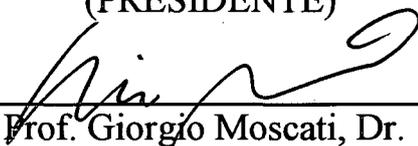
Prof. Júlio César Passos, Dr.  
COORDENADOR DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO

## BANCA EXAMINADORA



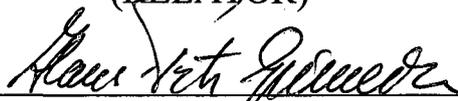
---

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng.  
(PRESIDENTE)



---

Prof. Giorgio Moscati, Dr.  
(RELATOR)



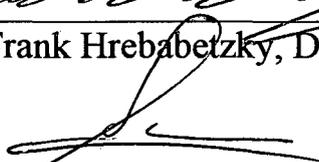
---

Prof. Hans-Peter Gräneisen, Ph.D.



---

Prof. Frank Hrebabetzky, Dr. Rer. Nat.



---

Prof. Carlos Alberto Schneider, Dr. Ing.



Dedico este trabalho à memória de minha querida mãe,  
que não sobreviveu o bastante para vê-lo concluído.

### Agradecimentos

Ao orientador deste trabalho, Professor Dr. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, que, demonstrando sensibilidade e humanidade características apenas de quem atingiu alto grau de maturidade intelectual e emocional, foi sempre um apoiador que depositou integral confiança no desempenho de seu orientado.

À Srta. Rosana Magali Vieira que, com sua aguda sensibilidade no trato interpessoal e evidente competência profissional, sempre enxergou além das aparências, emitindo palavras inteligentes de incentivo e otimismo a cada novo contato.

Aos colegas da PUCRS, cujo apoio oportuno e declarado foi instrumento imprescindível para a liberação dos trabalhos acadêmicos que este curso de pós-graduação exigiu. Algumas destas pessoas são : Egon Carlos Seitz, diretor do LABELO, António Dias Nunes, diretor do Instituto de Física, Álvaro Medeiros de Farias Theisen, coordenador do LABELO, Gilberto José Corrêa da Costa, coordenador do Departamento de Engenharia Elétrica à época da liberação, e Guilherme Alfredo Dentzien Dias, coordenador do departamento de Engenharia Elétrica quando de minha admissão à PUCRS.

A João Pastorini da Rocha, um misto de pai, filho e amigo, que esteve sempre ao meu lado e em cujo computador redigi grande parte deste relatório.

À Rosaura Santos Pastorini, companheira que deixou seu trabalho para me acompanhar em mais esta jornada, jamais duvidando de que estava fazendo a coisa certa embora eu mesmo não estivesse totalmente convencido de que essa era a melhor alternativa.

Ao CNPq – Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico – que apoiou o projeto, fornecendo verba para a aquisição do material necessário para a montagem dos protótipos do SISLOC – e à CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – pela bolsa de estudos concedida durante os três anos deste curso.

Ao Prof. Dr. Giorgio Moscati, que gentilmente aceitou ser o relator deste trabalho.

## Resumo

A calibração de cronômetros é um trabalho rotineiro, sendo realizado manualmente e com amostragens de vários dias em laboratórios credenciados da Rede Brasileira de Calibração (RBC). O custo do serviço excede, em virtude da não-automatização do processo, o valor de mercado da maioria dos cronômetros, sobrecarregando o usuário. Em laboratórios industriais, secundários e primários do Brasil e da Alemanha, o panorama da calibração de cronômetros é muito semelhante; caro, lento e pouco automatizado. Como resposta às deficiências detectadas na prestação deste serviço esta tese de doutoramento desenvolveu :

- a) um método automatizado para calibração de cronômetros, que completa a tarefa de calibração com incerteza inferior à do processo manual, com grande redução no tempo de trabalho laboratorial ;
- b) dois protótipos de um sistema de medição adequado ao método automatizado ;
- c) uma análise teórica-experimental dos resultados da aplicação do novo sistema à calibração de cronômetros através de ensaios realizados nos protótipos, e ;
- d) um método adequado de avaliação da incerteza de medição aplicável ao processo proposto ;
- e) um guia de cálculo de incerteza para auxiliar o usuário final típico de cronômetros calibrados.

Em 1996-97 foram realizados o levantamento bibliográfico, o reconhecimento das necessidades dos principais ambientes laboratoriais de metrologia nacionais e internacionais, a tomada de posição em relação à realidade contemporânea da calibração de cronômetros e às aspirações dos usuários, assim como a construção do primeiro protótipo do sistema automatizado. Em 1998 foi construído o segundo protótipo com melhorias como a otimização da captura óptica a LASER, o aperfeiçoamento do tratamento dos sinais e a adequação do programa gerenciador. Neste período foi desenvolvido e testado um método de avaliação do desempenho metrológico da calibração óptica através da criação de um procedimento padrão de calibração do sistema, assim como um método de cálculo da incerteza resultante do processo, além da redação definitiva do relatório.

Em virtude da escassez de bibliografia relacionada à calibração de cronômetros este foi um trabalho eminentemente experimental, representado pelo fato de que a quase totalidade dos dados numéricos apresentados na etapa de desenvolvimento foram colhidos diretamente em atividades de laboratório relacionados à pesquisa, ou *in natura* de relatos de outros pesquisadores trabalhando em áreas correlatas.

**Abstract**

There is an increasing demand for calibration of hand chronometers. Due to their nature, both electronic and mechanical chronometers are typically calibrated by hand against a reference clock. In order to keep the calibration uncertainty as low as the chronometer's resolution, five or more days are required. So, this hand calibration is an expensive, large time demanding and unefficient approach that is not compatible with today's trend.

This work proposes a LASER-based system called SISLOC to perform automatic calibration of hand chronometers. This system includes :

- a) a calibration procedure suitable for automatic calibration of hand chronometers with smaller uncertainty and in a significantly smaller time ;
- b) two prototypes of the complete system, including a LASER-based reading system, signal conditioning unit, specific software and the additional external external modules ;
- c) a theoretical and experimental evaluation of the metrological performance of the developed system;
- d) a procedure suitable for uncertainty estimation of such kind of system ;
- e) a procedure to help end-users of hand chronometers to estimate their measurement uncertainty.

This system has been successfully applied to calibrate over 1000 hand chronometers. The calibration time was reduced from 5 days to about 30 minutes. The resulting calibration uncertainty was improved from 0,5 second to less than 1 ms for general calibration.

**SUMÁRIO**

1 – Apresentação.....	1
1.1 – Motivação.....	2
1.2 – Objetivos do trabalho.....	2
1.3 – Estrutura do trabalho.....	3
2 – Cronômetros.....	6
2.1 – Medição de intervalos de tempo utilizando cronômetros.....	7
2.1.1 – Histórico e aplicações gerais dos cronômetros.....	7
2.1.2 – Aplicações industriais dos cronômetros.....	8
2.2 – Cronômetros manuais.....	9
2.2.1 – Cronômetros mecânicos.....	9
2.2.2 – Cronômetros eletrônicos.....	10
2.2.3 – Cronômetros híbridos.....	11
2.3 – Fontes de incerteza internas e ambientais.....	12
2.3.1 – Base-de-tempo a cristal piezelétrico.....	12
2.3.2 – Caminho elétrico dos sinais de ativação e desativação.....	16
2.3.3 – Resolução.....	19
2.3.4 – Retardo dos interruptores.....	20
2.4 – Influência do operador.....	20
2.5 – Necessidade de calibração.....	22
3 – Calibração de cronômetros.....	24
3.1 – Método clássico de calibração.....	25
3.1.1 – Procedimento básico de calibração.....	25
3.1.2 – Limitações e deficiências do processo clássico.....	25
3.1.3 – Influência das condições ambientais.....	27
3.2 – Calibração de cronômetros manuais.....	28
3.2.1 – Procedimento clássico.....	28
3.2.2 – Métodos alternativos.....	29
3.3 – O relatório de calibração.....	30
3.4 – Balanço de incertezas.....	31
3.5 – A variância como indicador de estabilidade em calibrações de cronômetros.....	32
4 – Padrões para medição do tempo.....	45
4.1 – Antecedentes históricos.....	46

---

4.2 – Ressonância atômica.....	53
4.3 – Célula de césio.....	59
4.3.1 – Princípio de operação.....	59
4.3.2 – Emissão e detecção dos feixes atômicos.....	62
4.3.3 – O césio como padrão primário de tempo e frequência.....	64
4.4- Padrões baseados no tálio.....	67
4.5 – Célula de rubídio.....	68
4.6 – Padrões atômicos a LASER.....	72
4.7 – Possibilidades futuras na medição de intervalos de tempo.....	77
5 – Dispositivos mostradores de cristal líquido.....	79
6 – O Sistema de Leitura Óptica de Cronômetros – SISLOC.....	89
6.1 – Requisitos e necessidades atendidas.....	90
6.2 – Princípios de operação.....	92
6.3 – Diagrama de blocos.....	95
6.4 – Calibração de cronômetros.....	98
6.4.1 – O que pode ser calibrado.....	98
6.4.2 – Procedimento básico.....	99
6.4.2.1 – Escolha do ponto de captura.....	99
6.4.2.2 – Focalização do sistema óptico.....	101
6.4.2.2.1 – Em cronômetros com mostrador LCD.....	101
6.4.2.2.2 – Em cronômetros com mostrados de LED.....	102
6.4.2.2.3 – Em cronômetros mecânicos.....	102
6.4.2.3 – A configuração do contador.....	102
6.5 – Programa de gerenciamento.....	103
6.5.1 – Utilização do programa de gerenciamento.....	104
7 – Validação metrológica do sistema SISLOC.....	111
7.1 – Análise de influência sobre o sistema.....	112
7.1.1 – Sistema de disparo e travamento.....	112
7.1.2 – Tipo de fonte de luz e ângulo de influência do feixe luminoso.....	114
7.1.3 – Unidade de tratamento de sinais do sistema óptico.....	120
7.2 – Considerações específicas sobre o método óptico de captura do sinal.....	122
7.3 – Sistema padrão de referência.....	126
7.4 – Estimativa de incerteza.....	127
7.4.1 – Contador/base-de-tempo do SISLOC.....	127

---

7.4.2 – Unidade de tratamento dos sinais ópticos.....	128
7.4.3 – Incerteza global do SISLOC.....	130
7.5 – Condições ótimas de utilização do SISLOC.....	135
7.6 – Validação do programa de gerenciamento.....	138
8 – Estimativas de incertezas na medição de tempo em aplicações industriais.....	142
8.1 – Caracterizando o mensurando : exemplo de procedimento básico.....	144
8.2 – O processo de medição manual de intervalos de tempo : fontes de incertezas.....	147
8.3 – Estimativa da influência do operador.....	149
8.4 – Balanço de incertezas.....	151
8.5 – Validade dos resultados.....	153
9 – Conclusões.....	155
10 – Referências bibliográficas.....	158
Anexos.....	164
Anexo 1 – Relatório de calibração de cronômetros.....	165
Anexo 2 – Conteúdo do arquivo LEITURA.TXT após calibração.....	167
Anexo 3 – Planilha de validação do programa gerenciador .....	169
Anexo 4 – Certificado de calibração do padrão de frequência utilizado .....	172
Anexo 5 – Certificado de calibração do contador digital utilizado .....	174
Anexo 6 – Certificado de calibração do divisor utilizado .....	176
Anexo 7 – Certificado de calibração do gerador utilizado.....	178
Anexo 8 – Cálculos da calibração do gerador .....	180
Anexo 9 – Procedimentos de calibração de cronômetros via SISLOC .....	182
Anexo 10 - Modelo estatístico para caracterização de padrões de frequência : A variância Allan .....	191
Anexo 11 – Correspondência DSH 011/96 – CEB – 1904 de 10/10/1996 .....	199

**LISTA DE FIGURAS**

2.1	Circuito completo de cronômetro eletrônico sugerido pela Intersil.....	11
2.2	Circuito eletrônico de cronômetro híbrido sugerido pela Intersil.....	12
2.3	Flutuação na frequência de cristais osciladores segundo a direção do corte e a temperatura a que estão submetidos.....	13
2.4	Avaliando o comportamento térmico de um cronômetro.....	14
2.5	Temperatura do cronômetro em amostragem de 24 h com curva de tendência por regressão polinomial de sexta potência.....	14
2.6	Período de pulsação de segmento do mostrador do cronômetro em amostragem de 24 h, obtida simultaneamente com a medição de temperatura, com curva de tendência por regressão polinomial de sexta potência.....	15
2.7	Tempo de propagação X capacitância de cargas em portas ACL.....	17
2.8	Diagrama de blocos do ICM 7215 Intersil.....	18
3.1	Curva de erros típica de um cronômetro de mão.....	27
3.2	Espectros de ruídos gerados matematicamente.....	34
3.3	Dados de calibração de um cronômetro com período amostral semelhante ao período medido e ruído branco.....	35
3.4	Dados de calibração do mesmo cronômetro com período amostral significativamente superior ao período medido e ruído branco.....	35
3.5	Distribuição espectral típica do ruído em saídas de sinal elétrico.....	37
3.6	Gráfico de erro da tabela 3.1.....	38
3.7	Gráfico de frequências dos erros da figura 3.6.....	38
3.8	Diagrama em blocos da montagem para calibração automatizada de cronômetros.....	39
3.9	Gráfico de erro da tabela 3.2.....	40
3.10	Gráfico de frequências dos erros da figura 3.9.....	40
3.11	Tempo morto na amostragem do contador SR620.....	42
4.1	Câmara de Dunoyer.....	47
4.2	Célula de Rabi.....	49
4.3	Ressonância de Rabi.....	50
4.4	Estágios do bombeamento óptico.....	51
4.5	Interação elétron-núcleo no átomo de césio.....	55
4.6	Modelo vetorial das interações elétron-núcleo.....	56
4.7	Diagrama de níveis de energia do césio 133.....	58

---

4.8	Espectrômetro de feixe atômico.....	59
4.9	Intensidades do feixe em função de Y e S.....	61
4.10	Eliminação de átomos rápidos por barreira.....	62
4.11	Princípio de operação de detetor a vácuo.....	63
4.12	Diagrama de blocos de um padrão de frequência de césio com excitação a MASER de amônia.....	64
4.13	Estrutura hiperfina do tálio 205.....	68
4.14	Interação fótons-átomos.....	70
4.15	Ação do filtro de Rb85 sobre a célula de Rb87.....	71
4.16	Célula de vapor de rubídio 87.....	72
4.17	Esquema básico de um padrão óptico de frequência.....	74
4.18	Estabilização de frequência de LASER corante.....	75
4.19	Sincroton a LASER como padrão de frequência.....	76
5.1	Representação de organização molecular.....	80
5.2	Densidade óptica de cristais líquidos em diferentes comprimentos de onda.....	82
5.3	Alinhamento molecular para cristais líquidos nemáticos e colestéricos.....	83
5.4	Susceptibilidade elétrica de um cristal líquido típico em função da temperatura.....	85
5.5	LCD por espalhamento dinâmico.....	86
5.6	Mostrador nemático rotacional.....	87
5.7	Pixel de mostrador de matriz ativa.....	88
6.1	Diagrama de blocos do Sistema.....	96
6.2	Segmento utilizável pelo SISLOC.....	101
6.3	Macrofunções do programa gerenciador.....	104
6.4	Tela de abertura do programa gerenciador do SISLOC.....	105
6.5	Tela de entrada de dados de identificação da calibração.....	106
6.6	Tela de resultados parciais do modo Normal.....	107
6.7	Tela de resultados parciais do modo de Alta Resolução.....	107
6.8	Relatório impresso ao final de uma calibração automatizada.....	109
7.1	Diagrama dos componentes ópticos do experimento.....	115
7.2	Detalhe objetiva-luz-mostrador.....	116
7.3	Condições de levantamento dos dados.....	118
7.4	Circuito elétrico do experimento.....	119
7.5	Diagrama elétrico da UTS do protótipo 1 do sistema óptico.....	121
7.6	Diagrama da UTS do protótipo 2 do sistema óptico.....	122

---

7.7 Erro/dia projetado em função do número de leituras em um cronômetro Mondaine Stopwatch.....	125
7.8 Esquema de ligações para determinação do erro do contador.....	128
7.9 Determinando o erro da unidade de tratamento de sinal do SISLOC.....	129
7.10 Diagrama em blocos do circuito "b" de avaliação de erros do Sistema.....	132
7.11 Erro absoluto do SISLOC versus erro/dia projetado.....	134
7.12 Extrapolação da incerteza em função do período amostral.....	136
7.13 Curva de erros em função da amostragem na calibração de cronômetros.....	138
7.14 Planilha de conferência para validação do programa gerenciador.....	141
8.1 Processo de medição manual de intervalos de tempo.....	148
8.2 Montagem para avaliação do tempo de resposta humano.....	149

**LISTA DE TABELAS**

2.1	Incertezas aproximadas em bases-de-tempo a cristal piezelétrico.....	12
3.1	Dados de calibração manual de cronômetro.....	38
3.2	Dados de calibração automatizada de cronômetros.....	40
7.1	Leituras do experimento.....	118
7.2	Incerteza em calibração manual de cronômetro, em 120 horas.....	124
7.3	Experimento de calibração manual de cronômetro.....	126
7.4	Erro e incerteza expandida na calibração da UTS do sistema óptico.....	130
7.5	Dados de calibração do SISLOC.....	133
7.6	Quadro das contribuições globais de incerteza dos componentes utilizados.....	135
8.1	Planilha de cálculo de incertezas do exemplo apresentado.....	151

**LISTA DE EQUAÇÕES**

2.1	Coefficiente período-temperatura em cronômetro digital.....	15
3.1	Variância Allan.....	36
3.2	Implementação operacional da variância Allan.....	37
4.1	Momento magnético de elétron no átomo de césio.....	55
4.2	Magneton de Bohr.....	55
4.3	Ação do núcleo sobre o elétron no átomo de césio.....	56
4.4	Interação da estrutura hiperfina núcleo-elétron.....	56
4.5	Constante $a$ da estrutura hiperfina.....	57
4.6	Fórmula de Breit-Rabi.....	58
4.7	Frequência de transição versus campo magnético no átomo de tálio.....	68
7.1	Variação da tensão sobre o elemento fotoelétrico dividida pela tensão de offset.....	119

# Capítulo 1

## Apresentação

---

## 1 – Apresentação

### 1.1 – Motivação

A calibração de cronômetros de operação manual é um trabalho rotineiro em laboratórios de metrologia de tempo e frequência, solicitado por diversos segmentos industriais que medem intervalos de tempo em seus processos. Cronômetros de mão baseados em cristais osciladores e antigos cronômetros mecânicos são calibrados manualmente em virtualmente todos os laboratórios que oferecem este serviço, cujas características exigem, para que se atinja uma incerteza de calibração da mesma ordem de grandeza da resolução do instrumento, diversos dias de período de amostragem nos quais se distribuem vários ciclos de disparo e travamento.

Desde o início da década este serviço, antes raramente solicitado, sofreu enorme incremento de demanda no Brasil, fazendo com que diversos laboratórios secundários da Rede Brasileira de Calibração (RBC) adquirissem os equipamentos necessários e fossem credenciados em todo o país, para atender as exigências do mercado. Este aumento de demanda, porém, não produziu redução no custo do serviço de calibração em virtude da não-automatização do processo, ao contrário da tendência de quase todos os demais serviços prestados pelos laboratórios de metrologia nacionais e internacionais, que foram mantidos em constante atualização tanto a nível de procedimentos quanto a nível de tecnologia dos padrões e sistemas utilizados. A contingência de redução de custos industriais associada à internacionalização da economia, por outro lado, fez com que o preço a ser pago pelo solicitante relativamente ao serviço de calibração, que ultrapassa, na maioria dos casos, o valor de mercado do próprio cronômetro, hoje produzido em linhas automatizadas, começasse a pesar de forma sensível na contabilidade do usuário do instrumento. Em acréscimo, e considerando a inexistência de literatura sobre o assunto, dados obtidos informalmente de laboratórios industriais, laboratórios secundários e laboratórios primários do Brasil e da Alemanha, demonstram que o quadro geral da calibração de cronômetros é sempre muito semelhante; caracteristicamente caro, lento e pouco automatizado.

### 1.2 – Objetivos do trabalho

Como resposta às deficiências detectadas na prestação deste serviço esta tese de doutoramento pretendeu desenvolver :

- 
- a) um método automatizado para calibração de cronômetros industriais de mão, capaz de completar a tarefa de calibração com incerteza inferior à do processo manual, hoje utilizado nos laboratórios de metrologia de tempo e frequência, com redução significativa no investimento em tempo de trabalho laboratorial ;
  - b) dois protótipos de um sistema de medição adequado ao método automatizado, denominado Sistema Automatizado de Calibração Óptica de Cronômetros – SISLOC, desenvolvido especificamente para esta finalidade através da construção de unidades de tratamento de sinais, da seleção de instrumentos auxiliares comerciais e da elaboração de um programa de gerenciamento do sistema, baseado em computador pessoal ;
  - c) uma análise teórica-experimental dos resultados da aplicação do novo sistema à calibração de cronômetros através de ensaios realizados nos protótipos, e ;
  - d) um método adequado de avaliação da incerteza de medição aplicável à calibração automatizada de cronômetros.

A aplicação laboratorial do desenvolvimento proposto nesta tese leva a um aumento de produtividade na atividade de calibração de cronômetros que pode ser quantificado pela redução, por um fator entre 100 e 1000, no produto Tempo de Bancada X Incerteza de Calibração obtida.

### **1.3 – Estrutura do trabalho**

O levantamento bibliográfico, o reconhecimento das necessidades dos principais ambientes laboratoriais de metrologia nacionais e internacionais, a tomada de posição em relação à realidade contemporânea da calibração de cronômetros e às aspirações dos usuários, assim como a construção do primeiro protótipo do sistema automatizado, foram tarefas realizadas na primeira etapa desta pesquisa, desde o início de 1996 até o final de 1997. Durante o ano de 1998 a conclusão deste trabalho envolveu a construção do segundo protótipo do sistema, que incorporou significativas melhorias em relação ao primeiro, como a otimização da captura óptica por reflexão a LASER, o aperfeiçoamento da unidade de tratamento dos sinais, e a adequação do programa gerenciador. Ao longo do ano também foi desenvolvido e testado um método de avaliação do desempenho metrológico da calibração óptica de cronômetros através do desenvolvimento e aplicação de um procedimento padrão adequado à calibração do novo sistema, assim como uma definição em relação ao método de cálculo da incerteza resultante do processo de calibração automatizada, além da redação definitiva do relatório.

---

Em virtude da completa inexistência de bibliografia relacionada à calibração de cronômetros uma das principais características deste trabalho, além da inovação que propõe, é seu caráter eminentemente experimental, representado pelo fato de que a quase totalidade dos dados numéricos apresentados na etapa de desenvolvimento foram colhidos diretamente em atividades de laboratório relacionados à pesquisa, ou *in natura* de relatos de outros pesquisadores trabalhando em áreas correlatas.

No capítulo 2, dedicado aos cronômetros, as aplicações usuais destes instrumentos são descritas através de levantamento realizado junto a indústrias de Santa Catarina. Os diversos tipos de cronômetros assim como suas fontes internas e externas de incerteza, a influência do operador e a necessidade de calibração, são outros tópicos abordados neste capítulo.

A calibração de cronômetros é o assunto central do capítulo 3. Neste item são comparados o método clássico de calibração, os métodos alternativos e o método óptico proposto nesta tese. A forma como os resultados de uma calibração tradicional são apresentados no certificado, além de um cálculo típico da incerteza combinada associada a uma calibração baseada em operação humana são mostrados juntamente com uma discussão sobre a validade da utilização da variância como indicador de estabilidade em medições de tempo.

O quarto capítulo da tese descreve, mediante uma abordagem histórica, o surgimento e as características dos diversos padrões de tempo existentes, assim como avança possibilidades ainda não realizadas nesta área.

Dado o predomínio da utilização de cronômetros digitais com mostrador de cristal líquido na indústria, uma ênfase especial foi dada no capítulo 5 ao estudo dos princípios de funcionamento que regem os diferentes tipos de mostradores que utilizam estes materiais. Este estudo permitiu avaliar os tempos intrínsecos de operação dos LCD's, incluindo-os como uma nova e inusitada fonte de incerteza no cálculo global de uma calibração óptica.

O sistema desenvolvido nesta tese, denominado SISLOC (Sistema de Leitura Óptica de Cronômetros), é descrito detalhadamente no sexto capítulo. Neste tópico os princípios de operação, a aplicabilidade, assim como a forma de utilização aparecem de uma maneira didática que pretende ser um guia para qualquer futuro operador do sistema. A validação metrológica do SISLOC ocupa o tema central do capítulo 7, onde as influências intrínsecas e ambientais são levantadas e uma rotina de

---

calibração do próprio sistema é apresentada juntamente com seus resultados. Esta rotina inclui a validação do programa gerenciador, cujos resultados são apresentados nos anexos.

O capítulo 8 é destinado ao usuário industrial de cronômetros. Neste item uma proposta de determinação de incertezas se destina a esclarecer acerca da necessidade de considerar a influência humana no cálculo resultante de uma medição industrial, mostrando exemplos úteis sob diversas circunstâncias. As conclusões são apresentadas no nono capítulo, oportunidade para uma reflexão sobre as circunstâncias nas quais surgiu este trabalho, assim como suas perspectivas futuras.

Nos anexos são mostrados diversos documentos úteis à compreensão dos assuntos tratados no texto principal. A memória de cálculos da calibração do Sistema, modelo de um relatório de calibração de cronômetros, conteúdo do arquivo de salvamento automático dos dados de calibração, certificados de calibração dos equipamentos utilizados no Sistema, um procedimento de calibração de cronômetros via SISLOC, a correspondência que autoriza a redução da incerteza mínima do laboratório em função da utilização do SISLOC e uma abordagem teórica sobre a modelagem da variância Allan.

## **Capítulo 2**

### **Cronômetros**

## 2 – Cronômetros

### 2.1 – Medição de intervalos de tempo utilizando cronômetros

#### 2.1.1 – Histórico e aplicações gerais dos cronômetros

Medidores de tempo são tão antigos quanto a história escrita da humanidade. Os fenícios utilizavam uma lâmpada de óleo graduada, cuja marcação indicava o tempo decorrido desde o acendimento da chama. Bons navegadores, os fenícios bem podem ter copiado a idéia de outros povos com os quais mantinham contato. Fato semelhante ocorreu com os gregos, que divulgaram a clepsidra, instrumento desenvolvido provavelmente no Egito Antigo, onde teve largo uso desde 1400 antes de cristo. Também ao Egito a ciência deve o primeiro relógio de sol, ou gnômon, cerca de 3500 anos antes da era cristã, enquanto a ampulheta somente surgiu depois do nascimento de cristo, provavelmente antes do ano 100. Os primeiros relógios mecânicos propriamente ditos surgiram na primeira metade do século XIV, sem que se conheça um inventor. Datados da metade deste século, documentos da Inglaterra e da Itália descrevem a construção destes mecanismos, nesta altura baseados no movimento de queda de um peso determinado freado por um dispositivo de catraca e palhetas, semelhante ao usado até hoje nos relógios mecânicos.

Somente no século XV o peso foi substituído pela mola, o que permitiu a confecção de relógios bem menores, embora ainda muito imprecisos para qualquer aplicação mais exigente que o convívio social. Estes relógios eram confiáveis apenas com tolerâncias muito grandes, como dez ou quinze minutos por dia. O próximo avanço teve de esperar pelo ano de 1656, quando o pêndulo foi utilizado como trava do mecanismo de tração de relógios, num experimento do físico Christian Huygens que conseguiu reduzir o erro dos relógios para algo em torno de dez ou quinze segundos por dia. Poucos anos depois a âncora foi desenvolvida como alternativa à catraca para o controle da rotação do eixo do relógio, melhorando ainda mais o seu desempenho.

No início do século XX todas as embarcações de porte dispunham de um cronômetro semiportátil muito estável, cujo mecanismo permanecia em balanço, suspenso por molas para evitar choques pelo movimento do navio. Em 1925 pesquisadores dos Laboratórios Bell, nos Estados Unidos, construíram o primeiro relógio a quartzo baseado na piezeletricidade de um cristal adequadamente cortado, fenômeno descoberto em 1880 por Pierre e Jacques Curie, na França. Relógios portáteis a quartzo foram produzidos inicialmente para utilização profissional na década de 1960, com um custo ainda muito elevado. Estações de rádio e de televisão e sistemas de tarifação

automática de chamadas telefônicas foram as primeiras aplicações comerciais destes caros instrumentos, que foram gradualmente evoluindo em tecnologia eletrônica e tendo seu tamanho e preço reduzido. No final da década de 1970 relógios de pulso eletromecânicos a cristal de quartzo e outros totalmente eletrônicos, com mostrador de LED e de cristal líquido, estavam largamente disseminados. Cronômetros de mão, porém, continuaram sendo produzidos totalmente mecânicos até bem mais tarde, convivendo com cronômetros eletrônicos com mostrador de cristal líquido até o início dos anos 1990, quando a produção já era quase totalmente eletrônica.

Fora do ambiente industrial a aplicação intensiva dos cronômetros de mão esteve sempre basicamente restrita à medição de tempo em eventos esportivos ou avaliações biomédicas. Nas competições de alta velocidade, porém, a incerteza introduzida pela operação humana de cronômetros forçou a busca de alternativas, e há no final do século XX uma tendência para a utilização de sofisticados sistemas de radar integrados a cronômetros de tempo real, capazes de fornecer os resultados das medições relativas aos tempos dos diversos participantes de forma totalmente automatizada.

### 2.1.2 - Aplicações industriais de cronômetros

Intervalos de tempo correspondentes a processos não-automatizados, desde uns poucos segundos até várias horas, são medidos rotineiramente nos mais diversos ambientes industriais em muitas etapas e processos, usualmente através da utilização de cronômetros de operação manual. Cronômetros de mão não podem ser indiscriminadamente aplicados, entretanto, e métodos automatizados são freqüentemente indispensáveis, especialmente quando os intervalos de tempo medidos são demasiadamente pequenos ou a freqüência de medição é alta, fazendo com que a medição automatizada de tempo tenha sua aplicação restrita a casos bem específicos enquanto todas as demais medições continuam sendo feitas manualmente. Alguns exemplos de aplicações industriais de cronômetros na medição de tempo são (algumas vezes a expressão *medição de tempo* substituirá a expressão *medição de intervalos de tempo*, mais correta, para fins de simplificação):

- a) no escoamento de fluidos, na determinação de viscosidade de tintas, solventes, colas e alimentos ;
- b) na operação de máquinas para fins de cronograma de manutenção ;
- c) na aplicação de corrente em banhos galvânicos em metalurgia ;
- d) na realização de tarefas de controle de produtividade ;
- e) na mistura e cozimento em indústrias alimentícias ;
- f) no despegamento em fitas autocolantes sob carga cisalhante ;

- g) na determinação de vazão em bombas hidráulicas ;
- h) na medição de energia elétrica consumida em processos sob avaliação ;
- i) no levantamento da curva de operação de disjuntores termomagnéticos e fusíveis ;

Nos casos em que o intervalo de tempo medido necessita ser conhecido com precisão elevada a partir de uma única medição, sensores podem ser acoplados ao sistema envolvido fornecendo sinais de disparo e travamento independentes do tempo de resposta humano. Nestes casos, nos quais há necessidade de cronômetros que admitam acionamento externo e, possivelmente, que consigam controlar dispositivos elétricos relacionados, o custo associado à medição de tempo se eleva substancialmente. A calibração de um sistema com este grau de complexidade, por outro lado, engloba avaliação do medidor de intervalos de tempo, dos sensores de disparo e travamento e dos dispositivos de controle de cargas externas, fugindo ao tema deste trabalho. Mesmo nestes casos, porém, o Sistema Automatizado de Calibração Óptica de Cronômetros (ou simplesmente *Sistema*) pode ser aplicado, via de regra, a uma ou outra etapa do processo. A maioria das medições de intervalos de tempo necessárias aos diferentes processos industriais, entretanto, não exige instrumental mais sofisticado que um cronômetro digital ou analógico de disparo manual, operado por uma pessoa treinada, e a totalidade destes cronômetros de operação manual utilizados industrialmente são calibráveis pelo método óptico desenvolvido.

## 2.2 - Cronômetros manuais

### 2.2.1 - Cronômetros mecânicos

Cronômetros mecânicos têm construção semelhante à usada em qualquer relógio mecânico tradicional e usam um princípio, derivado do pêndulo, desenvolvido na época das grandes navegações. As variáveis comprimento e gravidade, que no relógio de pêndulo definem a pulsação da base-de-tempo, no relógio mecânico e nos cronômetros mecânicos atuais foram substituídas pelo momento de inércia de um anel metálico e pela constante elástica de uma mola em espiral associada. Este conjunto, similar a um oscilador massa-mola básico, é suspenso através de pivôs cujo atrito em relação ao movimento rotacional é mantido baixo através da escolha adequada dos materiais envolvidos, e seu movimento é aproveitado para o giro dos ponteiros através de um sistema de âncora e de um jogo de engrenagens. Através de um adequado dimensionamento mecânico do anel, seu suporte e todo o sistema de engrenagens, e em condições restritas de manuseio e ambientais, flutuações da ordem de 1 segundo por dia podem ser esperadas.

### 2.2.2 - Cronômetros eletrônicos

Cronômetros digitais de mão são dispositivos eletrônicos constituídos por uma base-de-tempo que utiliza o princípio piezoelétrico de um diminuto cristal de quartzo mantido em suspensão ressonante de frequência ultra-sônica, geralmente encerrado em uma câmara de alumínio com volume tão pequeno quanto  $1\text{mm}^3$ . A partir de uma realimentação eletronicamente amplificada, imposta ao cristal, sua oscilação assume amplitude e frequência constantes e um sinal elétrico pode ser retirado de seus terminais. Este sinal elétrico possui identidade de frequência com a oscilação mecânica do cristal, que nos cronômetros mais difundidos se aproxima de 32768 Hz, ou seja,  $2^{15}$  Hz.

Em seguida este sinal elétrico senoidal é amplificado, aplicado a um circuito disparador que o converte para um formato retangular, compatível com as etapas de divisão binária em seqüência, e a partir deste ponto os diversos modelos de cronômetros comerciais começam a apresentar diferenças construtivas em seus circuitos, conforme suas funções de apresentação, disparo e travamento, resolução, memórias e alarmes. O próximo módulo em um cronômetro típico apresenta um contador programável, chaveado e resetável com limites de contagem de 59 minutos, 59 segundos e 99 centésimos, para medição de períodos de até 1 hora, e 23 horas, 59 minutos e 59 segundos, para períodos maiores. A maioria dos cronômetros também dispõe de uma função *relógio* que fica ativa quando o cronômetro está fora de uso.

Para chavear a operação deste cronômetro típico, interruptores mecânicos acionam circuitos monoestáveis *anti-repique* cujas portas lógicas atuam na memória da etapa de decodificação ou no contador, enquanto o mostrador de cristal líquido apresenta continuamente o conteúdo de sua memória. Na maioria dos cronômetros digitais há também um ou mais segmentos separadores, ou simplesmente indicadores, que pulsam a uma frequência de 1 ou 2 Hz. Sinais sonoros relacionados a acionamentos dos interruptores normalmente estão presentes. Na figura 2.1 um circuito típico de cronômetro digital é apresentado.

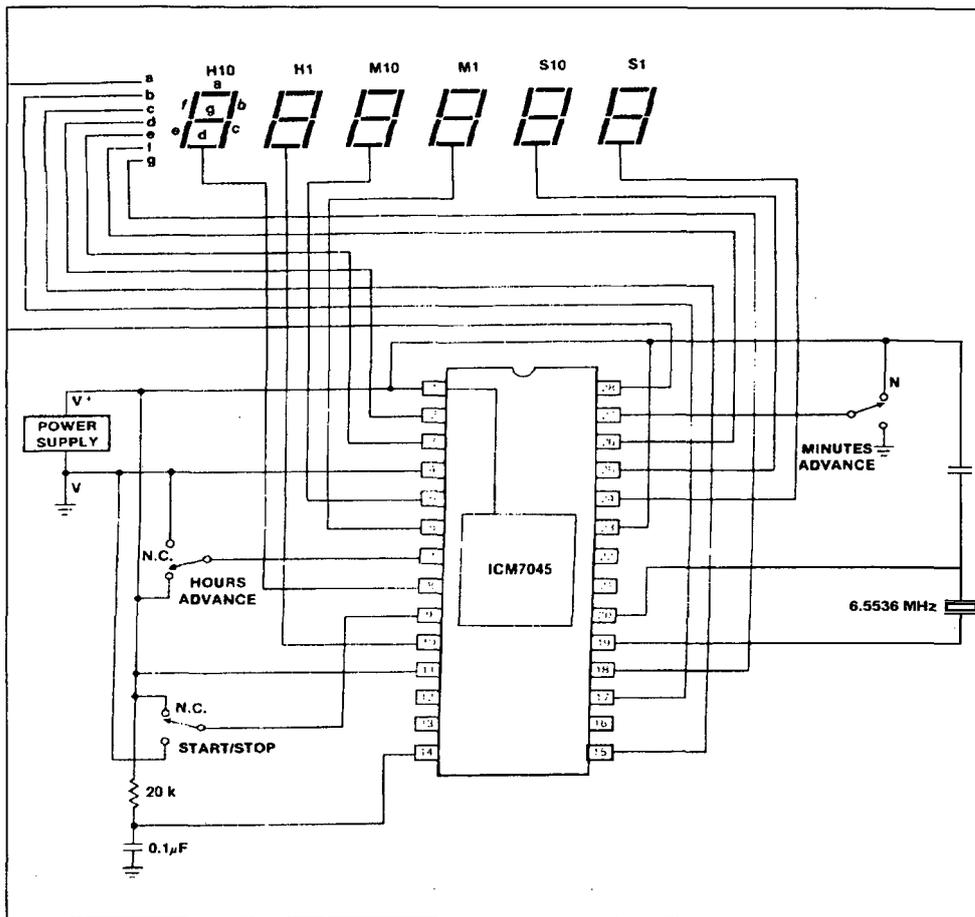


Figura 2.1 - Circuito completo de cronômetro eletrônico sugerido pela Intersil (1987)

### 2.2.3 - Cronômetros híbridos

Possuem uma etapa osciladora a cristal idêntica à utilizada nos cronômetros eletrônicos, seguida por divisores que entregam pulsos de 1 Hz a um pequeno motor de passo que, por sua vez, movimenta ponteiros mecânicos idênticos aos encontrados em cronômetros analógicos. Esta configuração raramente é encontrada em cronômetros, apesar de ser muito freqüente em relógios, porque os mecanismos exigidos para o disparo e travamento são relativamente complexos e caros, se comparados a dispositivos eletrônicos similares. O circuito sugerido pela Intersil, apresentado na figura 2.2, é largamente aplicado a relógios despertadores com alimentação de 1,5 V.

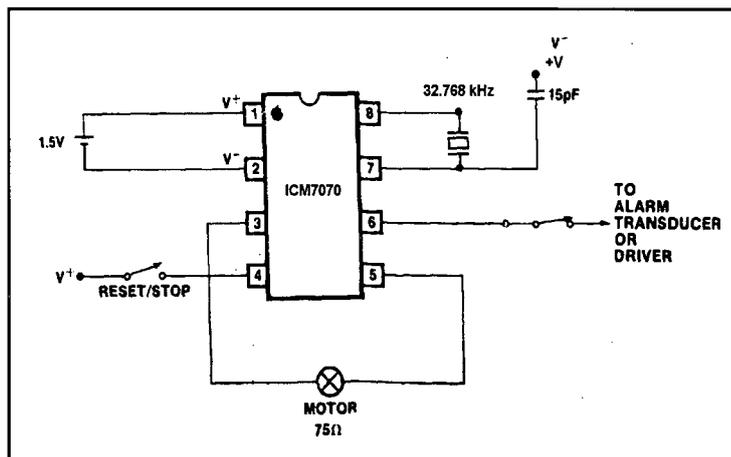


Figura 2.2 - Circuito eletrônico de cronômetro híbrido sugerido pela Intersil (1987)

### 2.3 - Fontes de incerteza internas e ambientais

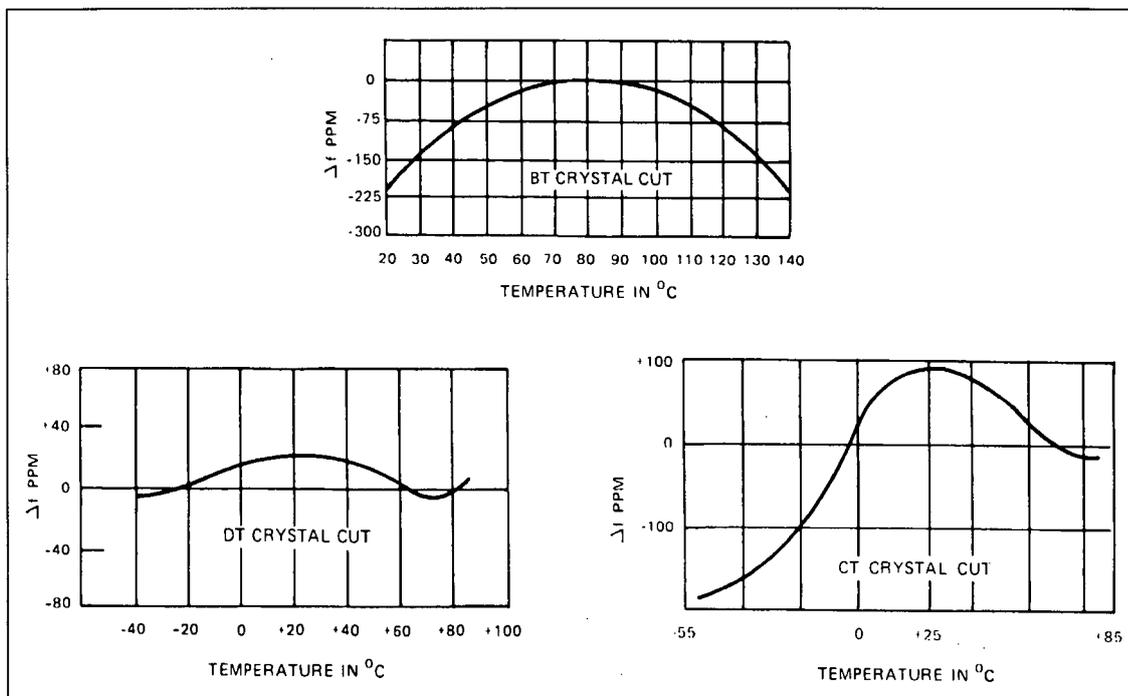
#### 2.3.1 - Base-de-tempo a cristal piezoelétrico

A fonte básica de incerteza na indicação de um cronômetro, tomado isoladamente e nas aplicações usuais, é a estabilidade da frequência gerada por sua base-de-tempo interna, isto é, por seu sistema ressonante a cristal. Osciladores controlados por cristais podem sustentar contadores de tempo com incertezas ( $\Delta t/t$ ) da ordem de  $0,1 \times 10^{-6}$  desde que exista um sistema relativamente complexo de manutenção de condições ambientais, envolvendo flutuações de temperatura menores que  $1^\circ\text{C}$ , além de um sistema de desacoplamento de vibrações, como nos padrões de frequência a quartzo. Nos instrumentos menos sofisticados e nas aplicações de campo, sem condicionamento de qualquer espécie, incertezas maiores que  $100 \times 10^{-6}$  são esperáveis em intervalos curtos, da ordem do período da oscilação do cristal, enquanto em períodos integrativos usuais de aplicação e calibração esta incerteza cai para valores próximos à  $1 \times 10^{-6}$ , o que representa algo em torno de 0,1 segundo por dia, na indicação do contador associado. A tabela 2.1 resume as incertezas esperadas em bases-de-tempo a cristal piezoelétrico.

Tabela 2.1 – Incertezas aproximadas em bases-de-tempo a cristal piezoelétrico

Condições de aplicação da base-de-tempo a cristal piezoelétrico	Ordem de grandeza da incerteza associada ao período da oscilação da base-de-tempo (s/s)
Aplicação de campo em intervalos curtos	$100 \times 10^{-6}$
Aplicação de campo em intervalos longos	$1 \times 10^{-6}$
Sistema padrão com controle térmico e vibracional	$0,1 \times 10^{-6}$

A flutuação de frequência que se obtém variando a temperatura de um cristal oscilador foi estudada academicamente e na medida da necessidade dos fabricantes internacionais de instrumentos de medição, e um resumo desta característica pode ser observado na figura 2.3, abaixo. Nesta figura, retirada do manual da Hewlet-Packard - Application Note 200-2 - sobre os fundamentos dos osciladores de quartzo, pode-se notar uma tendência à flutuação positiva na frequência, em função da temperatura e do tipo de corte dado ao cristal, nas proximidades da temperatura ambiente.



**Figura 2.3 – Flutuação na frequência de cristais osciladores segundo a direção do corte e a temperatura a que estão submetidos**

Dados mais precisos sobre o comportamento de um cronômetro eletrônico frente a variações de temperatura foram obtidos através de um experimento realizado no mês de junho de 1998, nas dependências do LABELO-PUCRS. Neste experimento um cronômetro de baixo custo - um dos modelos mais utilizados industrialmente - foi exposto a uma fonte térmica de intensidade variável capaz de aquecê-lo até 20  $^{\circ}\text{C}$  acima da temperatura ambiente ( $23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ) ao longo de um período de 24 horas. Neste intervalo a temperatura de invólucro do cronômetro foi medida automaticamente por contato, a cada 11 segundos, com um termômetro de armazenamento *Datalog*, enquanto o pulsar de um segmento do mostrador digital foi acompanhado pelo sistema automatizado de calibração óptica, com cada leitura representando integração de 500 segundos de amostragem. Um diagrama da montagem experimental realizada é mostrado na figura 2.4, e os gráficos resultantes são apresentados nas figuras 2.5 e 2.6, abaixo.

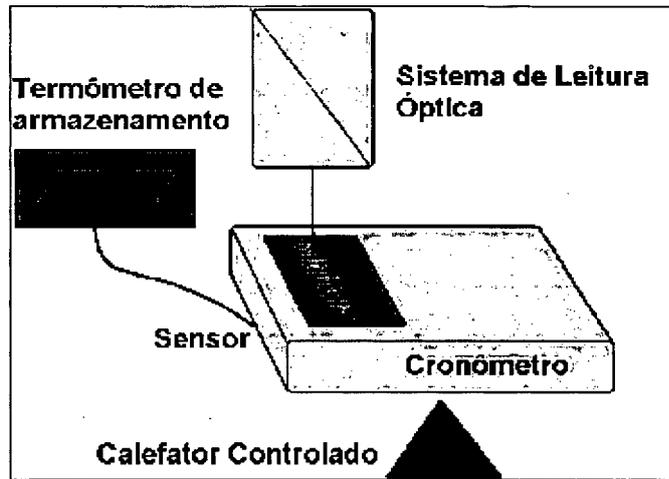


Figura 2.4 – Avaliando o comportamento térmico de um cronômetro

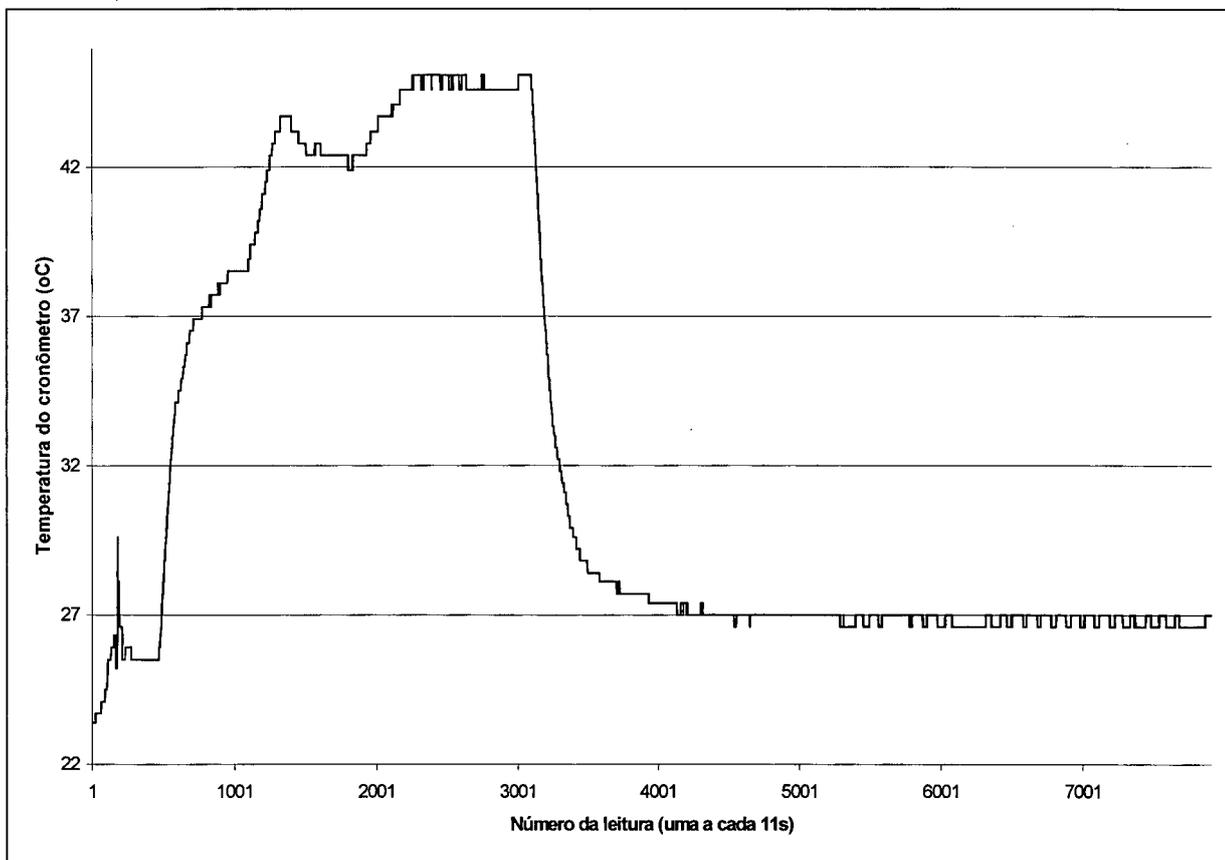
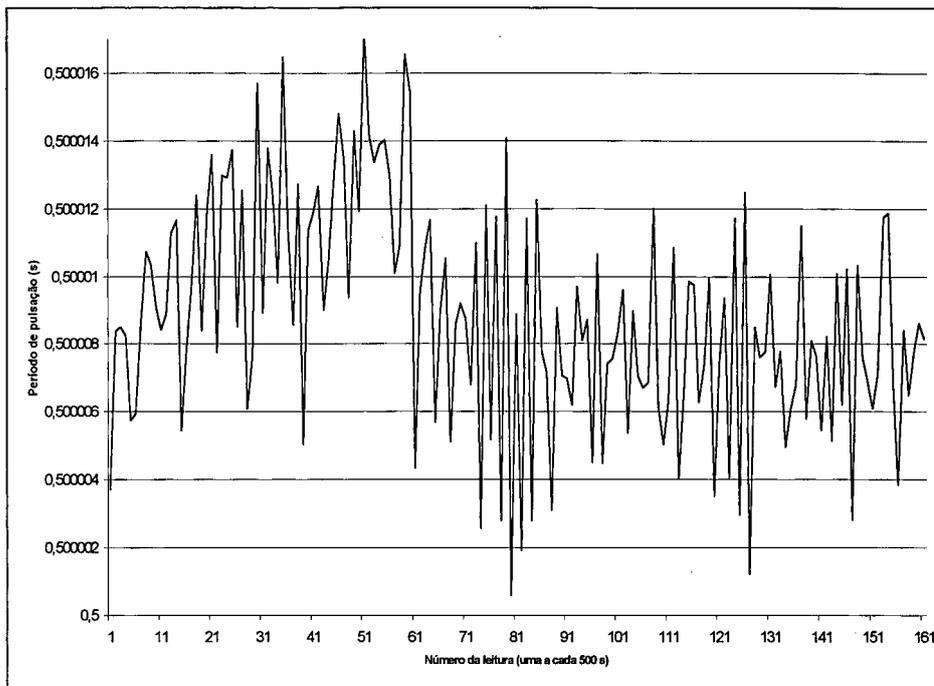


Figura 2.5 – Temperatura do cronômetro em amostragem de 24 h



**Figura 2.6 – Período de pulsação de segmento do mostrador do cronômetro em amostragem de 24 h, obtida simultaneamente com a medição de temperatura**

Sendo desconhecida a ordem da dependência entre o período de pulsação do segmento e a temperatura do invólucro do cronômetro, e considerando a grande variabilidade das leituras individuais de período, a semelhança dos dois gráficos somente fica evidente através de um modelamento matemático adequado para o caso, que pode ser uma regressão polinomial de ordem elevada ou uma média a intervalos, por exemplo. No gráfico da figura 2.6 uma curva de tendência polinomial de sexta potência foi sobreposta à curva original, permitindo assim a clara visualização da interligação nas variações nas duas grandezas.

Um coeficiente que representa aproximadamente a dependência do período de pulsação do segmento do mostrador de cristal líquido deste cronômetro em relação à temperatura pode ser obtido de uma maneira simplificada através da relação entre as variações dos dois gráficos, nos períodos correspondentes, extraídas diretamente dos máximos e mínimos das curvas de regressão polinomial de sexta potência (não mostrada) da curva de temperatura e da curva de tendência de período ;

$$\frac{\Delta t}{\Delta T} = \frac{0,5000123 - 0,5000074}{45,5 - 26,6} = 0,26 \mu s / ^\circ C \quad (\text{eq.2.1})$$

Este valor, considerado em relação ao período nominal de pulsação do segmento utilizado para amostragem, que foi de 0,5 s, resulta em uma dependência específica do período do cronômetro em relação à temperatura de cerca de  $0,5 (\mu\text{s/s})^{\circ}\text{C}$ , ou  $0,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ , não muito divergente de Bechtold (1994), que aponta uma estimativa típica para estabilidade térmica de bases-de-tempo a cristal como  $1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ .

Isto significa que para flutuações de temperatura de  $\pm 10^{\circ}\text{C}$  em relação à encontrada no laboratório de calibração as implicações da incerteza associada à flutuação térmica da frequência da base-de-tempo dos cronômetros digitais estão restritas a valores da ordem de 0,4 s por dia. Baixa, se for comparada à incerteza introduzida pela operação humana do cronômetro, que é da mesma ordem de grandeza para qualquer intervalo de medição (usualmente muito menor que 24 horas). A consideração desta dependência, porém, pode ser necessária, a critério do usuário, em situações mais críticas, nas quais a temperatura de utilização seja muito elevada ou muito baixa se comparada à do laboratório, especialmente para longos períodos de medição.

### 2.3.2 - Caminho elétrico dos sinais de ativação e desativação

Outras fontes intrínsecas de incerteza na medição de tempo com cronômetros são o retardo diferenciado e a flutuação nos intervalos de tempo de comutação dos circuitos lógicos responsáveis pelo disparo e travamento do contador, após acionamento externo. Considerados rigorosamente estes circuitos apresentam lapsos de tempo intrinsecamente diferentes na ativação e desativação, diferença esta originada em duas fontes distintas, a saber ;

- a) *a diferença de caminho elétrico do sinal de comando, ou seja, a diferença no número de portas lógicas acionadas seqüencialmente a partir do pressionamento de um interruptor.* Nos cronômetros mais simples estes caminhos físicos do sinal elétrico são fixos, apesar de diferentes na ativação e desativação, enquanto nos cronômetros que dispõem de recursos de memorização e alarmes estes caminhos podem ser ligeiramente alterados pelo estado do sistema no instante do acionamento.
- b) *A diferença entre os tempos de comutação baixo-alto e alto-baixo de cada porta individualmente.* Esta diferença está intrinsecamente associada ao comportamento eletrodinâmico dos portadores de carga nos materiais semicondutores constituintes das portas lógicas.

Circuitos de lógica CMOS avançada (ACL), como os usados em cronômetros digitais, têm retardo de tempo de propagação definido como o intervalo de tempo necessário para que a saída atinja um nível de tensão equivalente a 50% da tensão de alimentação, após a entrada atingir este mesmo nível a partir de um sinal retangular. O tempo de propagação é também função da capacitância da carga aplicada à saída, conforme a figura 2.7, adaptada de Texas (1988), com flutuação esperada entre a comutação alto-baixo e baixo-alto de  $\pm 2$  ns a 500 pF de carga, sob uma taxa média de tempo de propagação em função da capacitância aplicada à saída, de 18 ps/pF.

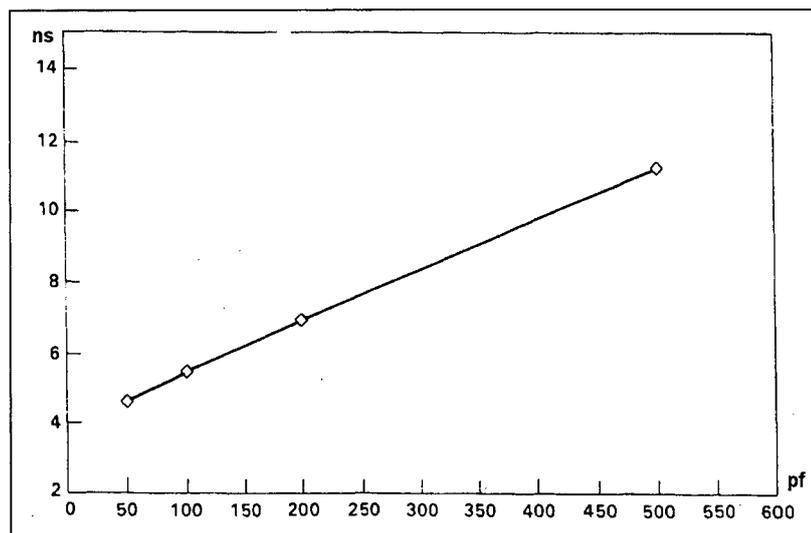


Figura 2.7 - Tempo de propagação x capacitância de carga em portas ACL

O erro introduzido na medição de intervalos de tempo através de um cronômetro pelos circuitos de disparo e travamento corresponde à diferença entre os tempos de propagação dos sinais de controle. Esta diferença, por sua vez, depende do número de portas lógicas existentes no caminho elétrico dos sinais, cada uma com sua incerteza associada, além da diferença entre o número de portas lógicas existentes no caminho elétrico do sinal de ativação e o número correspondente no caminho do sinal de desativação.

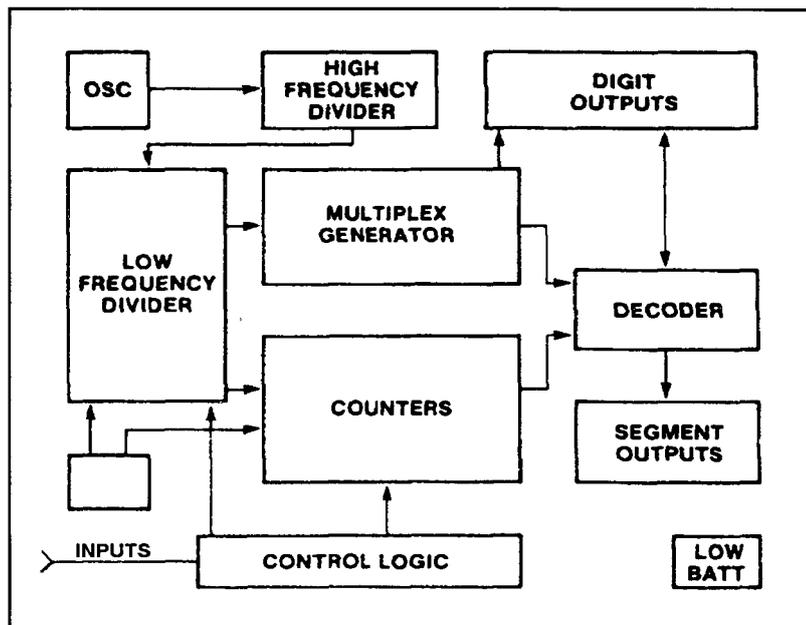


Figura 2.8 - Diagrama de blocos do ICM 7215 Intersil

O caminho elétrico exato que os sinais de controle seguem no circuito elétrico de cronômetros comerciais é um segredo industrial que os fabricantes de circuitos integrados dedicados escondem juntamente com todas as demais informações que possam facilitar a cópia de seu projeto pelos concorrentes. Na figura 2.8, extraída de Intersil (1987), um diagrama de blocos de um circuito integrado dedicado que se constitui em um cronômetro completo, o ICM7215, mostra a forma como o bloco denominado *lógica de controle* se relaciona com as demais partes do circuito. Este bloco representa o conjunto de conexões operacionais que relaciona as ações do usuário com o comportamento do cronômetro, sendo composto basicamente por quatro interruptores de contato momentâneo. A eletrônica associada ao acionamento dos controles envolve tipicamente uma seqüência de portas lógicas de formatação de sinal, além de reconhecimento ou exclusão de acionamento simultâneo.

Apesar da não-divulgação do circuito elétrico dos integrados dedicados utilizados nos cronômetros comerciais, a ordem de grandeza do erro que o bloco de lógica de controle insere em uma medição de tempo pode ser avaliada a partir das informações relativas às características individuais das portas lógicas, invariavelmente usadas nos blocos de controle dos cronômetros. A análise de circuitos discretos assemelhados, como os usados em temporizadores, permite também algumas suposições razoáveis, como;

- a) cada porta lógica seqüencialmente inserida no caminho do sinal de controle do cronômetro apresenta um tempo de propagação máximo em torno de 10 ns ;

- b) o estado do sistema no momento do acionamento do interruptor pode introduzir variações de até cinco portas lógicas no caminho elétrico do sinal ;
- c) o acionamento dos controles de ativação e de desativação produzem sinais cujos caminhos elétricos divergem intrinsecamente por até cinco portas lógicas ;

A máxima divergência de caminho entre os sinais de comando será, pela análise das suposições, de dez portas lógicas, equivalente a  $10^2$  ns de erro na medição. Como a quantidade de portas lógicas assinalada é uma estimativa máxima, assim como também o é o tempo de propagação por porta lógica, função da capacitância do circuito em cascata, o valor encontrado para esta divergência pode ser considerado como sendo um limite máximo para a incerteza introduzida na medição de tempo pelo circuito de acionamento da lógica de controle dos cronômetros em geral.

### 2.3.3 - Resolução

Embora a propagação dos sinais de controle e a incerteza máxima atribuível ao intervalo de tempo de processamento dos sinais de acionamento dos cronômetros seja da ordem de apenas algumas dezenas de nanossegundos, a atualização do contador e, por conseqüência, do mostrador do cronômetro, não é contínua, mas quantizada com incrementos que dependem da faixa de indicação, o que introduz uma incerteza importante relativa à resolução. A ordem de grandeza desta incerteza é equivalente à ordem de grandeza da própria resolução e precisa ser considerada relativamente ao período máximo de indicação do cronômetro em uso.

Há medições cuja magnitude da resolução pode ser considerada insignificante em relação ao tempo de reação do operador, como na maioria dos casos de calibração de cronômetros sob intervalos inferiores a uma hora, e medições de longos períodos cuja resolução atinge 1 segundo e até 1 minuto, conforme o modelo do cronômetro. Embora no primeiro caso não exista sentido prático em atribuir um valor numérico à incerteza relativa à resolução, que fica diluída pela ação humana, na maioria das calibrações não-automatizadas de longos períodos ela se torna significativa e precisa ser considerada.

Em uma calibração manual com sincronismo visual-auditivo o operador pressiona o interruptor de parada do cronômetro quando ouve o pulso sonoro e vê uma comutação específica de um determinado segmento no relógio padrão. A partir deste momento o contador interno do cronômetro não é mais incrementado e o mostrador apresenta o último valor armazenado, embora um determinado

lapso de tempo tenha passado desde a última atualização. Este lapso é o erro gerado pela digitalização e integração do tempo, e tem valor máximo igual à metade da resolução da faixa de medição utilizada. Na calibração automatizada proposta neste trabalho inexistente o erro da resolução porque o contador padrão externo inicia e finaliza a contagem *na comutação* de um segmento do mostrador do cronômetro, e não em um instante aleatório qualquer.

#### 2.3.4 – Retardo dos interruptores

O sistema eletromecânico responsável pela transformação do movimento do dedo do operador em um sinal elétrico adequado ao acionamento do bloco de controle dos cronômetros digitais é constituído por um interruptor de pressão, de contato momentâneo e normalmente aberto. A partir do momento em que a pressão do dedo do operador é aplicada ao interruptor, até o momento em que o respectivo sinal elétrico emerge do sistema, decorre ao redor de um centésimo de segundo, supondo um distanciamento entre contatos de 1 mm e velocidade de acionamento da ordem de 100 mm/s. Como no caso dos tempos de comutação das portas lógicas, também este retardo é autocompensatório, pois se reproduz tanto na ativação quanto na desativação do cronômetro.

Em termos rigorosos pode-se atribuir uma incerteza parcial à medição de tempo, considerando a influência da variação na velocidade de acionamento do interruptor, da ordem de um milésimo de segundo, sempre que uma calibração não-automatizada, com leitura no próprio cronômetro, esteja se realizando. Quando a calibração do cronômetro é feita através um contador externo sincronizado pelo operador, onde a leitura é realizada, não há sentido em considerar esta incerteza. Da mesma forma, através do sistema automatizado de calibração proposto neste trabalho não há acionamentos a considerar, já que o intervalo de tempo medido é automaticamente delimitado entre dois eventos ópticos no mostrador do cronômetro.

#### 2.4 – Influência do operador

O acionamento é a principal fonte de incerteza externa em uma medição de tempo com cronômetros, além da possibilidade de erros grosseiros na leitura da indicação do instrumento. Desde que um operador aciona o interruptor do cronômetro, tentando sincronizar esta ação com um evento externo ao qual tem acesso através dos sentidos, há uma intermediação do sistema nervoso humano nesta medição. Desta forma fatores absolutamente sem controle, como a disposição psicológica ou o estado de saúde do operador, afetam o resultado das medições porque influenciam a velocidade com que os estímulos são respondidos.

---

Uma pesquisa neste sentido, infelizmente não documentada, solicitada pelo LABELO-PUCRS, foi realizada em 1995 pelo Instituto de Psicologia da própria universidade, através de seu Centro Psicotécnico. Visando avaliar a incerteza que o operador introduz em uma medição não-automatizada de tempo, a velocidade de resposta a estímulos sonoros e luminosos de técnicos em metrologia do laboratório foi testada, e os resultados apontaram para uma incerteza mínima de 0,2 segundos e máxima de 0,4 segundos por operação envolvendo um disparo e um travamento seqüenciais. Para a realização deste levantamento o Centro Psicotécnico utilizou equipamentos específicos, semelhantes aos aplicados à verificação do tempo de resposta a estímulos visuais e auditivos em motoristas e agentes policiais.

Apesar da limitação de tamanho do grupo ao qual foi aplicada a bateria de testes, utilizada para a realização da pesquisa, não existe diferença fundamental entre as atribuições, qualificações ou capacidades, dos funcionários do laboratório da universidade em relação aos usuários industriais de cronômetros que justifique o não-aproveitamento de seu resultado. Este valor de incerteza, indicativo da influência humana na medição de tempo manual com cronômetros, pode ser reconhecido como representativo, devendo ser considerado quando da utilização do cronômetro na indústria, da mesma forma como é feito quando de sua calibração por meios não-automatizados.

Embora relativamente elevada, a incerteza em tempo que reflete a influência do operador no processo de medição pode ter suas conseqüências razoavelmente minimizadas durante uma calibração manual de cronômetros, embora isto implique na redução de produtividade no serviço prestado pelo laboratório. Neste caso a influência humana pode ser reduzida através da multiplicação das seqüências de medição, que tende a cancelar as parcelas aleatórias embutidas em cada leitura. Na utilização industrial, porém, a aplicação manual dos cronômetros envolve normalmente apenas uma única medição, e neste caso, especialmente quando o intervalo de tempo medido é pequeno, a incerteza injetada pela operação humana precisa ser considerada integralmente.

Não obstante, nem todas as aplicações industriais dos cronômetros exigem a consideração da influência humana no cálculo da incerteza associada a uma medição. Certos dispositivos mecânicos ou eletromecânicos podem ser adaptados para disparar e travar automaticamente o cronômetro no início e no final, respectivamente, do período que necessita ser medido. Um exemplo desta possibilidade é a medição do tempo de despegamento de fitas autocolantes, onde cada amostra a ser analisada suporta um peso determinado que é preso, através da fita, numa placa com rugosidade padronizada e um suporte adaptador mecanicamente conectado ao botão *start/stop* de um cronômetro. Quando o peso é

aplicado o cronômetro entra em contagem, que termina quando a fita desprende da placa, muitas horas ou mesmo dias depois. Nesta aplicação, contudo, a automação não foi instituída com o propósito de evitar a parcela de incerteza derivada da operação humana do cronômetro, que poderia ser desprezada frente aos longos períodos medidos, mas sim para permitir que a atenção do cronometrista possa se desviar para outras tarefas.

Excetuando situações específicas, como a citada acima, o uso de cronômetros envolve a consideração da influência humana além da correção indicada no certificado de calibração, que corrige uma dada indicação do mostrador em relação apenas ao desempenho intrínseco do instrumento. A inclusão desta componente no cálculo da incerteza global de uma medição é de responsabilidade do usuário, que deve estar consciente das limitações e da aplicabilidade das informações fornecidas pelo laboratório responsável pela calibração do cronômetro.

## 2.5 - Necessidade de calibração

Acompanhar metrologicamente um Sistema de Medição significa mantê-lo *rastreadável aos padrões primários nacionais e internacionais*, isto é, garantir que as medidas que forem feitas neste Sistema de Medição não diferirão de medidas feitas em outros sistemas em qualquer parte do mundo. Isto é obtido através de uma *calibração*, que levanta as correções que devem ser aplicadas em cada medida deste sistema. A calibração é um procedimento técnico que consiste em tomar o valor indicado pelo sistema sob ensaio, quando excitado convenientemente, e compará-lo com o valor indicado (ou gerado) por um sistema padrão. Após um tratamento, estes dados se materializam no *Certificado de Calibração*, que só tem valor legal no Brasil quando emitido por um laboratório credenciado na *Rede Brasileira de Calibração*, distinção que implica em um conjunto de exigências que comprovam a qualidade dos serviços prestados. Este certificado de calibração é exigido em auditorias que visem comprovar a existência de requisitos de qualidade, como as usadas para certificação.

Ao nível do usuário o acompanhamento metrológico é quase transparente, e consiste basicamente em aplicar correções nas medidas obtidas com seu sistema de medição baseadas nas indicações do certificado de calibração. Em algumas circunstâncias, dependendo do nível necessário de aproximação que uma medida deve ter em relação ao *Valor Verdadeiro Convencional*, o usuário simplesmente usa o certificado como meio de detecção e exclusão de um dado Sistema de Medição, ao invés de corrigir cada leitura.

Quando o conhecimento preciso de um intervalo de tempo medido é condição para a qualidade de um produto ou serviço o acompanhamento metrológico do cronômetro se faz necessário, e calibrações devem ser realizadas a intervalos regulares. A calibração de um cronômetro permite compatibilizar as medições com ele efetuadas com medições feitas em outros cronômetros calibrados, onde estiverem, estabelecendo uma conexão de rastreabilidade que garante o resultado encontrado. Embora os bons fabricantes destes instrumentos realizem uma verificação de parâmetros operacionais no final do processo produtivo, a título de controle de qualidade, e às vezes acrescentem ao manual de instruções e termo de garantia um documento semelhante a um certificado de calibração, em nenhum caso de aplicação profissional de cronômetros há uma desobrigação tácita em relação à necessidade de uma calibração independente, ao menos uma vez, antes do instrumento ser posto em utilização. No caso de cronômetros de mão a frequência de realização das calibrações precisa ser definida considerando as condições de utilização do instrumento, assim como o nível de exigência quanto ao seu desempenho.

Ao longo do desenvolvimento e testagem dos protótipos do sistema automatizado, proposto neste trabalho, o acompanhamento de centenas de cronômetros eletrônicos calibrados pelo método manual sugeriu que a expectativa de flutuação na tendência da indicação, após um ano, permanecia dentro dos limites da incerteza do método, exceto em uma pequena parcela dos casos que poderia ser associada, por exemplo, a instrumentos que haviam sofrido avarias e/ou manutenção no período. Neste caso uma conduta razoável seria, portanto, uma calibração anual ou após qualquer manutenção. Em virtude do reduzido número de cronômetros mecânicos que são atualmente utilizados e remetidos para calibração, não foi possível desenhar um quadro equivalente para estes instrumentos, de forma que a recomendação sobre a frequência das calibrações deve provir do bom senso de seus usuários.

O solicitante do serviço de calibração de cronômetros precisa estar consciente que o custo envolvido neste processo pode atingir valores substanciais, até mesmo superior ao preço de mercado do próprio cronômetro a calibrar, e em geral inclui a alocação de um segundo instrumento que substitui o primeiro durante o período de calibração. Algumas vezes a calibração do instrumento é feita internamente na própria indústria, quando esta dispõe de um laboratório próprio, equipado e habilitado para este fim, e outras vezes o serviço é confiado a um laboratório externo. Em qualquer caso a calibração implica na retirada do instrumento de seu local de utilização por um período de vários dias, período este dependente principalmente de fatores ligados ao processo de calibração, além do transporte, emissão de certificado, despacho, recebimento e outras tarefas burocráticas associadas. O usuário consciente da necessidade do serviço metrológico considera estes custos como um investimento em qualidade.

## Capítulo 3

### Calibração de cronômetros

### **3 - Calibração de cronômetros**

#### **3.1 - Método clássico de calibração**

##### **3.1.1 – Procedimento básico de calibração**

A base do método tradicionalmente empregado para a calibração de cronômetros é a intermediação humana, que ocorre tanto na leitura das indicações do padrão e do cronômetro quanto no estabelecimento do sincronismo necessário para o processo. O operador define previamente os intervalos de tempo a calibrar e os instantes de disparo e travamento, anotando-os em uma planilha, conforme o tipo de cronômetro e as necessidades do cliente, quando este especifica os intervalos de medição que utiliza. A confecção desta planilha representa a materialização do planejamento da calibração, e fica armazenada de forma a ser emitida automaticamente quando do retorno do instrumento.

Nos instantes pré-definidos o operador dispara o cronômetro de forma sincronizada com a indicação correspondente do relógio padrão, travando-o ao final do período estipulado. Além da indicação visual, um sinal sonoro pode ser emitido a cada incremento de segundo, facilitando ao operador a obtenção de sincronismo. A diferença entre os intervalos de tempo decorrido indicados nos dois instrumentos é anotada e um novo disparo pode ser feito, até que se complete cinco ou mais ciclos de medição. Ao final deste processo um cálculo simples de média e desvio padrão em relação às diferenças encontradas culmina com a emissão do certificado de calibração, que considera uma incerteza prefixada neste resultado, em função da operação humana.

Esta incerteza prefixada e elevada, porque intrinsecamente associada à falibilidade humana do operador, não prejudica diretamente o cliente médio que também usa manualmente o cronômetro, mas carrega em si um significado muito mais profundo. Nesta incerteza elevada subjaz um custo elevado, gerado pelo uso laboratorial de tecnologia ultrapassada na calibração de cronômetros.

##### **3.1.2 - Limitações e deficiências do processo clássico**

Durante o período de planejamento desta pesquisa a identificação dos processos de calibração de cronômetros utilizados a nível global, seja na indústria, nos laboratórios secundários ou nos laboratórios primários, foi realizada a partir de fontes diretas e indiretas. Como fontes diretas estão incluídas dezenas de visitas a parques industriais cujos processos envolvem uma ou mais medições de

tempo, entrevistas com responsáveis pela utilização de cronômetros em aplicações críticas, avaliação de procedimentos operacionais e sistemas utilizados nos laboratórios metrológicos internos que algumas grandes empresas mantêm, além de intercâmbio de informações com laboratórios secundários independentes e laboratórios primários do Brasil e da Alemanha. Como fonte indireta temos a pesquisa bibliográfica que envolveu extenso levantamento realizado por meios eletrônicos.

A finalização deste processo ocorreu em janeiro e fevereiro de 1997, quando foram visitadas mais de vinte empresas catarinenses que utilizam cronômetros no processo industrial e são clientes do LABELO-PUCRS na calibração destes cronômetros, como também três laboratórios secundários paulistas e o laboratório primário na medição de tempo e frequência do país. Como resultado deste levantamento pode ser relacionada uma série de observações, listadas resumidamente a seguir :

- a) as empresas que utilizam cronômetros e os remetem para calibração externa demonstram, através dos depoimentos de seus encarregados, descontentamento com o custo unitário direto do serviço de calibração, hoje em torno de U\$ 40 a nível internacional. Este valor é freqüentemente superior ao custo do próprio cronômetro enviado para calibração, o que leva inevitavelmente à comparação, embora nenhuma relação ideal ou pré-definida exista idealmente entre estes dois preços ;
- b) o prazo para que o cronômetro a calibrar retorne ao uso é longo e variável conforme a agilidade do setor de expedição e recebimento da empresa e de sua transportadora, e se soma aos sete dias úteis nos quais o cronômetro permanece em poder do laboratório responsável pela calibração ;
- c) algumas empresas calibram seus próprios cronômetros através de um sistema semelhante ao utilizado nos laboratórios secundários ou sistemas alternativos metrologicamente desaconselháveis, inclusive utilizando métodos invasivos. Nestes casos as empresas remetem seu relógio padrão, freqüentemente um contador digital ou osciloscópio, para calibração externa a intervalos regulares ;
- d) os laboratórios secundários visitados utilizam todos o mesmo processo para calibração de cronômetros de operação manual, variando apenas o padrão utilizado como referência e pequenos detalhes de procedimento, tendo seu credenciamento junto ao INMETRO definido incerteza mínima de 0,5 segundo no processo ;

e) o laboratório primário brasileiro de tempo e frequência utiliza um método no qual uma chave elétrica é intercalada entre o dedo do operador e o botão de disparo do cronômetro, permitindo que um contador de referência externo seja acionado simultaneamente. Este método representa uma melhoria substancial em relação ao procedimento tradicional, reduzindo a incerteza associada à não-uniformidade da velocidade de resposta humana para um valor menor que a resolução do cronômetro.

### 3.1.3 – Influência das condições ambientais

O princípio físico no qual está baseada a operação de bases-de-tempo a cristal de quartzo inclui uma dependência importante em relação à temperatura ambiente. O período de oscilação do cristal é basicamente definido em relação à constante elástica do quartzo e às dimensões físicas da peça cortada, ambas variáveis afetadas pela temperatura ambiente.

Em aplicações nas quais a estabilidade necessária é menos crítica, como no caso de cronômetros de mão, bases-de-tempo com susceptibilidade térmica da ordem de  $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  são obtidas a partir de cristais osciladores sem cuidados especiais. Nestes casos os fabricantes ajustam a frequência central do cristal usando circuitos RC e supondo que as variações térmicas diárias são cíclicas, em torno de um valor médio. O desempenho é otimizado através do coeficiente de resistividade térmica do material base do resistor do circuito RC adequadamente escolhido, que gera um desvio térmico de frequência em sentido oposto ao produzido pelo cristal. Os instrumentos compensados desta forma (100% dos modelos comerciais de cronômetros de mão) vão fluir sempre menos de  $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  ao redor de  $20^{\circ}\text{C}$ , número que deve ser suposto compatível com as necessidades do usuário (caso contrário o uso de cronômetros de mão não é recomendado) e que permite que a calibração ocorra normalmente em ambiente de laboratório ( $20$  a  $23^{\circ}\text{C}$ ). Na figura 3.1 é apresentada uma curva de erros típica de um cronômetro de mão.

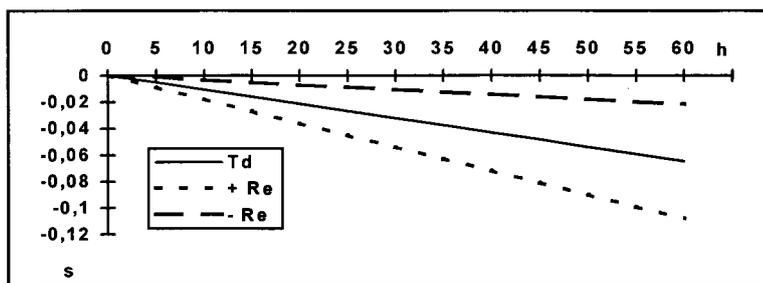


Figura 3.1 – Tendência (Td) e Repetitividade (Re) em uma curva de erros típica de um cronômetro de mão

Em bases-de-tempo de contadores, freqüencímetros, geradores de sinais e osciloscópios de boa qualidade, são usados cristais fechados em câmaras térmicas aquecidas numa temperatura em torno de 50°C, estabilizadas por termostatos ou termorresistores, minimizando os efeitos ambientais adversos. Em bases-de-tempo usadas como padrões secundários a câmara térmica é complementada com a inclusão de um sistema de amortecimento mecânico de vibrações.

### **3.2 – Calibração de cronômetros manuais**

#### **3.2.1 – Procedimento clássico**

O processo ortodoxo normalmente empregado na calibração destes instrumentos consiste na comparação de um determinado intervalo de tempo, definido por um padrão de tempo rastreado, com o mesmo intervalo medido através do instrumento sob calibração. O operador dispara mecanicamente o cronômetro, na tentativa de sincronizá-lo com o pulsar do padrão, valendo-se de duas fontes distintas de sinal de sincronismo; a indicação visual do padrão, oferecida pelo algarismo correspondente às unidades de segundo, e um som (bip) produzido por um circuito oscilador gerador de salvas simples, ligado à saída de 1 Hz do padrão. Ao final de um período grande e definido de tempo, normalmente igual ao intervalo de tempo correspondente ao limite de contagem do cronômetro (10 horas, 12 horas, 24 horas, etc.) o operador trava o instrumento sob calibração sincronamente com a indicação visual e sonora do sistema de referência. Neste caso o operador anota a leitura do cronômetro e calcula o erro por subtração em relação à indicação do relógio padrão, enquanto prepara-se para repetir o ciclo mais algumas vezes com o objetivo de diminuir a incerteza da medição.

No processo empregado amplamente nos laboratórios que prestam este serviço de calibração uma base-de-tempo padrão, de quartzo, rubídio ou césio, associada a um mostrador digital de horas, minutos e segundos, um emissor de sinal sonoro sincronizado com a pulsação dos segundos e sintetizadores de freqüência com saídas padronizadas de 100 kHz a 5 MHz servem como referência ao operador responsável pelo acionamento manual do cronômetro sob acompanhamento metrológico. Na posse dos intervalos de tempo que devem ser alvo da calibração, escolha baseada nas informações de utilização fornecidas pelo requerente do serviço, o operador define uma certa hora, minuto e segundo de disparo, associada a uma respectiva hora, minuto e segundo de travamento cuja diferença resulte no intervalo requerido. Quando o relógio padrão se aproxima da indicação do momento do disparo pré-definido o sinal sonoro sincronizado é acionado e o operador segura o cronômetro aguardando o instante de dispará-lo, o que faz quando percebe que houve a correspondência desejada. Ao final do

---

intervalo pré-fixado novamente o operador pressiona o interruptor do cronômetro conforme os sinais de sincronismo do sistema padrão.

Cronômetros mecânicos ou eletrônicos podem ser calibrados indistintamente pelo método descrito acima, embora alguns avanços visando reduzir ou eliminar a influência humana tenham sido propostos isoladamente por pesquisadores ligados a laboratórios de calibração. Estas propostas alternativas ao método ortodoxo são apresentadas e discutidas no próximo item.

### 3.2.2 – Métodos alternativos

Não existem equipamentos produzidos comercialmente com o propósito exclusivo de calibrar cronômetros, embora existam muitos tipos de bases-de-tempo padrão, contadores e freqüencímetros, usados como parte de sistemas destinados a este fim. Nos laboratórios que incentivam a criatividade de seus técnicos surgem eventualmente idéias práticas aplicáveis à calibração de cronômetros, sendo que algumas delas foram implementadas e apresentadas como alternativa ao método tradicional. Três delas são :

- a) *Método da medição direta.* Este processo envolve a abertura do cronômetro e a interligação direta de um contador digital padrão ao oscilador controlado a cristal, da base-de-tempo do instrumento. Em princípio a relação entre a freqüência lida no contador e a freqüência esperada, normalmente 32768 Hz, reflete o erro relativo do cronômetro. O principal inconveniente desta técnica é que ela é invasiva, isto é, fere o princípio metrológico de manter o instrumento na sua condição original durante a calibração. A remoção da tampa e a inclusão de condutores elétricos conectados ao oscilador interno do cronômetro fatalmente produz alteração indeterminada no seu comportamento, invalidando qualquer resultado daí advindo.
  
- b) *Método do dedo elétrico.* Neste método um interruptor de pressão é instalado entre o dedo do operador e o botão de acionamento do disparo/travamento do cronômetro, sendo interligado a um contador chaveado externo. A conexão mecânica entre os dois interruptores garante que o lapso de tempo correspondente à diferença entre os instantes de acionamento do cronômetro e do contador seja pequeno, da ordem de alguns milésimos de segundo, o que sugere ser este um método quase ideal de calibração manual de cronômetros. Como método manual, porém, mantém o cronômetro sob calibração durante um intervalo de tempo relativamente longo, permanecendo o sistema padrão exclusivamente dedicado ao processo, o que aumenta o custo e inviabiliza a expansão da oferta de serviço.

c) *Método do acoplamento capacitivo.* Aqui o cronômetro é colocado sobre uma placa metálica que funciona como antena, cujo potencial elétrico tende a oscilar na mesma frequência que o oscilador elétrico do cronômetro. Como é débil a intensidade do campo oscilante associado a cronômetros este sistema exige uma gaiola de faraday e/ou circuitos ativos de filtro. Por este método, também, o operador do sistema tem que aceitar *a priori* a existência de um fator de divisão fixo que relaciona a frequência de oscilação do cristal com a indicação do cronômetro, além de supor arbitrariamente o seu valor, sem garantias de que esteja certo, exceto se estudar detalhadamente o circuito elétrico do instrumento ou usar concomitantemente um método óptico associado à indicação do mostrador.

### 3.3 – O relatório de calibração

Na calibração convencional um período determinado de tempo é usado como período de calibração, considerando a aplicação específica que o cliente dá àquele cronômetro, o princípio de funcionamento e as exigências do processo de calibração. Além das informações convencionalmente exigidas em um relatório de calibração, como os dados de identificação do cliente, do instrumento calibrado e do laboratório de calibração, o documento do LABELO-PUCRS dá ciência ao usuário sobre qual procedimento foi aplicado, quais as restrições ambientais aplicáveis, e fornece orientação sobre como interpretar e aplicar o resultado.

Se o cronômetro é analógico normalmente seu uso se restringe à medição de curtos intervalos de tempo, quase sempre menores que uma hora, devido ao seu grande erro proporcional e à limitação própria da sua fonte de movimento. Neste caso o período de medição usado na calibração pode coincidir com o do cliente ou ser um pouco maior, para garantir que o erro seja mensurável em operação manual. Nestes cronômetros o período amostral de calibração não pode ser muito diferente do período efetivamente usado pelo cliente porque com a redução da tensão na mola motora, que ocorre gradualmente com o movimento dos ponteiros, há uma notável alteração na taxa de erro. Desta forma a proximidade entre os períodos amostrais da calibração e os efetivamente utilizados garantem que o resultado fornecido ao cliente tem valor metrológico.

Para um cronômetro eletrônico não há preocupação com a fonte de energia, e períodos de calibração de 24 horas podem ser usados independentemente dos períodos normalmente medidos pelo cliente. Este incremento no período amostral é favorável porque minimiza a influência do operador em relação ao erro absoluto na indicação do cronômetro e não afeta negativamente o resultado da

---

calibração, porque neste tipo de instrumento a proporcionalidade entre o erro na indicação e o período medido é constante para todos os efeitos práticos.

Em qualquer caso o relatório de calibração informa ao cliente a constante de proporcionalidade entre o erro e o período amostral encontrada para o seu cronômetro, indicando ainda a incerteza sobre a determinação desta constante, além dos erros projetados para os períodos preferenciais informados pelo cliente e outros períodos possivelmente de interesse.

As medições que geram o relatório são feitas em número que depende do tipo de cronômetro calibrado. Para cronômetros eletrônicos cinco ciclos de 24 horas são suficientes, enquanto que para cronômetros mecânicos são usados doze ciclos curtos, de quinze minutos, ou oito ciclos de meia hora. O operador anota em uma planilha o instante planejado para o disparo e para a trava, conforme a indicação do relógio padrão, e ao final do ciclo anota também o erro observado na indicação do cronômetro. Para todos os efeitos práticos o erro do relógio padrão pode ser desconsiderado frente ao cronômetro, já que há uma relação mínima de  $10^5$  entre ambos.

A média dos erros encontrados nos vários ciclos de medição é assumida como o erro de indicação do cronômetro naquele período, sendo também calculado o erro relativo do cronômetro, dividindo o erro absoluto pelo período considerado. Este erro relativo é, na verdade, a constante de proporcionalidade característica do cronômetro, se eletrônico, ou característica do cronômetro e de um dado período de medição, se mecânico. O desvio padrão dos erros, multiplicado pelo coeficiente de Student correspondente ao grau de confiabilidade de 95% para aquele número de amostras é comparado à incerteza mínima autorizada para este tipo de calibração no LABELO-PUCRS, conforme credenciamento e lista de serviços do laboratório, que é de 0,5 segundo. O maior valor entre os dois é então assumido como a incerteza da calibração. Esta incerteza dividida pelo período calibrado resulta em uma incerteza relativa, indicada junto com a constante de proporcionalidade do cronômetro, permitindo ao usuário calcular o erro e avaliar a incerteza de medição para períodos diferentes dos calibrados.

### **3.4 – Balanço de incertezas**

Em uma calibração clássica a incerteza resultante da calibração de um cronômetro é devida fundamentalmente à operação humana. A estabilidade da base-de-tempo do relógio padrão é intrinsecamente não acessível ao operador humano, que somente tem acesso à indicação digital atualizada a cada segundo. O auxílio de um sinal sonoro sincronizado com a alteração do dígito dos

segundos no relógio padrão contribui para minimizar a influência do operador, que mesmo assim não cai abaixo de 0,2 segundos por operação, mesmo com pessoal treinado. Para uma visualização do conjunto de fontes de incerteza associados a uma calibração de cronômetro é fornecida abaixo uma relação destas fontes.

- a) Base-de-tempo padrão :  $2,2 \times 10^{-12}$  s/s, ou 8 ns em um ciclo de medição de 1 hora
- b) Base-de-tempo do cronômetro :  $1 \times 10^{-6}$  s/s, ou 4 ms em um ciclo de medição de 1 hora
- c) Acionamento humano : 500 ms em um ciclo de medição

### 3.5 – A variância como indicador de estabilidade em calibrações de cronômetros

Na medição de tempo e frequência as bases-de-tempo que servem de padrão de comparação não retêm (não podem reter) o valor verdadeiro convencional da grandeza, mas o geram continuamente. Esta geração simultânea inclui pelo menos duas bases-de-tempo que participam ativamente da manutenção da estabilidade, e o espectro de ruído de flutuação da variável de saída não pode ser corretamente modelado como sendo simplesmente uma seqüência de valores aleatórios e independentes, como seria pré-requisito para uma análise estatística baseada em uma distribuição normal.

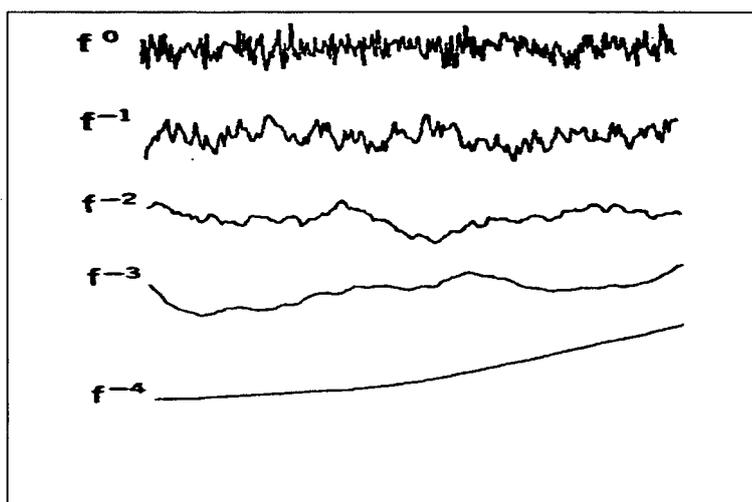
Muitas vezes a descrição do comportamento estatístico de períodos gerados por bases-de-tempo têm sido baseadas em distribuições não-normais, associados a flutuações periódicas repetitivas com uma banda de ruído, ou simplesmente supostos aleatórios por amostragem sistemática a ciclos não-periódicos. Esta última atitude não é rigorosamente correta quando aplicada à calibração de relógios atômicos, gerando incertezas mais altas do que se poderia obter pelo modelamento não-normal, nos casos onde é adotada. A adequação do procedimento de calibração à tecnologia envolvida obriga assim à adoção de períodos relativamente longos de comparação, da ordem de  $10^8$  ciclos da fonte para células usuais de rubídio, nos casos mais favoráveis, o que inviabiliza a multiplicação dos ciclos de amostragem.

A incerteza intrinsecamente acrescida a cada ciclo de calibração pelos sistemas de disparo e travamento dos contadores também aumenta com a multiplicação destes ciclos de medição, constituindo mais uma restrição à elevação do número de ciclos. Estes fatores apontam idealmente para a realização de apenas um único ciclo de calibração, ou um número pequeno deles, analisado segundo uma distribuição que considere o espectro real dos desvios encontrados.

Outra questão problemática associada à medição de tempo se relaciona aos graus de liberdade com que caracterizamos estatisticamente o resultado. Como há uma interligação entre valores sucessivos de leituras de intervalos de tempo não é rigorosamente correto atribuir a uma determinada estatística um número de graus de liberdade igual ao número de elementos da amostra, porém também não há como determinar de antemão o nível de dependência entre as leituras sucessivas.

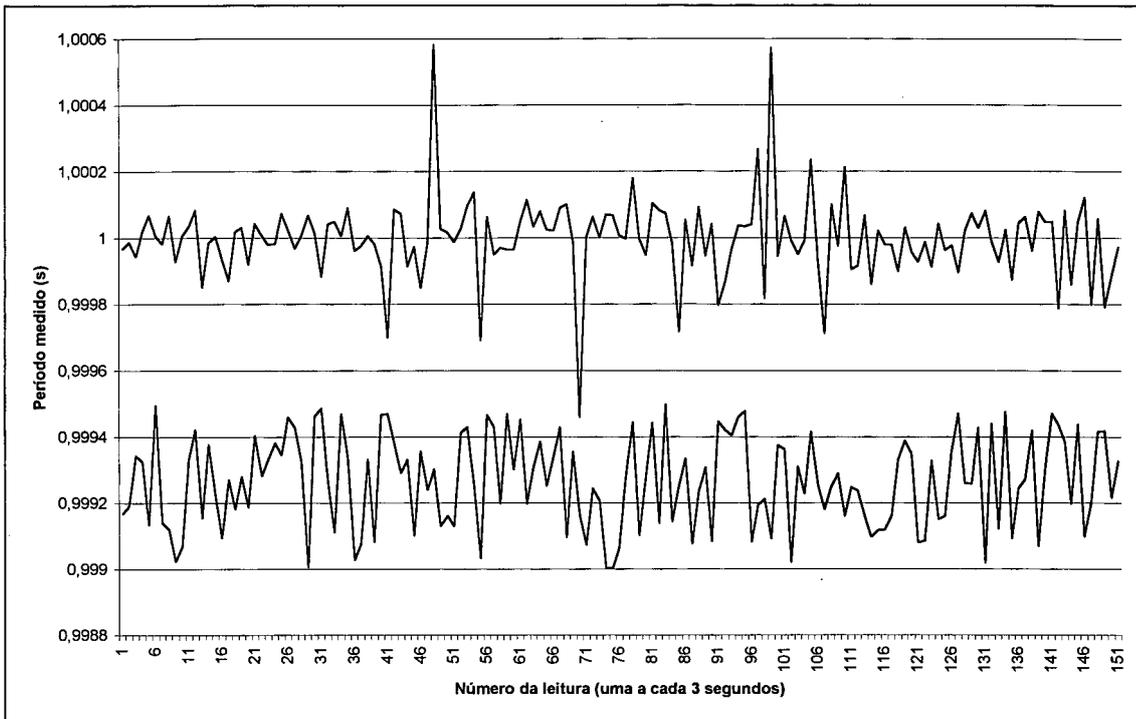
Na medição de tempo, séries de observações em seqüência não podem ser consideradas rigorosamente não-correlacionadas porque o espectro de desvios observados nestas medições inclui outras formas de ruído além do ruído branco característico da aleatoriedade. Longas séries de medições feitas pela intercomparação de bases-de-tempo padrão de hidrogênio, césio, rubídio e quartzo, mostram que seus comportamentos incluem desvios correlacionados não-randômicos sobrepostos ao ruído branco gerado no circuito do sistema de medição e no padrão, incluindo flutuações ambientais. Um modelo estatístico tradicional para caracterização de padrões de frequência é mostrado no anexo 10.

Para os relógios atômicos e a cristal estudados as variâncias convencionais relativas à flutuação da frequência em medições de longo termo divergem sem limites quando o tempo de observação é incrementado (Allan, 1987). Na verdade este não é um fenômeno isolado das bases-de-tempo mas ocorre em outras áreas da metrologia, especialmente quando relacionadas a padrões primários sob medição continuada, quando o ruído detectado nos desvios das medições deixa de ser o tradicional *branco* ( $f^0$ ) e passa a ser *flicker* ( $f^1$ ). Embora a causa física do ruído flicker não seja bem conhecida (Allan, 1981 e Lesage, 1979), van Putten (1992), estudando as fontes semicondutoras de ruído flicker, afirma que sua influência pode ser sentida em frequências abaixo de 1 kHz, estando o expoente associado ao espectro entre  $-0,8$  e  $-1,3$ . Na figura 3.2, retirada de Allan (1987), pode-se ver uma representação temporal destes ruídos.

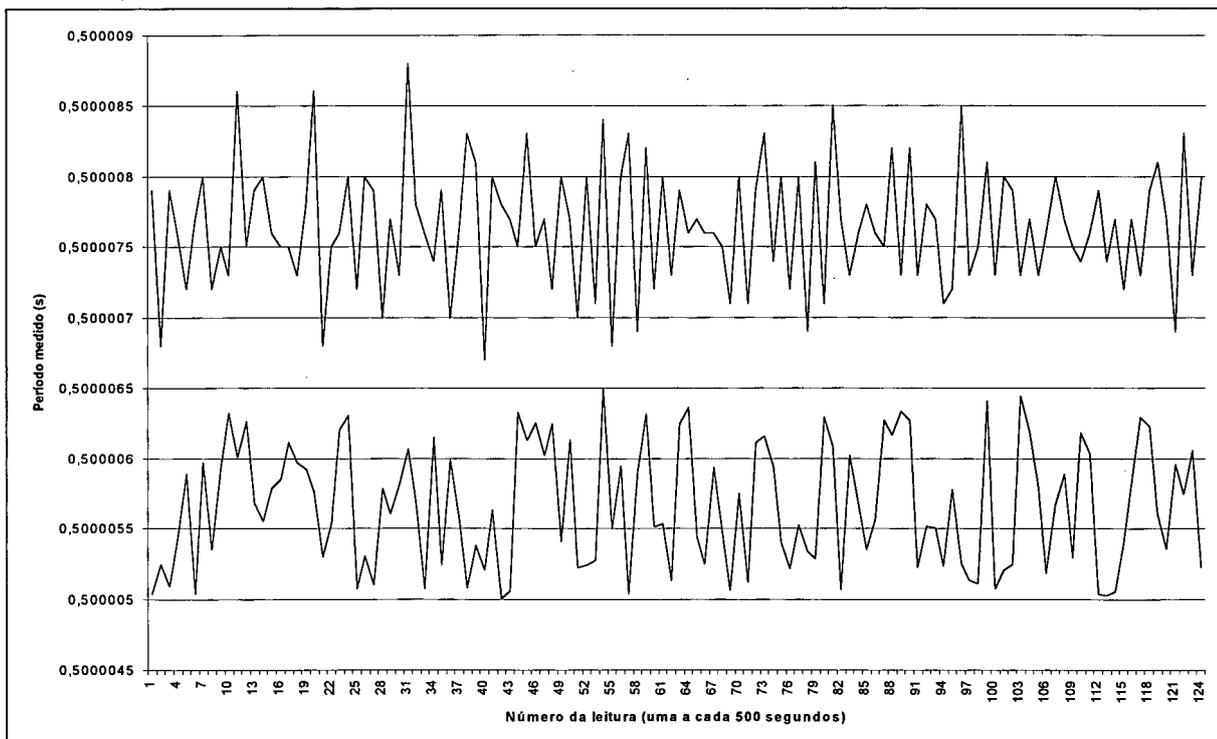


**Figura 3.2 - Espectros de ruídos gerados matematicamente (tensão no eixo vertical e tempo no eixo horizontal)**

Para determinar qual o tratamento estatístico aplicável à determinação da variabilidade das leituras derivadas da calibração óptica de cronômetros - se a variância convencional ou a variância Allan - foi realizado outro experimento, envolvendo diversas medições continuadas em cronômetros contra bases-de-tempo de rubídio e de quartzo. Nestas medições, quando o período amostral relativo a cada leitura era mantido na mesma ordem de grandeza da leitura, a distribuição dos valores indicados no contador tendia a ser não-normal, com flutuações periódicas de baixa frequência, identificadoras do ruído flicker, como mostrado na figura 3.3. Para períodos amostrais significativamente ampliados, até 2500 vezes o período medido, o comportamento das leituras se aproximava da normalidade, conforme mostrado na figura 3.4.



**Figura 3.3 – Dados de calibração de um cronômetro com período amostral semelhante ao período medido (curva superior) e ruído branco (curva inferior)**



**Figura 3.4 – Dados de calibração do mesmo cronômetro com período amostral significativamente superior ao período medido (curva superior) e ruído branco (curva inferior)**

Assim, como no caso apresentado no gráfico 3.3, para conjuntos de dados de calibração de relógios obtidos segundo uma ordem que inclui um período fixo de amostragem entre intervalos idênticos (uma série temporal), os pesquisadores Barnes e Allan, do N.B.S. (N.I.S.T.), demonstraram que a variância pode ser melhor estimada pela equação 3.1.

$$S_x^2(\tau) = \frac{1}{2} \left\langle (\Delta \bar{X})^2 \right\rangle \quad (\text{eq. 3.1})$$

Na equação 3.1 os símbolos  $\langle \rangle$  designam uma média infinita ;  $\Delta$  designa a primeira diferença finita entre medições adjacentes de tempo ;  $\tau$  designa o tempo de amostragem usado para cada medição ; e  $S_x^2(\tau)$  é chamada Variância Bi-amostral, Variância Pareada ou, simplesmente, Variância Allan.

Em medições de tempo, porém, incluindo calibrações, é usual um número reduzido de amostras não igualmente espaçadas, especialmente porque estas são obtidas manualmente e devem ser excepcionalmente grandes a fim de minimizar os erros introduzidos no acionamento. Nestes casos a variância tradicionalmente calculada para a amostra é válida como uma boa estimativa da variância global associada à medição porque a influência do tipo espectral de ruído dos desvios da base-de-tempo (flicker) é mínimo quando comparado a outras fontes de incerteza.

Esta ambigüidade no tratamento dos dados resultantes de calibração de cronômetros está associada também à distribuição de amplitudes quadráticas do ruído branco e do ruído flicker para baixas frequências, quando seus efeitos se superpõem. O gráfico mostrado na figura 3.5, retirado de Wilmshurst (1985), mostra esta superposição.

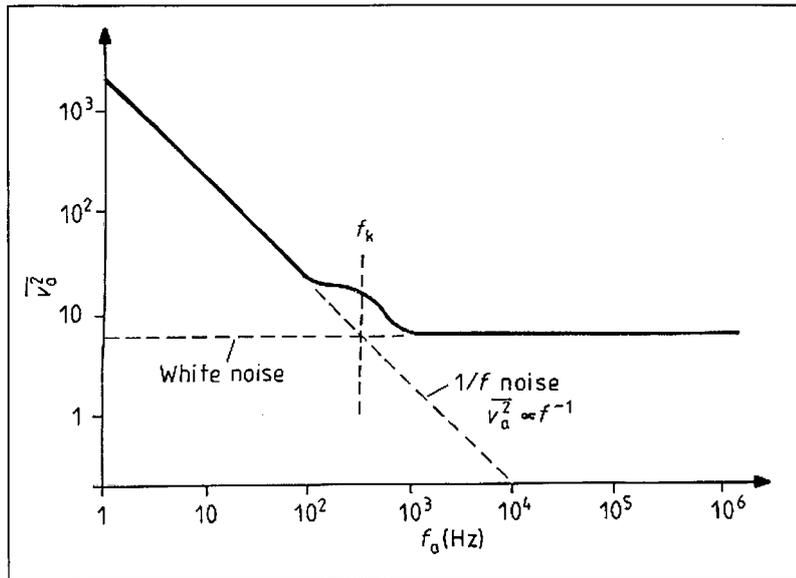


Figura 3.5 – Distribuição espectral típica do ruído em saídas de sinal elétrico

Em medições automatizadas, como no caso do sistema óptico para calibração de cronômetros, os intervalos de amostragem podem ser arbitrariamente reduzidos enquanto o número viável de medições pode ultrapassar  $10^3$  para um único ciclo de medição, fazendo com que o espectro dos desvios de frequência da base-de-tempo padrão apareça com uma contribuição nos desvios de período levantados, o que ocorre no gráfico mostrado na figura 3.3. Nestes casos a variância precisa considerar desvios locais em detrimento dos desvios em relação à média, sob pena de o estimador de desvio *não atingir convergência nem para um número infinito de medições* (Allan,1987). A Variância Allan, por outro lado, tende a um valor proporcional à média quadrática dos desvios locais, independentemente do número de amostras tomadas. Uma implementação operacional da Variância Allan é mostrada na equação 3.2, para n amostras da variável X, colhidas a intervalos regulares  $\tau$  de tempo.

$$S_X^2(\tau) = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (x_{i+1} - x_i)^2}{2(n-1)} \quad (\text{eq. 3.2})$$

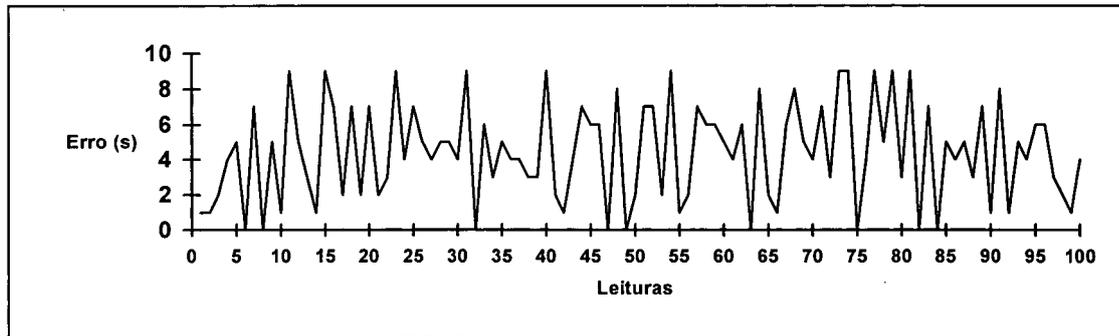
A incerteza calculada considerando a Variância Allan tende a ser menor que a obtida pela aplicação da variância tradicional sempre que o espectro dos desvios do conjunto de dados contenha muito ruído flicker, como o que caracteriza o conjunto de dados composto por um grande número de leituras sucessivas e igualmente espaçadas, nos limites das cadeias de rastreabilidade. Uma justificativa óbvia desta redução é o fato de que a Variância Allan desacopla a taxa de envelhecimento (*aging rate*) da base-de-tempo, que então pode ser corrigida como elemento da parcela sistemática,

contribuindo para uma avaliação mais realista da incerteza em calibrações de cronômetros, freqüencímetros e geradores de freqüência.

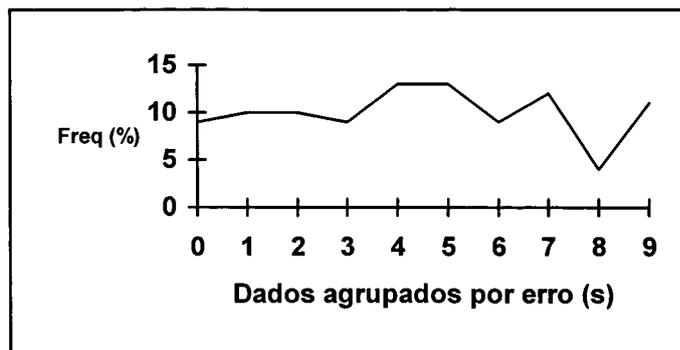
Duas situações experimentais comuns em laboratórios de tempo e freqüência são mostradas nas tabelas e gráficos a seguir. Na primeira um cronômetro é calibrado via disparo e travamento manuais contra um padrão de rubídio, em 100 ciclos de 24 horas, aperiodicamente. Os erros lidos pelo operador a cada ciclo, em segundos, são mostrados seqüencialmente em linha na tabela e num gráfico absoluto, além de outro gráfico de freqüência relativa. A média e a variância experimental, assim como a variância Allan, são calculados e indicados em seguida. Os valores numéricos foram diretamente obtidos via calibração manual de um cronômetro típico contra o padrão de tempo e freqüência da PUCRS.

**Tabela 3.1 - Dados de calibração manual de cronômetro**

Calibração Manual de Cronômetro									
Erro em segundos para amostragem aperiódica de 24h									
1	1	2	4	5	0	7	0	5	1
9	5	3	1	9	7	2	7	2	7
2	3	9	4	7	5	4	5	5	4
9	0	6	3	5	4	4	3	3	9
2	1	4	7	6	6	0	8	0	2
7	7	2	9	1	2	7	6	6	5
4	6	0	8	2	1	6	8	5	4
7	3	9	9	0	4	9	5	9	3
9	0	7	0	5	4	5	3	7	1
8	1	5	4	6	6	3	2	1	4



**Figura 3.6 - Gráfico de erro da tabela 3.1**



**Figura 3.7 - Gráfico de freqüências dos erros da figura 3.6**

Conforme os dados da tabela 3.1 temos :

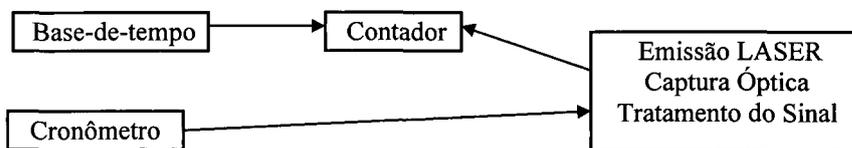
**média = 4,43 s**

**variância = 7,67 s<sup>2</sup>**

**variância Allan = 10,11 s<sup>2</sup>**

A variância Allan destes dados resulta em um valor maior do que a variância tradicional porque a distribuição dos erros se dá segundo um formato aproximadamente aleatório e independente, mesmo em se tratando de medição de tempo, conforme pode-se avaliar pelo formato do gráfico de frequência. Neste caso a aplicação do método usual de cálculo do desvio padrão é justificado em função da introdução de fontes externas de ruído aleatório cuja influência é fortemente sentida no resultado das medições, em cada ciclo. Esta fonte de ruído normalmente está associada à operação humana do sistema, embora não possa ser descartada falha no padrão ou no cronômetro sob calibração.

A segunda situação experimental estudada envolve também a calibração do mesmo cronômetro, embora agora de forma automatizada. Neste caso os ciclos de medição foram menores, porque a ausência de erro humano assim o permitiu, além de regularmente espaçados no tempo. Foram feitas 100 leituras, diretamente colhidas no contador através de sua porta de comunicação, em períodos de 1 segundo, através do protótipo do sistema óptico de calibração de cronômetros, conforme a figura 3.8. O gerenciamento por computador foi desabilitado e cada leitura foi simplesmente anotada em uma lista.

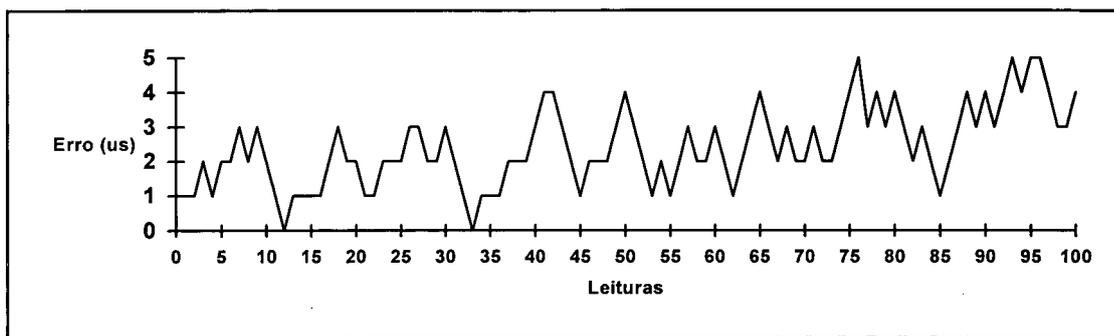


**Figura 3.8 - Diagrama em blocos da montagem para calibração automatizada de cronômetros**

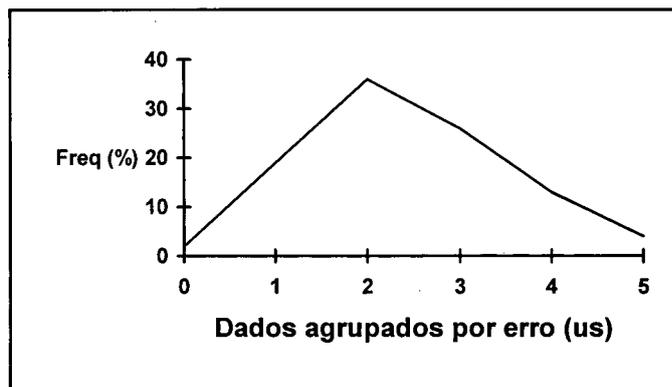
Novamente os dados tabulados são mostrados abaixo, com o respectivo gráfico absoluto e de frequência, seguidos da média, a variância tradicional e a variância Allan.

**Tabela 3.2 - Dados de calibração automatizada de cronômetros**

Calibração Automatizada de Cronômetro									
Erro em microssegundos para amostragem periódica de 1 segundo									
1	1	2	1	2	2	3	2	3	2
1	0	1	1	1	1	2	3	2	2
1	1	2	2	2	3	3	2	2	3
2	1	0	1	1	1	2	2	2	3
4	4	3	2	1	2	2	2	3	4
3	2	1	2	1	2	3	2	2	3
2	1	2	3	4	3	2	3	2	2
3	2	2	3	4	5	3	4	3	4
3	2	3	2	1	2	3	4	3	4
3	4	5	4	5	5	4	3	3	4



**Figura 3.9 – Gráfico de erro da tabela 3.2**



**Figura 3.10 - Gráfico de freqüências dos erros da figura 3.9**

Conforme os dados da tabela 3.2 temos ...

**média = 2,41  $\mu$ s**

**variância = 1,25 ( $\mu$ s)<sup>2</sup>**

**variância Allan = 0,39 ( $\mu$ s)<sup>2</sup>**

Neste caso fica evidente que não é recomendável assumir que os erros se distribuam normalmente em torno da média. Esta distribuição característica de bases-de-tempo se dá pela

---

influência da própria natureza dos padrões e precisa ser considerada quando se trabalha nos limites da cadeia de rastreabilidade, em tempo e frequência.

Em resumo, quando a calibração de cronômetros envolve medições caracterizadas por múltiplos e curtos períodos de amostragem a variância Allan representa mais adequadamente a dispersão das leituras, porque desacopla o envelhecimento da base de tempo, o desgaste da bateria do cronômetro, influências ambientais e outras flutuações de baixa frequência associadas à medição. Quando, porém, a calibração se dá com baixas taxas de amostragem, cada qual formada pela média de um número grande de leituras individuais, a distribuição das leituras tende à normalidade e o desvio padrão pode ser usado para caracterizar a dispersão.

Na prática, mesmo uma medição automatizada pode também ser feita com baixo número de amostras de grande tamanho, e este é exatamente o processo que foi aplicado aos protótipos do sistema óptico apesar das vantagens, em termos de redução de tempo de amostragem, que a medição múltipla de curtos períodos poderia trazer. O impedimento à minimização do tamanho da amostra se fundamenta no fato de que este processo exige a eliminação de qualquer *tempo morto* entre leituras, cuja influência potencialmente mascara o comportamento real da pulsação do segmento.

Embora não haja nenhum impedimento teórico à captura, em tempo real, dos períodos de 100% das pulsações de um determinado segmento do mostrador digital, uma característica técnica fundamental relacionada ao funcionamento dos contadores utilizados para implementação do Sistema Automatizado de Calibração Óptica de Cronômetros (*Sistema*) impede que a amostragem seja realizada desta forma. Na verdade, a cada *tempo* de leitura do contador ele deixa de medir o período correspondente a duas pulsações do sinal de entrada (figura 3.11, retirada de Stanford (1990)), e estas duas pulsações podem representar 2/3 do número total de pulsações daquele *tempo*. Como no caso da calibração automatizada de cronômetros a frequência de pulsação do segmento de captura é baixa, da ordem de 1 Hz, para minimizar o efeito destes dois pulsos perdidos a solução é ampliar ao máximo o *tempo* de amostragem de cada ciclo, que no caso é limitado a 500 segundos. Deste modo, para um cronômetro cujo segmento pulse a cada 0,2 s, apenas duas em 2500 pulsações serão desprezadas.

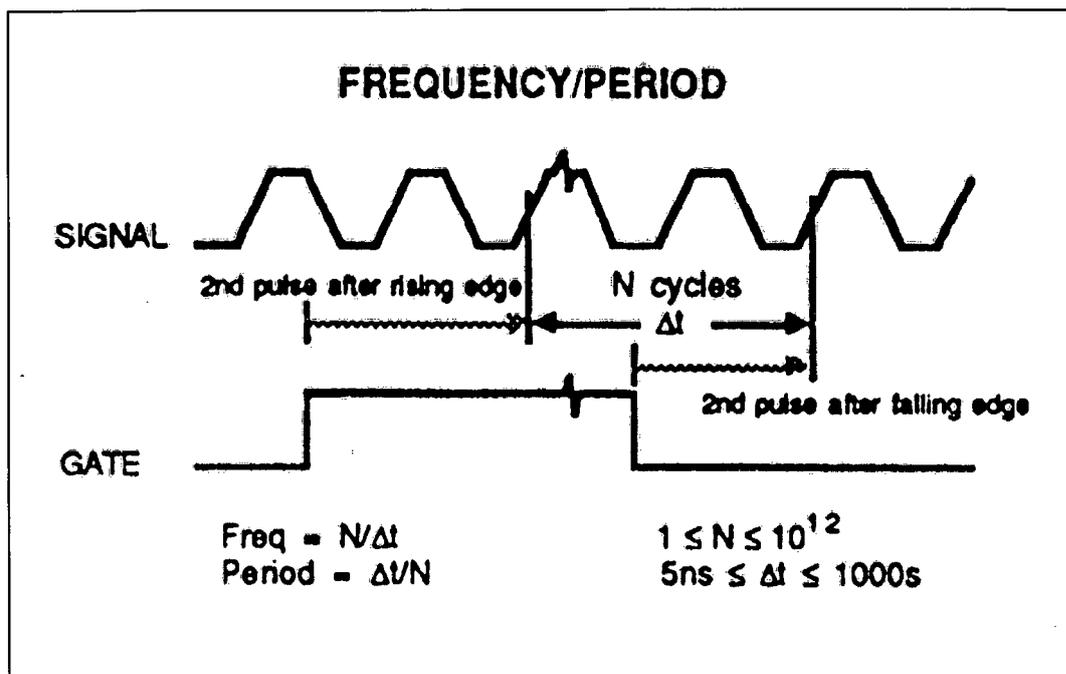


Figura 3.11 – *Tempo morto* na amostragem do contador SR620

De acordo, então, com a filosofia de funcionamento dos atuais protótipos do *Sistema*, o método adequado de cálculo de variância é o tradicional desvio padrão da média. Idealmente, um contador sem *tempo morto*, ou um sistema composto por três contadores sincronizados de tal forma que cada um medisse a pulsação correspondente ao *tempo morto* de um dos outros, permitiria a captura de todas as pulsações durante o intervalo de calibração, e neste caso o método adequado de cálculo de variância deveria considerar as inevitáveis instabilidades de baixa frequência, como o faz a variância Allan. Para todas as exigências da calibração de cronômetros no âmbito de laboratórios secundários, porém, o custo envolvido na alocação de três contadores digitais para um único sistema de calibração automatizada ainda é excessivo e, de certo modo, desnecessário. Tal sistema porém, pode ter aplicações interessantes num ambiente de pesquisa e desenvolvimento, ou se a demanda pelo serviço de calibração exigir velocidades ainda maiores.

Existem basicamente dois modos de medição de períodos através de contadores digitais, distintos em função dos pulsos de disparo e trava. Enquanto num deles os pulsos de disparo e trava são gerados seqüencial e internamente no contador, à revelia do sinal investigado, e o número de pulsos presentes na entrada durante o intervalo de tempo entre o disparo e a trava são contados diretamente, noutro é o sinal de entrada que é tomado como pulso de disparo e trava, entre os quais o número de ciclos da base-de-tempo interna do instrumento atualiza o contador.

Os modos descritos acima são similares, embora para medição de períodos longos a utilização da contagem direta da base-de-tempo pareça mais natural. Da mesma forma pode-se ter os *sinais de disparo e trava* introduzidos no contador por entradas específicas, denominadas *trigger input* diferentes das do sinal sob análise, conforme a fonte do sinal a medir ou as necessidades da medição.

A *resolução* de um contador genérico *convencional*, sem interpolação digitalizada, é assumida geralmente como sendo o inverso da frequência da base-de-tempo interna, o que no atual nível tecnológico limita a resolução em torno de *10 ns*.

Quanto à forma dos sinais de entrada pode-se diferenciá-los em duas categorias básicas : os *aperiódicos (transientes)* e os *periódicos (repetitivos)*, e para cada um deles o contador aplica um tratamento diferente. Enquanto um sinal periódico pode ser integrado no tempo, permitindo o cálculo de um período médio provavelmente mais próximo do período verdadeiro, os sinais de pulso único (transientes) devem ser completamente analisados em uma única operação, para que o contador possa fornecer, por exemplo, a largura do pulso. Outros conceitos básicos na medição de intervalos de tempo são o *intervalo mínimo*, o *tempo morto* e a *largura de pulso*, relativos a um sinal de entrada. O intervalo mínimo corresponde ao menor intervalo de tempo entre dois pulsos adjacentes que pode ser identificado pelo contador como distintos. O tempo morto é o período de tempo entre uma seqüência de amostragem e sua subsequente, durante o qual o sinal não é avaliado pelo contador. A largura de pulso se refere ao período máximo de um pulso único que o contador consegue integrar, e está relacionado à limitação dos módulos contadores internos e à frequência do *clock* interno.

Como a medição de períodos é bidimensional relativamente ao tempo e à amplitude do sinal, as fontes de erros são várias, como os controles e circuitos de chaveamento, o tipo de acoplamento selecionado sobre o intervalo de tempo sob medição, assim como a histerese destes sistemas. Pode-se otimizar a determinação de médias de períodos amostrados e a resolução do contador, através da utilização de circuitos sincronizados de disparo do chaveamento, assim obtendo as vantagens da média amostral. O *erro da resolução* é função da paridade de contagens, e é um erro digital, enquanto os *erros de chaveamento* são associados à incerteza na manutenção de um nível de tensão constante no comparador. O *erro da base-de-tempo* é o resultado relativo na medição de períodos gerado pela inconstância e desvio absoluto da frequência do *clock* do contador. Os *erros sistemáticos* são em geral apresentados pelo fabricante como equações matemáticas de várias entradas e sob a forma de gráficos, permitindo aplicação em situações específicas.

Através da *interpolação digital* aplicada à medição de períodos, pode-se incrementar artificialmente a resolução obtida nos equipamentos que o utilizam. Este processo consiste na interpolação de N pontos entre cada ciclo do relógio da base-de-tempo interna do contador, obtendo um produto em relação à frequência do sinal de entrada, e interrompendo a contagem quando ocorrer um zero. Este número de pulsos interpolados pode então ser contado e sua fração incorporada ao período sob medição.

Em aplicações mais críticas pode-se utilizar esta técnica de medida de intervalos de tempo que vem sendo usada nos amostradores dos osciloscópios de última geração, e em contadores digitais, *apresentando resolução de décimos de picossegundo e incertezas não maiores que 3 ps* para intervalos de tempo de dezenas de nanossegundos.

As fontes de incerteza de uma medida de tempo, como a largura de banda do amplificador/atenuador de entrada e sua linearidade, o jitter do sistema de chaveamento e principalmente dos pulsos da base-de-tempo usada são associadas às frequências das bases usuais, permitindo não mais que algumas centenas de quilohertz na taxa de amostragem, pois os sistemas aproveitam esta mesma frequência para resetar memórias e descarregar capacitores. A forma da onda pode ser assim registrada como uma seqüência de pontos no tempo, e pode ser reconstruída.

O *Erro do Período do Oscilador de Gatilhamento*, que é um fator de longo termo, isto é, um desvio do tempo médio de chaveamento, afeta a medida especialmente de períodos grandes, da ordem de nanossegundos, e se apresenta de forma linear. Como forma de minimização da influência desta fonte de incerteza podemos utilizar *padrões externos de frequência*. As fontes associadas ao gatilhamento são originados nos transientes que podem ser gerados quando ocorre o chaveamento. Estes são erros de curto termo, isto é, afetam apenas as primeiras dezenas de ciclos de chaveamento, assim *como o erro do controle de retardo de gatilhamento*, que pode ser razoavelmente bem determinado e corrigido.

De uma forma genérica os erros na medição de tempo são agrupados em uma única expressão que engloba o erro no período do oscilador e o erro do ajuste de retardo. Para curtos intervalos de tempo a medir a fonte preponderante de incerteza é o segmento de retardo e os erros de gatilhamento, enquanto que para períodos maiores a incerteza da base-de-tempo passa a ser crítica. Nas medições de períodos usuais de *4 ps podem ser garantidas por amostragem até 400 fs*, enquanto medições envolvendo até *90 ns apresentam incertezas de 3 ps* através do processo da interpolação digital.

## **Capítulo 4**

# **Padrões para medição do tempo**

## 4 – Padrões para medição do tempo

### 4.1 – Antecedentes históricos

Padrões para medição de intervalos de tempo são *naturais*, tanto na acepção antropológica da palavra, na medida em que *homens* elegeram fenômenos para servirem de referência na medição de intervalos de tempo, como também são *naturais* porque invariavelmente provêm da natureza mais básica à disposição da humanidade. O ciclo dos dias e noites, as fases da lua e a alternância das estações e das constelações foram as primeiras fontes de cadência que os homens puderam perceber como regulares, e portanto utilizáveis para a elaboração de calendários.

Medições precisas, entretanto, demonstraram que o movimento rotacional da terra reduz lentamente sua frequência a uma certa taxa, hoje atribuída ao movimento das marés, o que forçou os cientistas a adotarem, em 1956, o conceito de *ano tropical*, referenciando-o ao ano 1900, e definirem o *segundo* como a fração  $1 / 31\,556\,925,974\,7$  do mesmo (Mockler, 1972).

Com o desenvolvimento da pesquisa astronômica fora da faixa do espectro visível, há somente cinquenta anos, novas fontes periódicas foram descobertas e associadas à explosão de estrelas em supernovas, chamadas *pulsares*. Os pulsares são fontes periódicas poderosas de raios X mais estáveis que o melhor relógio não-atômico já fabricado (Sagan, 1992), e provavelmente são núcleos superdensos de extintas estrelas que explodiram em supernovas, no passado, e hoje rotacionam rapidamente, como faróis de navegação marítima.

Tão profundo foi o significado destes relógios naturais para a vida da humanidade que só na década de 1960 o *segundo* foi referenciado a um padrão não-astronômico, mas não menos natural, relacionado ao comportamento de certos gases ionizados e à periodicidade de ondas geradas pela emissão de átomos metálicos sob condições controladas. Mesmo assim o ano continua vinculado ao movimento da terra em torno do sol, e a geração de sinais periódicos a partir de bases atômicas é usada complementarmente para medir intervalos de tempo menores, usuais no dia-a-dia.

Os primeiros experimentos realizados com feixes atômicos ocorreram em 1911 nas pesquisas de A.L.Dunoyer, físico francês. Dunoyer construiu um sistema de vácuo composto por três câmaras em seqüência, uma delas contendo sódio aquecido, conforme a figura 4.1, retirada de Beehler (1965).

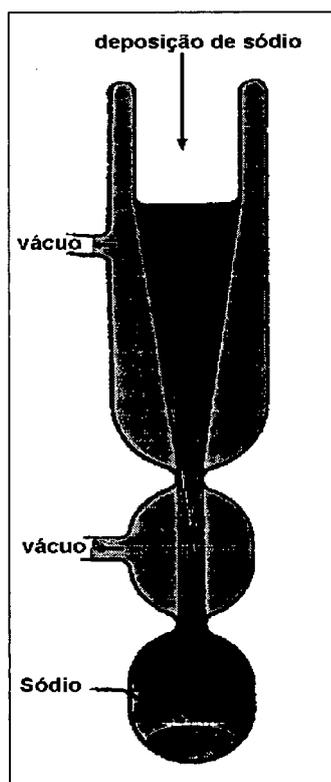


Figura 4.1 - Câmara de Dunoyer

Dunoyer percebeu uma deposição de sódio metálico na tampa superior do sistema de tubos evacuados, atribuindo corretamente este fenômeno à movimentação de átomos através da estreita passagem colimadora existente na câmara do meio. Para justificar a existência de um padrão de deposição na tampa, Dunoyer levantou a hipótese de que os átomos viajavam em linha reta.

Nove anos depois, na Universidade de Frankfurt, na Alemanha, outro físico, Otto Stern, começou a usar feixes moleculares para efetuar medições de velocidade de partículas. Neste experimento uma fonte de átomos de prata eram forçados à colimação sobre uma passagem estreita, sendo detectados por deposição sobre uma superfície. Fazendo parte do dispositivo girar em até 1500 rpm as linhas de deposição permaneciam finas e bem definidas, mas acima desta frequência as linhas começavam a ficar difusas. O pesquisador atribuiu este efeito às diferenças de velocidade de propagação dos átomos em torno de um valor médio, e pode assim calcular a velocidade de difusão de átomos de sódio em meio evacuado com uma diferença, em relação à previsão da teoria cinética dos gases, de poucos pontos percentuais.

Menos de dois anos depois da publicação das pesquisas de Stern, outro físico alemão, Walther Gerlach, realizou o famoso experimento *Stern-Gerlach*, que trouxe profundos avanços na pesquisa sobre feixes atômicos e também, principalmente, contribuiu decisivamente para o desenvolvimento da

mecânica quântica. Através deste experimento com feixes atômicos Gerlach descobriu que, ao contrário do que era aceito até então, havia uma quantização espacial relacionada ao momento magnético dos átomos sujeitos a campos magnéticos externos.

Até 1921 era idéia corrente que um grande grupamento de átomos gasosos, exposto a um determinado campo externo, deveria possuir uma distribuição randômica de ângulos de momento magnético em torno da direção preferencial definida pelo alinhamento imposto. Gerlach provou algo que em 1896 Pieter Zeeman, também alemão, intuía a partir de experimentos com linhas espectrais, isto é, havia um pequeno número de direções discretas, em relação ao campo externo, que os momentos magnéticos dos átomos gasosos podiam possuir. Seu experimento consistiu num feixe de átomos de prata colimado através de um estreito *gap* mantido sob intenso campo magnético espacialmente não-uniforme, e o resultado esperado era de que os átomos fossem emergir do colimador divergindo em distribuição espacial contínua, em todas as direções. Gerlach obteve, entretanto, dois feixes espaçados e divergentes, mostrando evidência experimental do spin do elétron, tendo somente duas orientações espaciais possíveis em relação ao campo magnético aplicado.

Em 1925 Samuel Goldsmith levantou a hipótese de que os elétrons possuem um momento angular intrínseco que denominou de spin, estando intimamente ligado ao momento magnético intrínseco do elétron. Este momento magnético é uma adição ao momento magnético do elétron, devido ao seu movimento orbital ao redor do núcleo. No caso do experimento de Stern-Gerlach o átomo de prata não possui momento orbital, mas todos os elétrons contribuem tal que a soma dá zero para o momento orbital.

Este efeito poderia ser explicado se fosse assumido que a energia dos átomos era quantizada, o que resultaria na observação de linhas espectrais discretas resultantes das transições entre diferentes estados de energia, definidas por frequências de emissão relacionadas à diferença de energia entre os dois níveis transicionais. A relação então intuída era a mesma de Planck,  $E_1 - E_2 = h\nu$ , ou seja, a frequência de emissão observada nas linhas espectrais era a diferença entre as energias da transição de estado dividida pela constante de Planck. Se os átomos pudessem possuir qualquer valor discreto de energia associada ao seu momento magnético não se veriam linhas espectrais distintas na emissão estimulada, mas sim uma única linha difusa, ou mancha.

Em 1932 Frisch e Segre (Alemanha) usaram um feixe atômico semelhante, com átomos de potássio, e eliminaram um dos dois feixes resultantes do experimento de Gerlach através de um primeiro magneto estrategicamente colocado. Um dos dois feixes resultantes foi bloqueado através de

um obstáculo, deixando passar somente o feixe com a polarização desejada, ou seja no estado energético desejado. Em seguida o feixe monopolarizado era forçado através de novo campo polarizador, idêntico ao primeiro, fazendo com que ocorresse uma nova separação, agora apenas dos átomos que haviam trocado de polarização, numa espécie de decaimento, durante o percurso entre os dois magnetos.

Os pesquisadores notaram que se no espaço entre os dois magnetos principais fosse colocado um campo magnético de transição, uma variação no ângulo magnético, havia uma alteração momentânea na quantidade de átomos percebida por um sensor colocado após o segundo magneto. Exatamente este fenômeno, apenas com a introdução de melhorias tecnológicas é usado hoje na produção de padrões de frequência de césio.

Em 1938, na Columbia University, I.I.Rabi, que foi aluno de Otto Stern, produziu o maior avanço até hoje nas técnicas de feixe atômico, desenvolvendo o método de ressonância magnética, que permite a detecção de transições bastante específicas nos átomos de um feixe, em um dispositivo quase igual ao desenvolvido na Alemanha. A diferença fundamental reside na substituição da transição magnética abrupta por um campo de radiofrequência de amplitude e direção apropriadas. Um desenho esquemático desta célula de Rabi aparece na figura 4.2, abaixo.

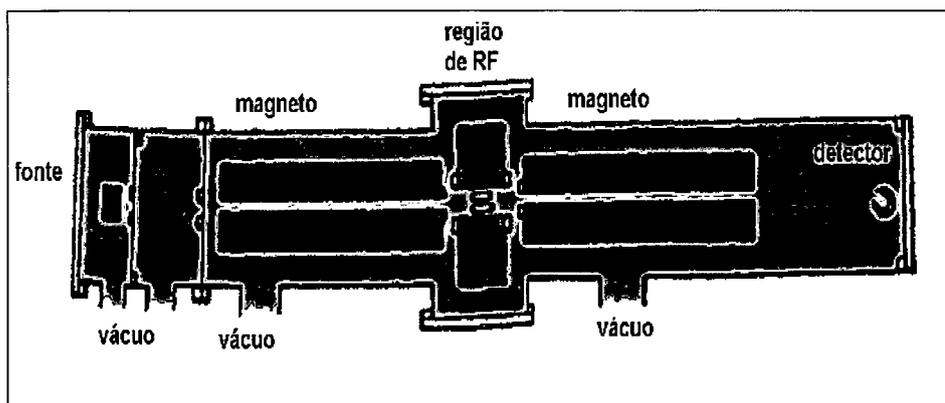


Figura 4.2 - Célula de Rabi (Beehler, 1965)

Outro ponto de diferenciação da célula de Rabi é a inversão do campo magnético de um dos magnetos com o objetivo de, na ausência de transições na região central da célula, fazer incidir os dois feixes (divididos pelo primeiro magneto) no detector. Quando um campo de RF apropriado é aplicado na região central, as transições específicas que produz fazem com que os feixes não atinjam o detector na totalidade, reduzindo seu nível de saída. O detector usado por Rabi tinha área ativa  $2,5 \mu\text{m}$  de diâmetro.

A primeira curva de ressonância publicada por Rabi em fevereiro de 1938 era semelhante à mostrada na figura 4.3, retirada de Beehler (1965), e relacionava a intensidade da corrente geradora do campo magnético com a intensidade relativa do feixe incidente no detetor, em uma célula de cloreto de lítio. Nas pesquisas posteriores Rabi determinou níveis de separação da estrutura hiperfina de muitos dos isótopos de lítio e potássio, com uma incerteza de apenas 0,005%.

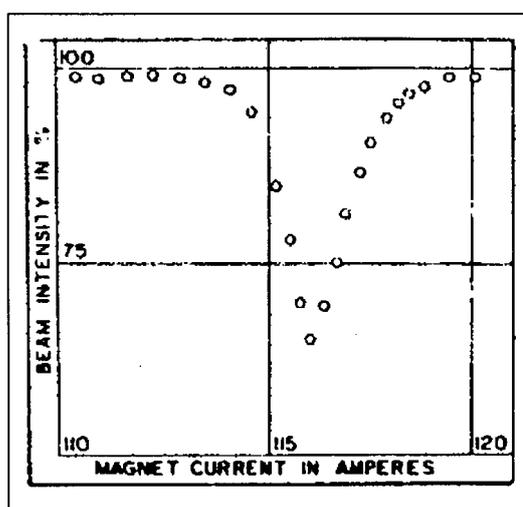


Figura 4.3 - Ressonância de Rabi

Juntamente com as pesquisas envolvendo feixes de átomos, os efeitos da radiação eletromagnética sobre gases excitados foi estudado na França e nos Estados Unidos, e culminaram em 1949, quando o professor F. Bitter, do Massachusetts Institute of Technology (MIT), descobriu que a frequência, a intensidade e a polarização de uma radiação óptica emitida por um átomo excitado são alteradas se este átomo for simultaneamente sujeito a um fraco campo de radiofrequência. A condição para que ocorresse a interação era de que a frequência do campo deveria coincidir com a frequência de ressonância dos níveis hiperfinos envolvidos na emissão da radiação luminosa. Juntamente com J. Brossel e A. Kastler, da Ecole Normale Supérieure, de Paris, Bitter analisou também os níveis hiperfinos do mercúrio.

Em 1956 H.G. Dehmelt, da Universidade de Washington, desenvolveu um método seguro e eficaz de detectar a ocorrência de transições atômicas em gases excitados por bombeamento óptico, através do uso de uma fotocélula. Na figura 4.4 é mostrado um esquema das transições por bombeamento óptico aplicadas por Dehmelt. Na condição descrita em *a* um certo número de átomos, sem ação externa, se encontra equitativamente distribuído nos estados fundamentais *A* e *B*, enquanto não há população em *C*, o primeiro estado excitado. Transições de *A* para *C* e *B* para *C* ocorrem

naturalmente sob influência de radiação dentro do espectro óptico. Transições de  $A$  para  $B$  e  $B$  para  $A$  ocorrem sob ação do espectro de radiofrequência.

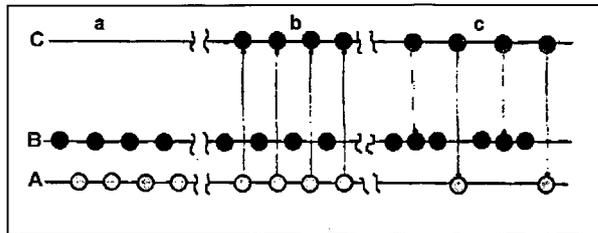


Figura 4.4 - Estágios do bombeamento óptico

Ainda na figura 4.4, se uma radiação luminosa de frequência adequada apenas para produzir transições de  $A$  para  $C$  for aplicada ao gás, a nova situação que se estabelece é descrita em  $b$ . Esta é, porém, uma situação energeticamente desequilibrada, e transições espontâneas tendem, em um curto intervalo de tempo, devolver os átomos excitados aos níveis  $A$  e  $B$ , com igual probabilidade. O resultado da continuidade da excitação com esta radiação luminosa é, por consequência, uma tendência ao esvaziamento do nível  $A$  em favor de um acúmulo de átomos no nível  $B$ . Este processo se chama *bombeamento óptico*.

Se sobre este sistema bombeado for introduzida uma onda eletromagnética na faixa de RF, de frequência adequada à transição  $A-B$ , átomos vão ser induzidos a transicionar de  $B$  para  $A$ , fazendo com que boa parte da radiação luminosa aplicada seja utilizada pelo gás para as novas excitações  $A-C$ . O resultado é uma redução na transparência do meio gasoso, na frequência da transição  $A-C$ , que pode ser detectada através de um filtro apropriado ou uma fotocélula sintonizada. Em condições ideais a redução da corrente sobre a fotocélula chega a 20% quando a frequência da onda eletromagnética aplicada entra em ressonância com a energia da transição  $A-B$ .

A partir destas considerações experimentais foi criado um sistema de realimentação nas células de bombeamento óptico, de tal forma que incrementos nas intensidades de corrente sobre as fotocélulas induziam correção da frequência do campo de RF aplicado. Desta forma a frequência gerada a partir de um sistema tradicional de oscilação forçada podia ser controlada entre limites estreitos, servindo como base-de-tempo padrão. Desenvolvimentos posteriores geraram células de bombeamento óptico de sódio, césio e rubídio, com a principal vantagem sobre os padrões de feixe atômico de serem compactas e leves.

Por volta de 1958 P. Bender, do National Bureau of Standards, juntamente com dois colegas, um também do N.B.S. (N.I.S.T.) e outro do Naval Research Laboratory, desenvolveram uma célula

prática de gás de césio, utilizando a mesma transição hiperfina usada nos dispositivos de feixes atômicos. A radiação óptica para o bombeamento foi obtida de uma lâmpada de descarga em argônio e o campo magnético usado foi de 0,5T sob o gás de césio. Por volta da mesma época o elemento rubídio foi usado por T. Carver, na Universidade de Princeton, quem primeiro detectou a absorção das microondas injetadas por intermédio da variação do índice de transmissão de luz do meio gasoso. Tomando conhecimento das pesquisas de Carver, Bender criou a filtragem por lentes especiais, até hoje usada nas bases-de-tempo a rubídio.

Células de rubídio usadas como bases-de-tempo tem sérias limitações quando comparadas com sistemas à feixe atômico de césio. Beehler (1965) afirma que a frequência de ressonância destas fontes depende do tipo e da pressão do gás excitado, da temperatura do gás na célula e da intensidade da luz utilizada no bombeamento. Fabricantes atuais de células de rubídio, entretanto, indicam seu uso como padrão secundário de frequência, garantindo flutuações menores que  $1 \times 10^{-11}$  por trinta dias. Por outro lado a frequência da célula depende de fatores não absolutamente controláveis no processo de manufatura, obrigando a uma calibração inicial contra um padrão de césio, feita na própria fábrica, e ainda mantendo o custo final do sistema em cerca de 20% de um padrão de césio.

À mesma época do desenvolvimento das células de bombeamento óptico, um acidente afortunado acontecido nos laboratórios de A. Kastler gerou um novo impulso no desenvolvimento de células para bases-de-tempo e frequência. A eficiência do bombeamento óptico foi significativamente incrementada, para surpresa dos pesquisadores associados a Kastler, quando um pouco de hidrogênio foi introduzido no lugar do vácuo, em uma célula de sódio, em virtude de uma falha no sistema de evacuação forçada. Passado o espanto eles deduziram que a presença dos átomos estranhos à célula agia como amplificador porque produzia colisões atômicas desorientadas que modificavam o equilíbrio energético da mistura de gases, incrementando o tempo médio de difusão em até 1000X.

O princípio do desenvolvimento dos MASERS ocorreu em 1953, inicialmente usando amônia, por C.H.Townes na Universidade de Columbia. Neste sistema um feixe colimado de moléculas de amônia (NH<sub>3</sub>) é forçado através de um campo elétrico não-uniforme, que as separa conforme seus dois estados possíveis de energia. Como o campo impulsiona as moléculas em direções diferentes conforme seus estados de energia, o grupo das que têm spin positivo são forçadas para dentro de uma cavidade ressonante cilíndrica de alto índice Q, sintonizada na frequência de inversão de transição da amônia, em 23,87 GHz. Se o processo atinge uma certa intensidade mínima suficiente para compensar as perdas, um sinal de frequência equivalente pode ser retirado da cavidade ressonante e usado como referência.

Apesar da natureza molecular da ressonância dos MASERS de amônia, há uma forte dependência da frequência de saída da célula com as dimensões da cavidade ressonante, o que limita bastante a aplicabilidade destes dispositivos como padrão de tempo e frequência. MASERS de hidrogênio, por outro lado, têm sido comparados em desempenho e confiabilidade aos padrões de césio.

O próprio Ramsey (1965), que aperfeiçoou o dispositivo de Rabi em 1957, esteve ativamente envolvido com a pesquisa dos MASERS de hidrogênio, na Universidade de Harvard. Conforme ele, átomos de hidrogênio excitados até sua mais alta estrutura hiperfina podem ser focalizados em uma abertura de um bulbo de quartzo coberto com teflon, ficando retidos nesta estrutura por períodos de tempo da ordem de 1 segundo. Se este bulbo for rodeado por uma cavidade cilíndrica ressonante na faixa de rádio-frequência da transição hiperfina do hidrogênio uma radiação MASER a 1 420 405 751,800 Hz será gerada (327 384 352,5 Hz para o deutério), podendo ser usada como padrão de tempo e frequência atingindo incertezas de até  $3 \times 10^{-13}$ , conforme apontaram as pesquisas de H. Hellwig e E. Pannaci (1967).

#### 4.2 – Ressonância atômica

Alguns tipos de átomos, especialmente de metais alcalinos, geram intensas linhas espectrais facilmente detectáveis por processos conhecidos pelo nome de *análise espectral*. Por estes processos é possível determinar a presença de qualquer elemento químico em uma substância simples ou composta, já que o espectro de emissão (por aquecimento ou ionização) de cada material é resultado da constituição eletrônica do átomo que o compõe, uma espécie de *assinatura*. Este espectro de emissão consiste na radiação de *decaimento* de átomos excitados, ou seja, consiste na emissão de fótons com energia (leia-se comprimento de onda) correspondente à diferença energética de transição de nível do elétron excitado, ao decair.

Dito de outra forma, a energia absorvida por um elétron de um certo nível orbital, em um certo átomo, para passar daquela para uma órbita superior, é devolvida ao meio sob a forma de um fóton quando o elétron excitado retorna à sua órbita de origem, o que costuma ocorrer naturalmente após um pequeno intervalo de tempo, denominado *tempo de recuperação*, estatisticamente bem definido para cada situação. O fóton emitido neste decaimento tem energia (e comprimento de onda) sempre constante, igual à diferença entre os níveis de transição. A energia fornecida para a excitação, por outro lado, que pode ser simplesmente térmica, ou elétrica, não precisa ser dosada cuidadosamente, já

---

que os elétrons absorvem quantidades de energia em degraus, isto é *quantizadamente*, rejeitando o excesso desde que não seja atingido o limite acima do qual o elétron se desprenda totalmente de seu átomo de origem.

Quando a transição ocorre, por exemplo, entre dois níveis hiperfinos do átomo de césio, o fóton emitido tem comprimento de onda que pode ser irradiado coerentemente através de radiadores disponíveis para microondas, na casa dos 3 cm. Baseado neste princípio operam desde o início da década de 1960, em vários lugares do mundo, relógios padrão de césio ou padrões de frequência baseados no césio. No Brasil o primeiro relógio de césio totalmente construído localmente data de setembro de 1996, isto é, tem poucos anos de vida, e foi produto de esforço cooperativo levado a cabo na USP, em São Paulo, embora o uso de padrões de césio importados seja generalizado.

A frequência associada à transição do césio pode ser medida em termos do período de uma *efeméride*, isto é, do segundo baseado no ano tropical, obtido através de observações astronômicas com incertezas próximas a  $10^{-9}$ s, para medições de curto termo, até  $10^{-12}$ s em medições mais precisas e intercomparações. A frequência definida para a célula ressonante de um relógio padrão de césio é 9 192 631 770,0 Hz.

A transição quântica atualmente empregada nos padrões de césio ocorre entre níveis hiperfinos do estado fundamental do metal, cujos elétrons são excitados pela interação entre o momento magnético do núcleo e o campo magnético produzido pelo movimento orbital e spin do seu elétron de valência, representados na figura 4.5. Padrões de césio com excitação (bombeamento) a LASER, em oposição ao tradicional bombeamento magnético, estão atualmente em desenvolvimento e apresentam performance acentuadamente melhor porque sintonizam mais agudamente a transição hiperfina (Gibble,1992).

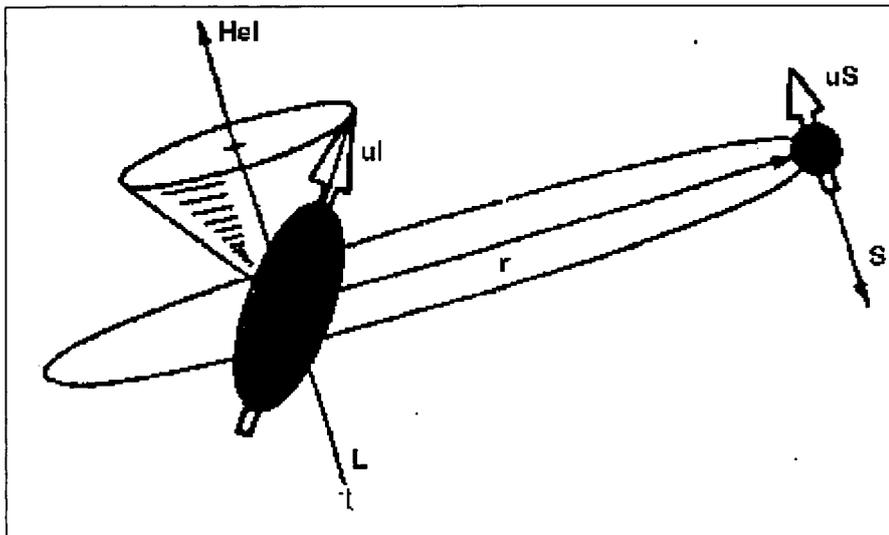


Figura 4.5 - Interação elétron-núcleo no átomo de césio (Mockler, 1965)

Na figura 4.5  $Hel$  é o campo magnético causado pelo movimento orbital e pelo spin do elétron na região do núcleo,  $uI$  é o momento do dipolo magnético do núcleo,  $L$  é o momento angular orbital do elétron,  $uS$  é o momento do dipolo magnético do elétron,  $S$  é spin do elétron e  $r$  é o vetor posição do elétron em relação ao núcleo. O campo magnético gerado pelo núcleo na região do elétron interage com seu momento magnético, como segue ...

$$\vec{u}_s = -2u_0 S \quad (\text{eq. 4.1})$$

onde  $u_0$  é conhecido como o *magneton de Bohr* e é calculado por ...

$$u_0 = e \cdot \hbar \frac{1}{2 \cdot m \cdot c} \quad (\text{eq. 4.2})$$

Onde

$e$  é a carga do elétron,  $1,6 \times 10^{-19}$  C

$\hbar$  cortado é a constante de Planck  $6,626 \times 10^{-34}$  J.s dividida por  $2 \cdot \pi$

$m$  é a massa do elétron, e

$c$  é a velocidade da luz,  $3 \times 10^8$  m/s

Assim, aplicando a lei de Biot-Savart do eletromagnetismo clássico, a ação do núcleo sobre o elétron pode ser calculado por...

$$H = \frac{2u_0}{r^3} \left[ S - \frac{3r(r \cdot S)}{r^2} \right] \quad (\text{eq. 4.3})$$

Esta interação se associa ao movimento de precessão dos eixos  $L$  e  $S$ , semelhantemente como a precessão terrestre dos equinócios, de forma que podemos supor uma grandeza instantânea  $J = L + S$  interagindo com  $I$ , o momento angular do núcleo, conforme a figura 4.6, retirada de Mockler (1965).

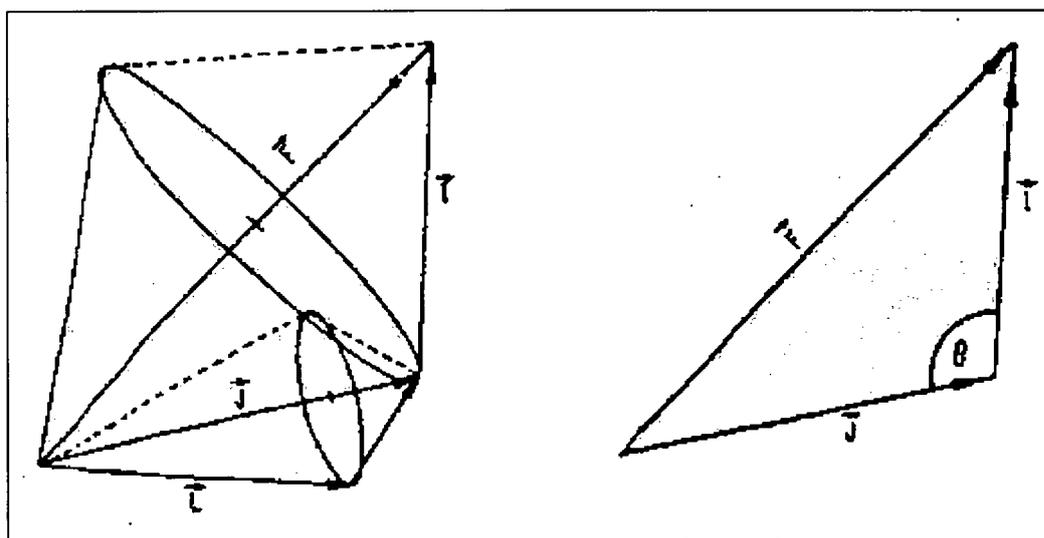


Figura 4.6 - Modelo vetorial das interações elétron-núcleo

Na figura 4.6  $F$  é o momento angular total do átomo, enquanto  $L$  e  $S$  mantêm um movimento rápido de precessão sobre o eixo de  $J$ , causado pela interação spin-orbital núcleo-elétron.  $J$  e  $I$  estão magneticamente acoplados, formando um ângulo  $\theta$  entre si e girando sobre  $F$  lentamente. O ângulo  $\theta$  pode ser calculado facilmente pela lei dos cossenos, da trigonometria.

Finalmente, a interação da estrutura hiperfina núcleo-elétron pode ser expressa pela relação

$$W = aI \cdot J \quad (\text{eq. 4.4})$$

Onde

$W$  é a energia da interação da estrutura hiperfina,

$I \cdot J$  é o produto escalar do momento angular do núcleo com sua soma com o do elétron,

$a$  é uma constante para uma dada interação elétron-núcleo, calculada por ...

$$a = \frac{2\pi\hbar R_y \alpha^2 (m/M) g_I Z^3}{J(J+1)(L + \frac{1}{2})n^3} \quad (\text{eq. 4.5})$$

Onde

$R_y$  é a constante de Rydberg  $1,097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$

$\alpha$  é  $2\pi e^2 / (hc)$

$M$  é a massa do núcleo do átomo,

$g_I$  é o fator G nuclear,

$Z$  é a carga elétrica do núcleo, e

$n$  é o número quântico principal da partícula girante

Pela forma de produto escalar da relação que descreve a interação da estrutura hiperfina pode-se deduzir que existem muitos níveis hiperfinos F, designados pelos antecedentes e consequentes inteiros de  $I + J$ . Na verdade existem  $2J+1$  ou  $2I+1$  níveis F. Para um átomo de hidrogênio, como exemplo, no seu estado fundamental,  $L=0$ ,  $j=1/2$ ,  $g_I=5,56$  e  $I=1/2$ , F atinge apenas dois valores possíveis,  $F=0$  e  $F=1$ , fazendo com que W aponte para 1417 MHz através da relação de Planck ( $E=hf$ ). Medições feitas com o objetivo de confirmar as previsões teóricas obtiveram 1420 MHz, com uma incerteza 0,00005%.

Quando a energia da interação entre o momento nuclear com o momento angular do elétron é muito maior que a interação com um campo externo, o campo externo é considerado fraco e a interação é conhecida como Efeito Zeeman da estrutura hiperfina. Campos normalmente usados em padrões de frequência são pequenos o suficiente para produzirem efeitos apenas de quarta ordem na frequência de emissão da transição de  $F=3$  e  $F=4$ . Na figura 4.7, retirada de Beehler (1965), vemos a influência de campos fracos.

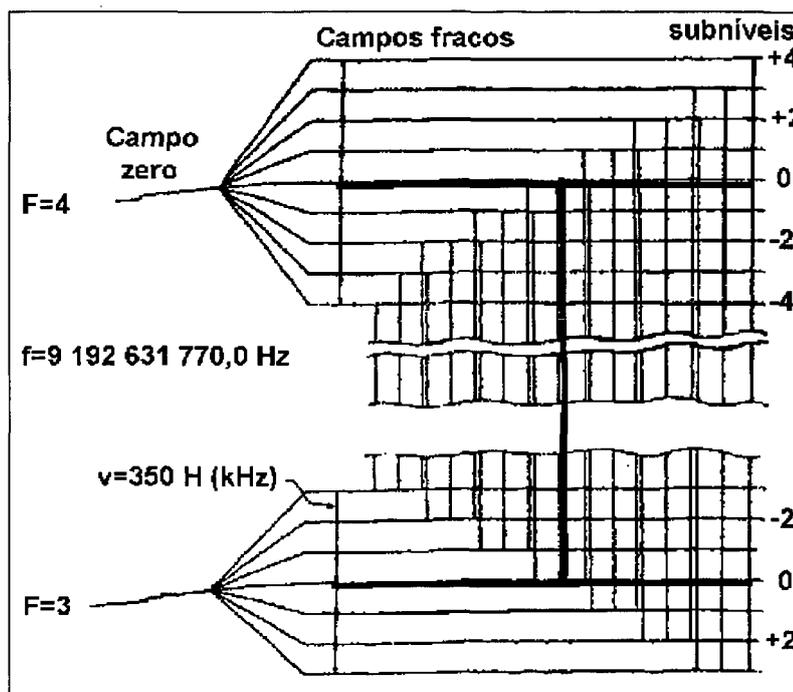


Figura 4.7 - Diagramas de níveis de energia do césio 133

O Efeito Zeeman foi descoberto em 1896 quando o pesquisador de mesmo nome submeteu átomos a campos magnéticos externos suficientemente fortes para excitá-los, observando que as linhas espectrais emitidas no processo de desexcitação se separavam em várias componentes (Resnick, 1994). As linhas espectrais mantinham uma separação que era proporcional ao campo aplicado até o limite de alguns décimos de tesla de intensidade de campo magnético, havendo uma espécie de saturação após este patamar.

Como há uma favorabilidade prática na obtenção de estados fundamentais de átomos de césio na natureza, e a transição menos sensível a campos externos é justamente esta ( $F=4, m_f=0 \Rightarrow F=3, m_f=0$ ), é a escolhida para padrões de frequência. Neste caso a flutuação de frequência em função de campos fracos externos é extraída da fórmula de Breit-Rabi ...

$$\nu = \nu_0 + 427.18H^2 - 9.93.10^{-6} H^4 \quad (\text{eq. 4.6})$$

Onde

$\nu$  é a frequência de emissão da transição, em Hz,

$\nu_0$  é a frequência fundamental associada à energia da transição, e

$H$  é o campo fraco, em T

### 4.3 – Célula de césio

#### 4.3.1 – Princípio de operação

A medição das frequências de separação entre níveis de transição em átomos pode ser feita através de técnicas genericamente chamadas de *feixe atômico*. Os espectrômetros de feixe atômico usados em experimentos de ressonância consistem basicamente de um canhão de partículas, neste caso átomos do metal alcalino césio 133, forçadas a atravessar campos magnéticos de deflexão e um colimador, sendo após detectadas num sensor apropriado. Na figura 4.8 vemos um diagrama esquemático de um espectrômetro de feixe atômico.

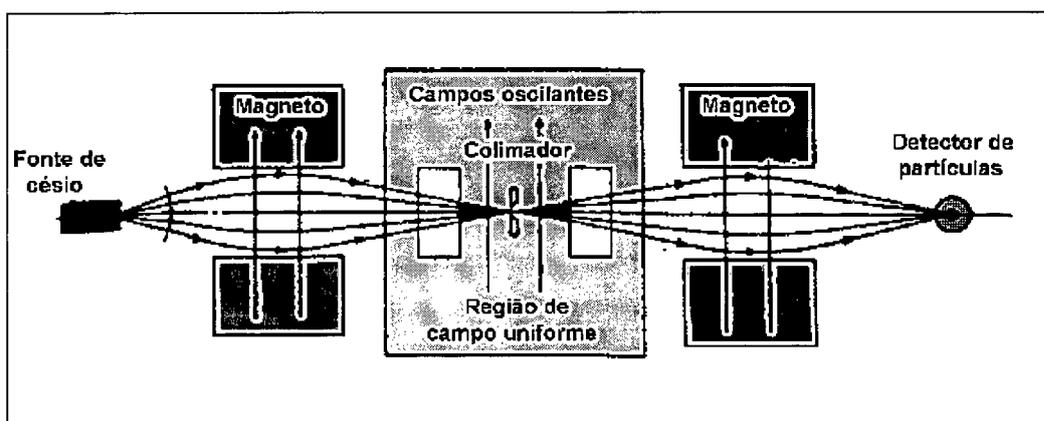


Figura 4.8 - Espectrômetro de feixe atômico (Mockler, 1965)

Átomos neutros de césio 133, emitidos naturalmente da fonte à esquerda da figura 4.8, passam inicialmente por um campo magnético não uniforme que deflexiona o feixe. Como o átomo está no estado fundamental a origem de sua deflexão magnética está na interação do campo externo com o momento de seu dipolo magnético, cuja magnitude depende, por sua vez, do estado quântico, ou momento angular total. Embora o césio possa emitir átomos em dezesseis estados diferentes, todos os átomos que forem lançados da fonte vão ter spin nuclear  $+7/2$  ou  $-7/2$ , estão dentro de uma *janela* angular definida (mostrada na figura 4.8 como a divergência do feixe de saída), e têm velocidade em torno de 2300 m/s (a 150°C), vão percorrer as trajetórias mostradas. Os que possuírem spin *up* em relação ao sistema de coordenadas do magneto vão ser deflexionados para baixo pelo campo, iniciando a trajetória por caminhos descritos pelas curvas acima do eixo fonte-detector, enquanto os que tiverem spin *down* vão ser deflexionados para cima através de caminhos abaixo do eixo. Estes átomos terão spins opostos, isto é, momentos magnéticos opostos, vão cruzar no colimador, invertendo seus caminhos, sendo novamente deflexionados no campo defletor 2 e indo, por fim,

---

colidir com o detetor, que produzirá um sinal proporcional ao número de partículas que incidem em sua superfície numa unidade de tempo, ou seja, à taxa de incidência.

Se agora for aplicado ao feixe um campo oscilante, em porções da trajetória coincidentes com a do colimador, com frequência próxima a  $427H^2$  Hz, onde  $H$  é a magnitude do campo imposto, ocorrerá uma transição  $(F=4, mf=0) \Rightarrow (F=3, mf=0)$ , isto é, os momentos magnéticos dos átomos serão alterados. Átomos no estado *up* serão induzidos a emitir um fóton de frequência  $\nu = \nu_0 + 427H^2$  Hz, onde  $\nu_0$  é a frequência fundamental de emissão, e átomos *down* vão absorver o mesmo *quantum* de energia, com uma certa probabilidade. Isto equivale a uma inversão nos momentos magnéticos dos átomos que transicionaram.

Agora, como estes átomos têm momentos invertidos em relação a sua característica original, vão reagir em oposição ao esperado quando atravessarem o campo magnético defletor mais à direita na figura. Estes átomos não mais atingirão o detetor porque serão arremessados para fora da trajetória original, reduzindo o sinal proporcional gerado no processo de detecção. Desta forma pode-se instalar um laço de realimentação que ajuste a frequência do campo oscilante para minimizar a detecção, e assim poderemos garantir que a frequência aplicada é exatamente igual a que está associada com a transição  $(F=4, mf=0) \Rightarrow (F=3, mf=0)$  do césio.

A figura 4.9, obtida em Mockler (1965), mostra distribuição experimental relativa na taxa de átomos de césio que atingem o detetor conforme sua posição em um eixo vertical  $Y$ , cujo *zero* coincide exatamente com a perpendicular ao plano de emissão.  $S$  é uma grandeza proporcional à diferença entre as aberturas do feixe na fonte e após o colimador, enquanto a variável de passo  $a$  é a abertura do colimador...

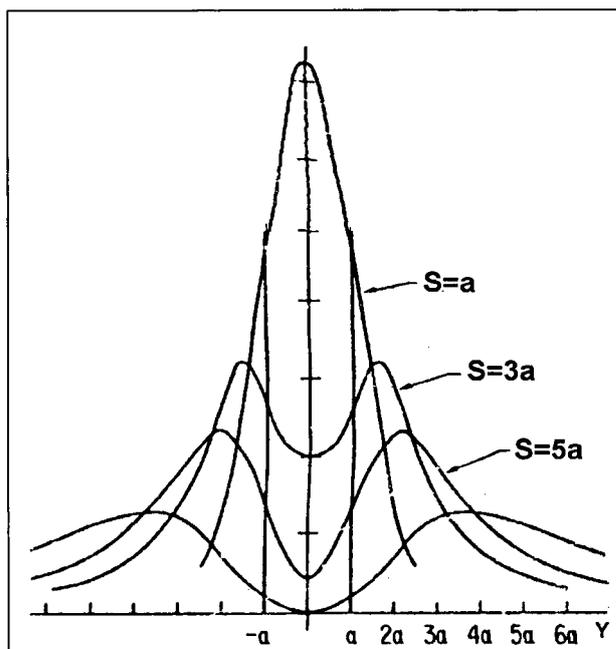


Figura 4.9 - Intensidades do feixe em função de Y e S

Uma condição normal para um padrão de 268 cm entre fonte e detector seria temperatura  $150^{\circ}\text{C}$ , pressão de vapor de césio  $0,67\text{ Pa}$ , concentração de césio  $10^{20}\text{ átomos/m}^3$  e aberturas da fonte e colimador  $38\text{ }\mu\text{m}$ . Nestas condições um valor próximo a  $8 \times 10^7$  átomos de césio colidem contra o detector a cada segundo, sendo que somente  $1/16$  deste número pertence a cada estado possível, ou seja, apenas  $1/8$  do total são  $F=4$  ou  $F=3$ , o que para um detector com eficiência de ionização próxima a 100% significa uma corrente gerada da ordem de  $10 \times 10^{-12}\text{ A}$ .

Como as velocidades de emissão do césio se distribuem segundo uma curva maxweliana, átomos muito velozes são esperados no feixe, fazendo com que campos muito intensos sejam necessários para que ocorra a transição ( $F=4, m_f=0$ )  $\Rightarrow$  ( $F=3, m_f=0$ ). A fim de manter a necessidade de campo magnético limitada a valores razoáveis ( $0,01\text{ T}$  a  $0,1\text{ T}$ ) átomos muito velozes precisam ser freados ou impedidos de colidir com o detector, o que é feito através de uma barreira colocada após a colimação, conforme a figura 4.10.

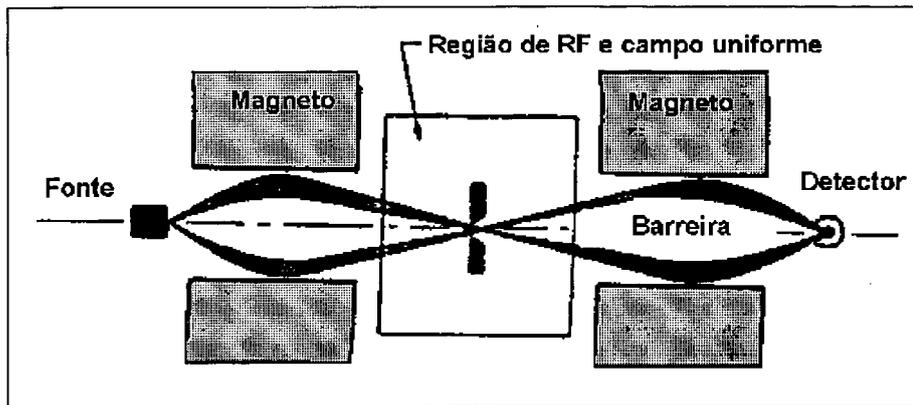


Figura 4.10 - Eliminação de átomos rápidos por barreira (Mockler, 1965)

#### 4.3.2 – Emissão e detecção dos feixes atômicos

O processo de expulsão de átomos por uma fonte é semelhante à emissão termo-iônica que ocorre em tubos de imagem ou tubos de raios X, exceto pelo fato de que nos feixes atômicos, com a expulsão de elétrons energéticos, os átomos ionizados da superfície metálica são também retirados. Para que este processo ocorra, é necessário que o nível de energia dos elétrons excitáveis (energia de ionização) coincida, em limites muito estreitos, com a energia associada às vacâncias do metal (função trabalho), como ocorre no caso do céσιο.

Por outro lado, se a energia de ionização é menor que a *função trabalho* do átomo do metal não haverá impedimento absoluto de que ocorram emissões de átomos, mas eles tenderão a ser reabsorvidos logo após a emissão, num processo denominado *condensação*. O céσιο tem energia de ionização (3,87 eV) consideravelmente menor que o tungstênio (4,50 eV) ou a platina (5,1 eV), e pode ser facilmente depositado na superfície destes materiais, usados como calefadores, que são então aquecidos até temperaturas relativamente altas para o céσιο, mas ainda sem sofrer emissão atômica própria.

Feixes de muito baixa intensidade podem ser então emitidos e detectados através de fitas de tungstênio ou platina-irídio aquecidas, como na figura 4.11, também retirada de Mockler (1965), ou ainda por detectores semicondutores de arsenieto de gálio, desenvolvidas muito tempo depois dos antigos electrômetros, já no final da década de 1980. Os tradicionais eletromultiplicadores são suficientemente sensíveis, mas não rápidos para correção em tempo real da frequência do padrão. Deste modo correntes tão baixas como picoampéres são detectadas com uma relação sinal-ruído melhor que 1000.

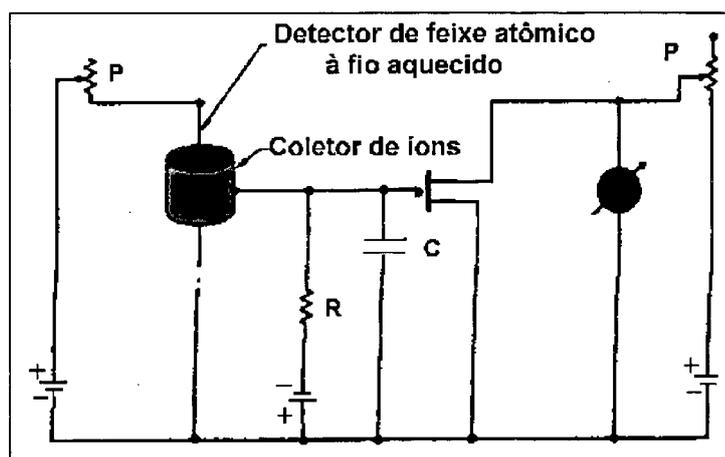


Figura 4.11 - Princípio de operação de detector a vácuo

O ruído que acompanha o sinal nos detectores atômicos são originários de flutuações randômicas presentes naturalmente na intensidade do feixe de átomos, radiações ambientais e influência de átomos de impurezas presentes na fonte emissora. Os fatores, portanto, que afetam a geração de ruído são a pureza do césio, o vácuo do tubo, a blindagem na região da detecção e, obviamente, o *ripple* das fontes de alimentação do sistema.

Na prática dispositivos de feixe eletrônico têm conseguido se manter desde o início dos anos 1960 como os melhores padrões de frequência que a tecnologia conseguiu produzir. Os fatores intrínsecos do sistema que afetam a estabilidade destes padrões são:

- a) A magnitude da não-uniformidade do campo defletor, incluindo variações de longo período. Aqui se incluem as variações de permeabilidade magnética do metal usado na blindagem ao magnetismo terrestre ;
- b) As diferenças de fase de oscilação entre regiões distintas do campo de transição, causadas por indecidibilidades quânticas ou pequenos defeitos no espalhamento do campo oscilante, ou dos circuitos de realimentação nos dispositivos de duplo campo ;
- c) A pureza espectral do campo eletromagnético de transição, que teoricamente deveria ser uma senóide.

Na figura 4.12 vemos uma solução usada para eliminar fontes de incerteza dos primeiros padrões de césio, introduzindo um MASER de amônia como excitador para uma célula de base-de-tempo padrão...

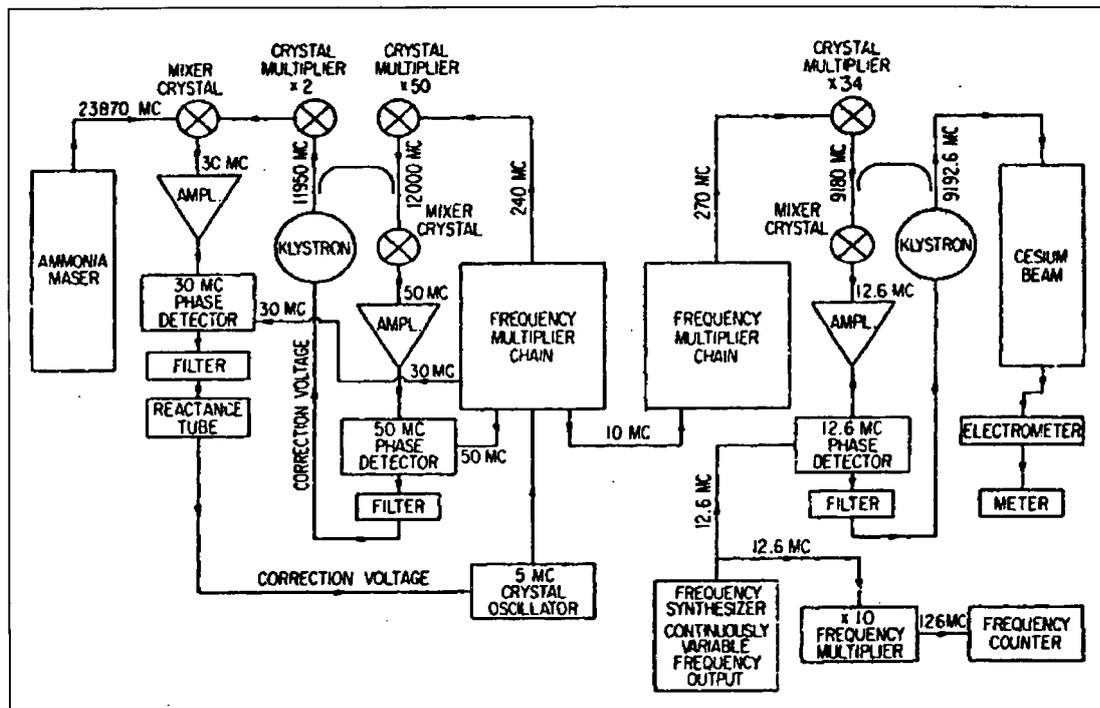


Figura 4.12 - Diagrama de blocos de um padrão de frequência de césio com excitação a MASER de amônia (Mockler, 1965)

#### 4.3.3 – O césio como padrão primário de tempo e frequência

O primeiro relógio atômico propriamente operacional, porém, foi posto em operação efetiva em 12 de agosto de 1948, construído e operado pelo National Bureau of Standards (atualmente N.I.S.T. – National Institute of Standards and Technology), em Washington, por H. Lyons. O sistema consistia basicamente em um cristal oscilador de quartzo estabilizado eletronicamente por um MASER de amônia, operando em 23,87 GHz, com divisores de frequência de saída em 50 Hz. Era grande e pesado basicamente porque tinha uma câmara ressonante de 7,5 m de comprimento, com baixíssima pressão de gás NH<sub>3</sub> ( $\approx 1$  Pa). O módulo de controle da base-de-tempo era aproximadamente do tamanho de um pequeno refrigerador doméstico, e sobre ele foi colocado um indicador com ponteiros, idêntico a um relógio convencional de parede.

O mesmo grupo do N.B.S. (N.I.S.T.) continuou pesquisas em associação com P. Kush, da Universidade de Columbia e, em 1952, conseguiram colocar em regime experimental de funcionamento uma base-de-tempo prática, de césio, usando a técnica desenvolvida por Rabi (um campo de RF) e, posteriormente, com a evolução proposta por Ramsey (dois campos separados). Padrões de césio somente seriam usados regularmente para serviços de calibração cerca de 6 anos após, por volta de 1958. Durante este período várias bases-de-tempo de césio foram construídas,

inclusive na Inglaterra, no NPL - National Physical Laboratory, onde começou a operar em junho de 1955. Durante este período medições regulares em diversos relógios foram feitas, comparadas e associadas às observações astronômicas do Observatório Naval americano, de onde se extraiu a frequência assumida hoje como associada à transição do césio, 9 192 631 770 Hz em relação ao segundo solar.

Somente em outubro de 1964, na 12<sup>a</sup> CGPM, na reunião geral do Comitê de Pesos e Medidas, foi instituída oficialmente a fonte atômica para o padrão de tempo. Nesta reunião também ficou definida a transição entre os níveis hiperfinos  $F=4$   $m_f=0$  e  $F=3$   $m_f=0$  do estado fundamental do átomo de césio 133 como tendo uma frequência de 9 192 631 770 Hz, a ser usada para a realização do padrão de medição. Da definição conceitual, porém, à implementação experimental do dispositivo capaz de reproduzir a definição, um padrão de frequência, os impedimentos são muitos, porque muitas são as exigências para esta aplicação.

Para ser aceito como padrão de tempo e frequência o efeito descoberto por Rabi e Ramsey teve que atender uma série de exigências, entre as quais, ser ...

- a) Um dispositivo capaz de gerar uma seqüência continuada e ordenada de estados que podem ser quantitativamente correlacionados com a observação de eventos, ou seja, um relógio cujo fenômeno repetitivo seja observável. Este relógio, por sua vez, precisa de uma fonte de regularidade, que pode ser o escoar de areia por um pequeno furo, o queimar de uma vela, a oscilação de um pêndulo gravitacional, de um sistema massa-mola, de um cristal piezoelétrico, de uma transição atômica de estado ou de um feixe de luz refletido.
- b) Capaz de operação continuada, porque não há como armazenar a unidade de tempo como se pode fazer com a unidade de massa. É necessário converter em *tempo-real* a seqüência ordenada de estados em múltiplos e submúltiplos da unidade, de forma que se possa utilizar, em qualquer instante arbitrário, a seqüência para uma medição. Apesar de células de césio terem uma vida relativamente curta quando comparadas com suas equivalentes à gás (MASERS e LASERS), são concordantes em alto grau, o que permite que várias sejam sincronizadas e que em nenhum momento a continuidade de integração seja rompida.
- c) Capaz de exatidão superior a qualquer outro dispositivo similar baseado em outra definição possível. Neste sentido o césio tem se mantido singular nas três décadas em que vêm sendo utilizado como padrão primário de tempo.

- d) Amplamente difundível, de forma que possa ser colocado à disposição de todos, seja fisicamente, pela multiplicação dos dispositivos ou virtualmente, pela distribuição de sinal telefônico e de rádio.

Imediatamente antes do surgimento dos padrões atômicos de frequência a ciência utilizava o conceito de *segundo solar médio* (*segundo das efemérides*), baseado no movimento de translação da terra, conforme apresentado na introdução deste trabalho. O principal inconveniente do uso deste padrão está associado ao longo tempo de observação astronômica necessária para a integração de um período. Com o aparecimento de padrões aceitáveis fora do âmbito astronômico, pode-se medir comparativamente a repetibilidade do segundo solar, que se situa em torno de dezenas de nanossegundos por segundo. Por medições sucessivas ao longo de muitos anos chegou-se a flutuações na ordem de unidades de nanossegundos, embora medições em intervalos de tempo intermediários exijam interpolações com uso de outras bases-de-tempo.

Padrões atômicos de frequência foram desenvolvidos inicialmente na década de 1950, e em meados da década de 1960 puderam ser aplicados em substituição aos padrões astronômicos, com redução na incerteza envolvida por um fator de mais de 1000 vezes. Além disto a alta frequência associada à vibração atômica permite que inferências estatísticas possam ser feitas em intervalos de tempo muito curtos, tornando acessíveis os resultados de medições mais prontamente. Outro fator a favor dos padrões atômicos é que para medição de curtos intervalos de tempo, da ordem de nanossegundos, não é necessário nenhum outro padrão de interpolação, senão o próprio oscilador atômico.

Se padrões de césio são colocados no mesmo laboratório, ou se um padrão de césio denominado *padrão viajante* é trazido à presença de outro, podem ser diretamente comparados, o que usualmente é feito com base em medição de frequência de ambos, por 48 horas, com integração por diferença de fase. O resultado da comparação é um gráfico que indica os cruzamentos de fase, e pode ser utilizado para corrigir a indicação de um deles, se houver rastreabilidade a padrões intercomparados nacionais.

Outra forma de proceder a intercomparação de padrões de césio envolve a emissão simultânea de sinais de frequência gerados por diversas células, em diferentes laboratórios. Com a recepção destes sinais durante vários meses pode-se conseguir incertezas da ordem de dezenas de picossegundos, apesar das flutuações devidas à propagação dos sinais de rádio.

---

Padrões de tempo e frequência portáteis de césio vêm sendo postos no mercado por grandes e tradicionais fabricantes de instrumentos e sistemas de medição, como a Hewlet-Packard e a Rohde&Schwarz, e por empresas mais especializadas, como a Frequency&Time Systems. Os maiores fabricantes mantêm padrões de trabalho calibrados contra os padrões primários de seus países (Alemanha e Estados Unidos) e realizam programas de intercomparação interna proporcionais ao seu porte, incluindo grupos de pesquisa e desenvolvimento que realizam publicações. A partir destes dados é possível avaliar a performance das bases-de-tempo de césio pelo ângulo do fabricante, o que pode ser vantajoso se o caso é verificar influências ambientais ou durabilidade, por exemplo. Pesquisadores isolados ou pesquisadores vinculados simplesmente a laboratórios primários ou secundários comerciais tendem a dirigir suas atenções à rastreabilidade, à incerteza e demais aspectos correlacionados.

#### 4.4 – Padrões baseados no tálio

O elemento tálio (205) foi tentado como base de padrões de frequência fundamentalmente porque apresenta menos sensibilidade ao campo magnético responsável pela inversão de spin de seus átomos. Esta característica do tálio é derivada do fato de que ele apresenta apenas quatro estados possíveis, além de energeticamente mais separados em comparação com os dezesseis do césio, mais próximos, sendo assim substancialmente imune a pequenos degraus de flutuação no campo magnético. O césio têm a vantagem importante, porém, de ser mais facilmente purificado e manipulado, ser menos reativo, e sua detecção ser mais eficiente que a do tálio. Na figura 4.13 um diagrama de transição mostra a relativa simplicidade da distribuição de energias espectrais do tálio, quando comparada com as do césio.

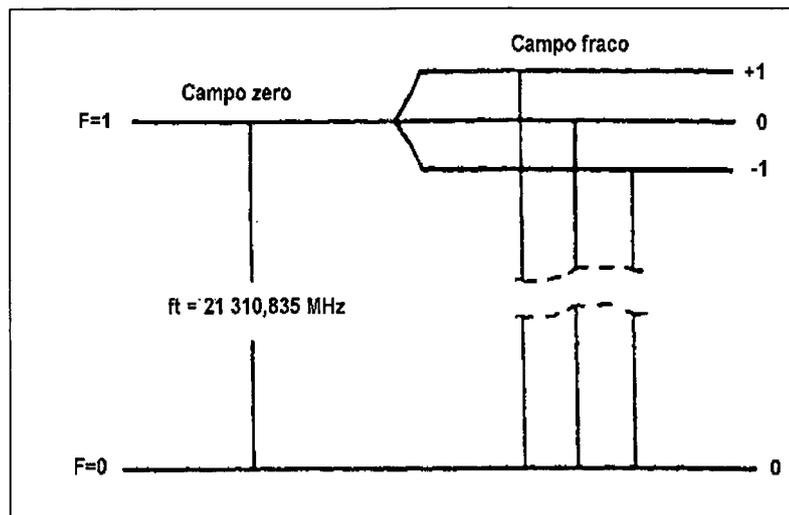


Figura 4.13 - Estrutura hiperfina do tálio 205 (Mockler, 1965)

Para o tálio a transição escolhida para base do padrão é entre os estados fundamentais ( $F=1, m_f=0$ )  $\Rightarrow$  ( $F=0, m_f=0$ ) e a frequência de transição acompanha o aumento do campo magnético por um fator vinte vezes menor que o do césio, segundo a equação

$$\nu = \nu_0 + 20,4H_0^2 \quad (\text{eq. 4.7})$$

Onde

$\nu$  é a frequência da transição sob campo  $H_0$ , em kHz;

$\nu_0$  é a frequência fundamental do tálio 205, igual a 21 310,835 kHz ;

$H_0$  é o campo magnético aplicado, em T

#### 4.5 – Célula de rubídio

Células gasosas denominadas MASERS (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) foram tentadas em alternativa ao uso do césio mas os experimentos demonstraram que não ocorrem benefícios que justifiquem sua aplicação irrestrita. As pesquisas com emissão estimulada em microondas nunca pararam, efetivamente, e o Observatório Nacional, detentor do padrão de tempo do Brasil, recebeu na segunda metade de 1996 MASERS para complementar seu conjunto de padrões de frequência. Estes MASERS estão sendo instalados para servirem como padrões de transferência e como fontes de frequência estáveis para controles por realimentação em laço fechado.

MASERS são usados comumente como fontes de referência de microondas para padrões de césio, como citado em Mockler (1961) e, teoricamente, em Feynman (1965), embora pelo princípio de operação fortemente dependente do ambiente haja dificuldade de sincronizar duas células a menos

---

de 1 ns de diferença de fase. Estas dificuldades de sincronismo decorrem também do fato de os MASERS não operarem por simples derivação associativa com a *freqüência de Bohr*, como os padrões de césio, mas serem dependentes de fatores construtivos da célula. Desenvolvimentos mais modernos apontam para a viabilidade tecnológica de padrões de freqüência óptico-gás, como o proposto por Audoin (1992) ou puramente ópticos, como o discutido por Helmcke (1987). As células gasosas usam vapores de metais alcalinos, sendo conhecidas por esta denominação, e a mais difundida é a de rubídio 87, hoje largamente usada como uma fonte de freqüência padrão, intermediária entre as de cristal de quartzo.

O LASER e o MASER não diferem na teoria, e quem está familiarizado com o LASER não tem dificuldade em compreender o mesmo processo sendo aplicado a microondas, e não luz visível. Conforme Tipler (1981) a amplificação de microondas é mais antiga que a amplificação de luz, e é função dos níveis de energia envolvidos nas transições eletrônicas de estado em átomos excitados. Quando uma certa massa gasosa, saturada de átomos de um certo material, pode ter seus átomos excitados via incidência de radiação luminosa ou indução térmica, e pode mantê-los nesta condição, a aplicação de uma onda eletromagnética de freqüência apropriada (com energia idêntica à da transição que se deseja) produz o decaimento induzido (ou estimulado) do átomo para seu estado fundamental. Juntamente com este decaimento ocorre a emissão de um fóton que surge em fase com a onda indutora, isto é, é coerente, como se houvesse uma amplificação ou multiplicação de fótons. O esquema apresentado na figura 4.14 esclarece este fenômeno...

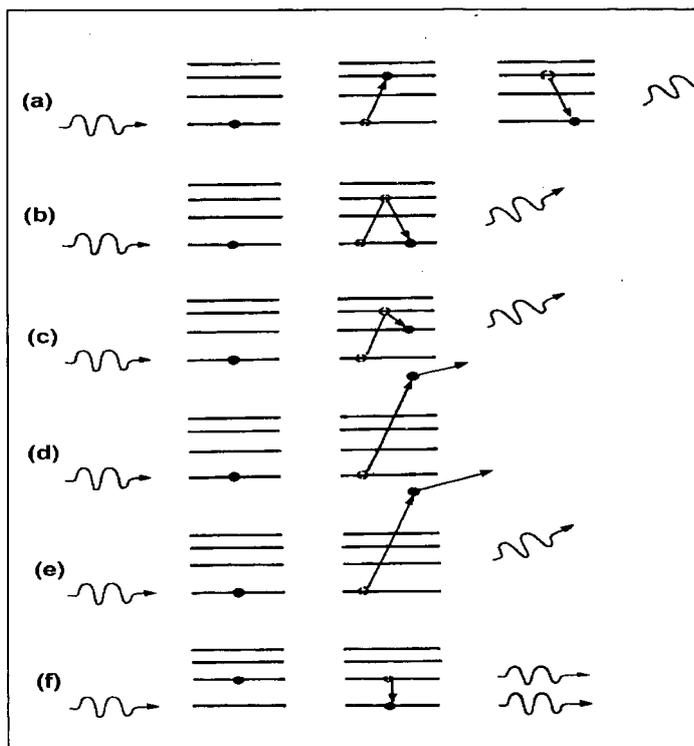


Figura 4.14 - Interação fótons-átomos (Tipler, 1981)

Nesta figura 4.14 o item *a* descreve uma forma de emissão espontânea na qual um fóton de energia coincidente com a necessária para excitar um átomo (na verdade produzir uma transição de nível ou subnível de um elétron do átomo), este absorve a energia do fóton e, algum tempo depois retorna para seu estado fundamental emitindo outro fóton, que não mantém qualquer relação de fase com o primeiro, embora deva possuir a mesma frequência associada. No item *b* a emissão é instantânea, como se houvesse apenas uma excitação virtual, sem necessidade de o átomo excitado permanecer no estado excitado por algum tempo, mas também aqui o fóton emitido não está em fase com o fóton original. Esta emissão induzida é conhecida como *espalhamento Rayleigh*. No item *c* ocorre de fato uma transição estimulada embora o fóton emitido não possua a mesma energia do fóton indutor. Este fato ocorre porque há uma transição virtual subjacente, chamada de *espalhamento Raman*. O item *d* descreve uma excitação com energia suficiente para ionizar o átomo, tal como ocorre no *efeito fotoelétrico*, havendo a emissão de um elétron. O item *e* mostra o *espalhamento Compton*, no qual a emissão de um elétron é acompanhada da emissão de um fóton. Finalmente o item *f* mostra uma emissão estimulada na qual o fóton incidente tem a energia correta para fazer decair o átomo que já se encontrava excitado. Neste caso a emissão é coerente pois tanto o fóton emitido quanto o incidente têm mesma energia e estão em fase.

Por seu princípio de operação atômico, que garante elevada reprodutibilidade, os MASERS e agora os LASERS sofreram impulso com desenvolvimentos de bases de frequência cada vez mais estáveis. No início da década de 1990 os novos padrões de tempo à hélio-neônio, rubídio e outros gases, atingiram graus de estabilidade da ordem de poucas partes em  $10^{14}$ , conforme Erin (1996), melhores do que os obtidos com o césio na década de 1960.

Um tipo especialmente bem sucedido de base-de-tempo à célula gasosa é a de rubídio. Padrões de rubídio comerciais são produzidos a partir da luz de uma lâmpada de descarga de rubídio 87, à pressão de  $1 \times 10^{-4}$  Pa, cuja luz é dirigida para uma cavidade ressonante sintonizada em 6835 kHz, correspondente à sua transição hiperfina. Pela interposição de uma filtro seletivo de rubídio 85, ou célula de absorção, entre a fonte de luz e a cavidade ressonante, uma linha espectral  $a$  específica pode ser capturada, enquanto o gás de rubídio na cavidade ressonante absorve preferencialmente uma frequência  $b$  diferente da do filtro, como é mostrado no diagrama esquemático existente na figura 4.15, retirada de Mockler (1965).

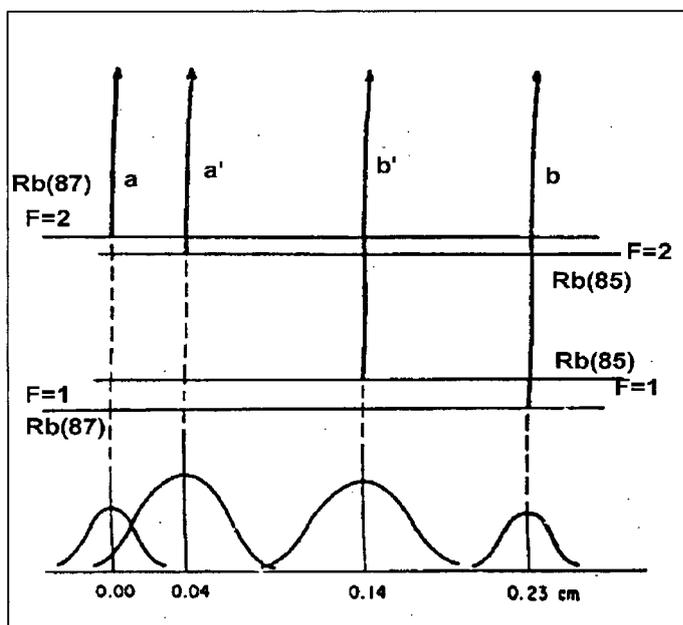


Figura 4.15 - Ação do filtro de Rb85 sobre a célula de Rb87

Como a excitação do rubídio é dupla, ocorrendo tanto de  $F=2$  como de  $F=1$  para  $F=0$ , o estado fundamental, depois da excitação gerada pela radiação emitida pela lâmpada os átomos do gás de rubídio tendem a decair ( $F=2 \Rightarrow F=0$ ) e ( $F=1 \Rightarrow F=0$ ) rapidamente, sob condições naturais à mesma taxa temporal. Um excesso de população será acumulada, porém, no estado  $F=2$ , porque os átomos de rubídio 87 tendem a ser preferencialmente excitados de  $F=1$  em virtude do filtro de rubídio 85, interposto. Após um certo intervalo de tempo a absorção do gás dentro da cavidade aumenta em

função do equilíbrio térmico, fazendo com que a população de átomos no estado  $F=1$  decaia por bombeamento óptico, tornando novamente superior a população em  $F=2$ . A ação da lâmpada continua e um aumento na iluminação da fotocélula é esperada. Um diagrama esquemático de uma célula de rubídio composto é mostrado na figura 4.16.

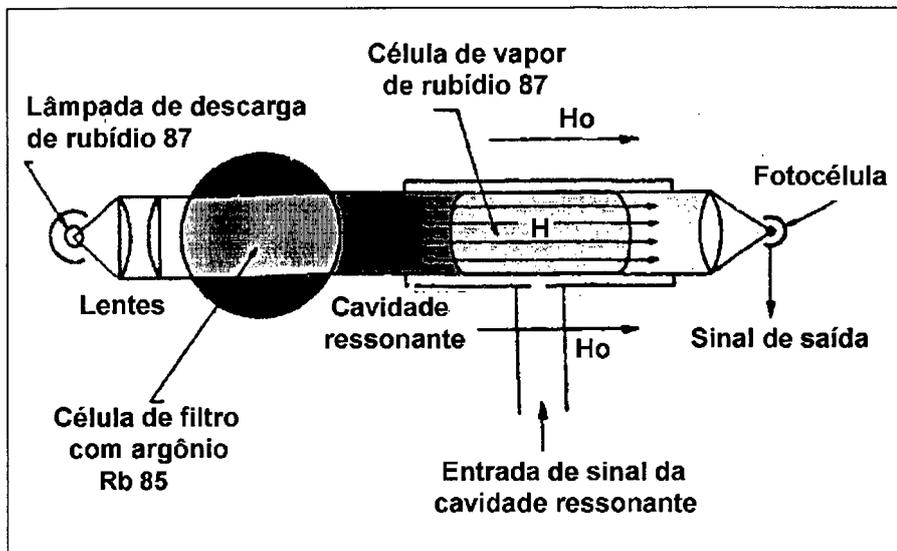


Figura 4.16 - Célula de vapor de rubídio 87 (Mockler, 1965)

Se agora uma radiação de microondas de frequência 6 835 kHz é aplicada à célula, via entrada da cavidade ressonante, átomos vão transitar do estado  $F=2$  para o estado  $F=1$ , liberando mais átomos e tornando-os disponíveis para nova excitação. Neste ponto a célula absorve mais da luz incidente e a iluminação na fotocélula decai. Se a radiação de microondas aplicada na cavidade ressonante muda a frequência um aumento na intensidade de luz sobre a fotocélula é esperado, e o sinal de saída pode ser usado para corrigir o desvio do gerador de microondas, mantendo a frequência centralizada em torno da frequência de ressonância da célula, 6 835 kHz. No caso do rubídio o processo de correção da frequência de ressonância da célula é semelhante à empregada para células de césio, exceto que aqui a frequência de ressonância é menor e o sinal a ser detectado não é composto por partículas, mas sim por ondas de luz.

#### 4.6 – Padrões atômicos a LASER

O LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) é uma forma de emissão estimulada de radiação por inversão de população obtida por meios ópticos. Para a compreensão do fenômeno é útil a abordagem já realizada sobre MASERS, no item anterior, e principalmente o estudo da célula de rubídio. É necessário saber que átomos e moléculas se juntam por meio de um ou mais

mecanismos de ligação : iônica, covalente, Van der Waals, hidrogênica ou metálica. Ligações iônica e covalente são as mais fortes entre elas. As formas de tais moléculas poliatômicas, como  $H_2O$  e  $NH_3$ , podem ser entendidas a partir da distribuição espacial das funções de onda orbitais, atômicas ou moleculares, e o espectro de absorção para moléculas diatômicas consiste de máximos igualmente espaçados, separados por um  $\Delta E$  com salto (gap) igual ao dobro dessa separação na energia de vibração.

Um fóton incidente num átomo pode ser absorvido ou espalhado elástica ou inelasticamente. Se a energia do fóton for maior que a energia de ionização do átomo, poderá ocorrer espalhamento Compton ou o efeito fotoelétrico. Se o átomo estiver inicialmente num estado excitado, um fóton incidente de energia apropriada pode estimular a emissão de um outro fóton de mesma energia. Os fótons incidentes e emitidos estão em fase e caminham paralelamente. MASERS e LASERS constituem aplicações importantes da emissão estimulada. A amplificação por emissão estimulada depende da possibilidade de obter inversão de população, onde existem mais átomos no estado excitado do que no estado fundamental ou outro estado excitado de energia menor. Inversão de população é obtida usualmente por bombeamento óptico, mas pode ser obtida por meios elétricos, como a aplicação de um campo ou corrente elétrica.

Segundo Jürgen Helmcke (1988) do P.T.B., "...padrões à LASER estabilizado operando na região do visível são agora largamente usados como padrões de comprimento de onda, na metrologia dimensional e em espectrometria. A aplicação dos mesmos métodos para o desenvolvimento de padrões de frequência pode gerar relógios ópticos com incerteza nunca precedida". A razão para esta esperança é que células LASER operando no visível produzem sinais de saída de sincronismo várias ordens de grandeza maiores que os tradicionais padrões de césio, gerando padrões de resolução espectral igualmente mais intensos.

Outra vantagem do LASER como base de padrões de frequência diz respeito a sua frequência mais elevada em relação ao césio, que faz com que pequenos degraus fracionais de frequência sejam imediatamente percebidos e corrigidos pela realimentação eletro-óptica. Por outro lado seria muito favorável uma única implementação experimental que representasse, ao mesmo tempo, padrões de frequência, tempo e comprimento, o que seria obtível com LASER com relativa facilidade, pois este já é usado há mais de uma década em medição de comprimentos por interferência.

Ainda segundo Helmcke (1988) as exigências teóricas para que um padrão óptico de frequência fosse operacional são :

- que a emissão ocorresse em um único comprimento de onda sintonizável ;
- que houvesse uma fina, estável e simétrica linha de referência para realimentação ;
- que o filtro de absorção espectral retenha a luz tempo suficiente para obter alta resolução ;
- que seja realizável a medição de frequência óptica por coerência de fase ;
- que o dispositivo tenha potencial para permanecer continuamente ativo.

Um esquema do dispositivo teórico pode ser apreciado na figura 4.17, obtida de Helmcke (1988).

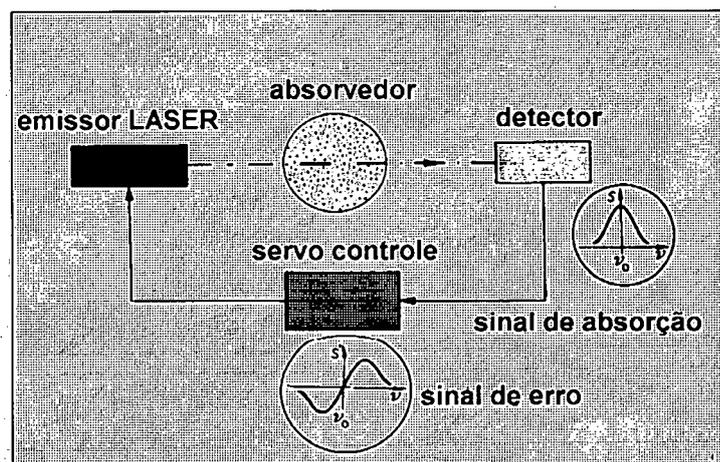


Figura 4.17 - Esquema básico de um padrão óptico de frequência

Os principais impedimentos tecnológicos que complicam a realização de um padrão de frequência totalmente óptico têm sido contornados de várias formas, entre elas : a utilização de excitação por LASERS de corante, que podem operar continuamente emitindo uma única frequência visível, derivada de uma única transição eletrônica ; a estabilização em linhas espectrais finas, que têm sido obtidas por ressonância óptica, nas quais se consegue redução nas flutuações de frequência de várias ordens de grandeza ; e a captura do sinal de frequência diretamente pelo ressonador óptico ou por técnicas de modulação óptica.

Um diagrama esquemático de estabilização é mostrado na figura 4.18, onde uma parte do feixe LASER é desviado para um dispositivo ressonador óptico, onde ocorre uma modulação de fase através de um transdutor eletro-óptico, geralmente cristalino. Pela reflexão no ressonador a modulação de fase pode ser parcialmente convertida em modulação de potência, que contém informações sobre o desvio da ressonância. Esta modulação de potência é detectada por um fotossensor sensível à fase, seguido de um misturador duplo e balanceado.

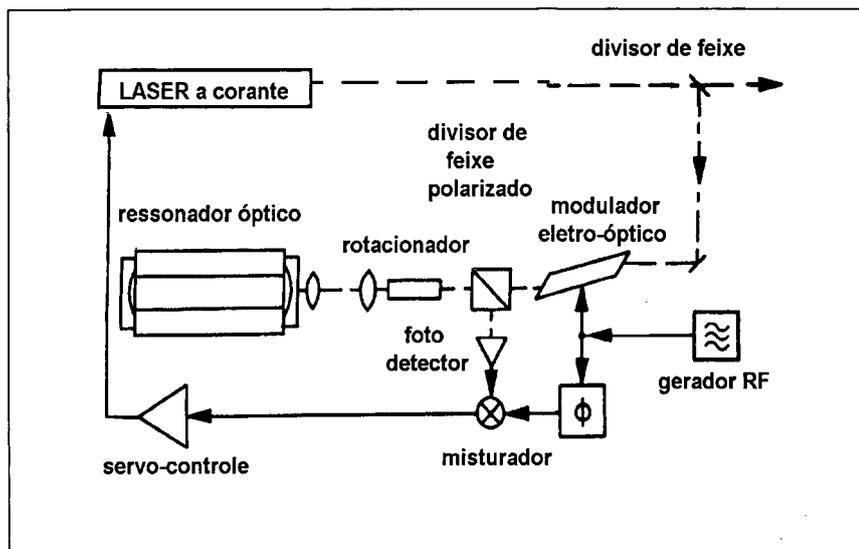


Figura 4.18 - Estabilização de frequência de LASER corante (Helmcke, 1988)

O P.T.B., conforme Helmcke (1988), construiu na década de 1980 um padrão de frequência baseado no princípio de realimentação apresentado acima, utilizando frequência de atuação do servo piezoelétrico de 2,5 MHz, com ganho unitário. A largura espectral do feixe LASER foi reduzida de 1 MHz, que ocorre na situação de operação sem realimentação, para apenas 1 kHz, através da sintonia da frequência de modulação aplicada ao servo controle. Para detectar e compensar o desvio residual do ressonador óptico a frequência do LASER foi estabilizada no centro de sua faixa dinâmica, ocorrendo um batimento forçado com um feixe LASER de célula de iodo estabilizado. O sinal resultante deste batimento alimenta o gerador de RF e corrige o desvio.

Métodos mais simplificados de manutenção de padrões de tempo estão na dependência da medição de frequências diretamente na faixa do visível, que é problemática porque envolve frequências da ordem de centenas de terahertz. Atualmente os métodos empregados utilizam a luz como fonte de interferência, retirando a informação para correção e excitação de outras etapas do produto da interferência - o batimento - que pode ser mantido na casa dos megahertz, magnitude de frequência facilmente amplificada, dividida e multiplicada pelos circuitos eletrônicos atuais.

Uma possibilidade teórica seria tentar a convergência de um feixe LASER sobre um elétron convenientemente capturado e oscilante, dentro de um acelerador circular de partículas, proposto por Kramer (1988). Neste dispositivo o feixe LASER seria concentrado até ter um diâmetro igual ou menor que seu comprimento de onda ( $1\lambda$ ), e seria focalizado sobre um pequeno trecho da trajetória circular do elétron no sincrotron. Obviamente campos magnéticos externos deveriam levar o elétron

primeiramente até frequências rotacionais elevadas, da mesma ordem de grandeza que se pode obter hoje em ciclotrons.

Nesta situação a frequência de rotação do elétron tenderia a estacionar em uma harmônica inferior da frequência original do feixe LASER, e esta frequência poderia ser recuperada eletricamente a partir da emissão e RF do próprio movimento rotacional do elétron, conforme mostra a figura 4.19.

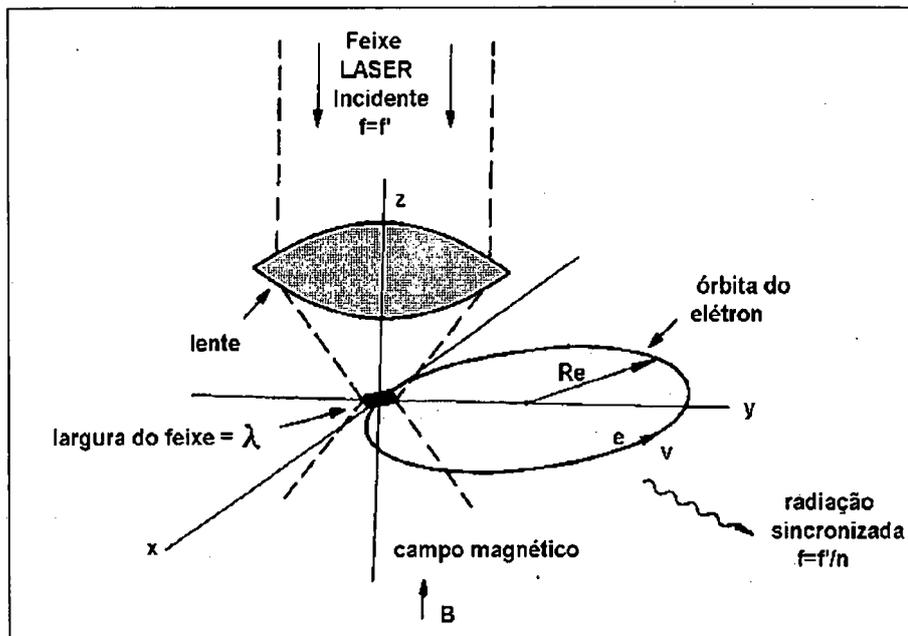


Figura 4.19 - Sincrotron a LASER como padrão de frequência (Kramer, 1988)

Outras possibilidades que vêm sendo tentadas envolvem diodos Schottky de alta velocidade, até a casa dos 5 THz, diodos metálicos, até a casa dos 150 THz, já dentro da faixa do infravermelho, e cristais eletro-ópticos. Estes últimos têm sido exaustivamente testados e já são aplicados na medição de campos elétricos de frequências próximas aos terahertz, como apresentado por Retig (1995), que delineia seu uso nos amostradores dos osciloscópios de última geração, mas que pode ser aplicada às demais necessidades da medição do tempo, e por Takahashi (1995) que trata da medição de formas de onda em integrados rápidos e de larga integração com um sistema eletro-óptico a LASER.

Estes sistemas estão baseados em um *cristal eletro-óptico* com resposta rápida (fentossegundos), que tem como princípio de operação uma leve alteração no índice de refração do cristal, proporcional ao campo elétrico presente nas proximidades. A detecção da alteração proporcional do índice de refração é feita por um feixe LASER que o atravessa, e por este método

pode-se obter informações em tempo real de um sistema elétrico a uma taxa de amostragem teórica da ordem de terahertz, atualmente limitada pelos meios de detecção elétrica posterior.

#### 4.7 – Possibilidades futuras na medição de intervalos de tempo

Os métodos atômicos de geração de frequências de referência descritos neste trabalho, sejam baseados na emissão de átomos excitados (césio), ressonância em cavidades (MASERS) ou retenção à gás (rubídio) são hoje considerados tradicionais. A tecnologia do LASER aplicada à medição de tempo e frequência, comentada anteriormente sob o título *Padrões atômicos a LASER*, esbarra em limitações tecnológicas ainda fortes o bastante para manter a emissão de feixes atômicos como base para medição do tempo. Outras pesquisas têm sugerido que métodos de minimização de incerteza aplicados a padrões baseados em feixes de átomos podem ser a solução para as exigências científicas de manutenção de bases-de-tempo padrão.

Em 1953 um pesquisador chamado Zacharias, citado por Gibble (1992), propôs uma fonte baseada em emissão de átomos com uma única cavidade ressonante em microondas. O processo, que envolvia a emissão balística de átomos que retornavam à cavidade através da atração gravitacional, somente foi implementado com sucesso em 1992, por Kasevich, utilizando um processo de *resfriamento a LASER* aplicado ao feixe atômico. O processo somente é viável quando *temperaturas* menores que 1K são obtidas no feixe, permitindo fluxos da ordem de  $10^8$  átomos por segundo.

Técnicas ópticas de resfriamento de gás de partículas foram desenvolvidas a partir de 1986, por Hänsch e Schawlow, e visam reduzir a energia associada à movimentação térmica aleatória dos átomos neutros através de transferência de momento por fótons de LASER. O processo consiste na emissão de um feixe LASER sintonizado na região do vermelho, próximo à frequência de ressonância atômica, emitido em três eixos mutuamente perpendiculares. Através de um processo de absorção e reemissão de fótons os átomos perdem energia, resfriando a massa gasosa. Temperaturas tão baixas quanto 10 nK (Gibble, 1992) podem ser obtidas com átomos de césio através do método de resfriamento por LASER.

As fontes de feixes atômicos resfriados a LASER possuem tempos de trânsito entre cavidades ressonantes muito maiores que os métodos quentes, mas com a pequena energia associada aos átomos a probabilidade de ocorrerem transições espontâneas é reduzida. Conquanto diferenças dimensionais entre cavidades é um problema inexistente em fontes de átomos frios, que possuem apenas uma única cavidade ressonante, o fator externo intrinsecamente mais influente em relação à operação da célula é

---

a intensidade da aceleração gravitacional no local. Estabilidade relativa em frequência da ordem de  $1 \times 10^{-16}$  pode ser obtida com o sistema, ainda experimental e limitado a medições de curto-termo, embora modificações de altitude de apenas 1 m causem perturbação de igual magnitude. Sistemas baseados em satélites em órbitas geoestacionárias foram propostos como alternativas nas quais as alterações gravitacionais da superfície não seriam sentidas a ponto de comprometer relógios atômicos resfriados a LASER.

Novos desenvolvimentos utilizam feixes LASER com frequência travada por interferometria Fabry-Perot e padrões de frequência baseados em armadilha de íons, semelhante a um combinado ciclotron-magnetron. Nestes os íons de mercúrio são simultaneamente expostos a campos magnéticos que os confinam em regiões muito estreitas, fazendo-os emitir na faixa de microondas.

## **Capítulo 5**

### **Dispositivos mostradores de cristal líquido**

## 5 – Dispositivos mostradores de cristal líquido

Mostradores de Cristal Líquido - LCD - são dispositivos eletro-ópticos constituídos por materiais monoméricos orgânicos (moléculas longas de carbono e hidrogênio – poucos nanômetros de comprimento e apenas algumas centenas de picômetros de diâmetro - não-acopladas) no estado líquido à temperatura ambiente, com a propriedade de terem suas moléculas orientadas segundo um campo elétrico externo. Esta orientação, semelhante à polarização elétrica observada nos dielétricos moleculares sólidos, pode ser utilizada para polarizar ou filtrar ondas eletromagnéticas na faixa do visível. O uso dos LCD é extremamente difundido para uso em mostradores de relógios, calculadoras, instrumentos de medida e computadores e televisores portáteis, além de usos específicos em óptica aplicada, na construção de moduladores, especificamente em associação com LASER. A figura 5.1 mostra uma representação da ordenação espacial das moléculas de um material cristalino no estado sólido, cristal-líquido e líquido, e a relação entre estes estados e a temperatura.

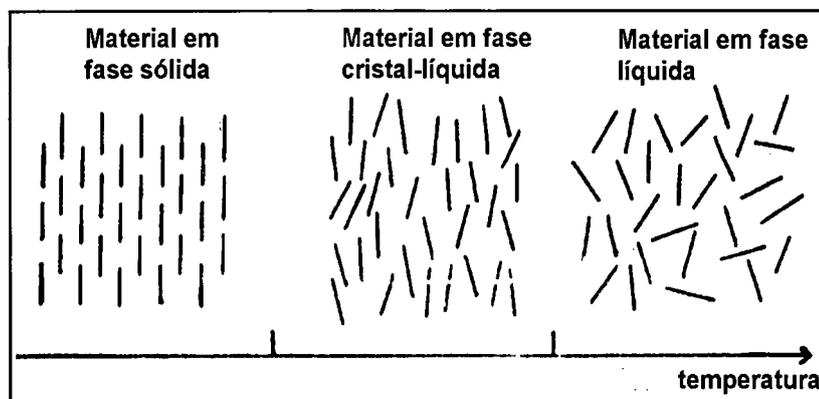


Figura 5.1 - Representação de organização molecular (Collings, 1990)

Pela análise dos calores latentes das transições sólido-cristal líquido e cristal líquido-líquido da curva de aquecimento destas substâncias pode-se chegar à conclusão que este estado da matéria se aproxima mais do líquido que do sólido. Na passagem de sólido para cristal líquido, estes materiais absorvem várias vezes mais energia, sob forma de calor latente, do que quando transitam entre os estados cristal líquido-líquido. Por outro lado os cristais líquidos mantêm uma importante característica dos sólidos correspondentes, que é a pronunciada anisotropia, contrariamente aos gases e líquidos, que são isotrópicos.

Os LCD podem ser divididos em três categorias, conforme a distribuição molecular que possuam. Os *Esméticos* são caracterizados por possuírem uma distribuição molecular em camadas planas bem definidas, com a direção do comprimento das moléculas formando um certo ângulo fixo

em relação ao plano em que se distribuem. Conforme este ângulo e a orientação relativa que as moléculas possuem dentro da camada, os materiais esméticos admitem ainda uma classificação em onze subtipos, designados por letras de A a K. O nome Esmético (*smetic* em inglês) deriva da palavra grega para *sabão*, já que cristais líquidos derivados do sabão têm esta constituição.

Como as moléculas têm comportamento ferro-elétrico, com a aplicação de um campo elétrico externo em um certo volume de material esmético cada plano tem suas moléculas rotacionadas de um certo ângulo um pouco diferente do ângulo de um plano imediatamente superior ou inferior, de modo que *estruturas helicoidais opticamente uniaxiais se formam*.

Os *Nemáticos* são substâncias muito semelhantes aos esméticos, com a característica de serem levemente menos ordenadas em termos de planos. As moléculas individualmente têm tendência de se orientarem paralelamente às vizinhas, mas não há uma definição clara de planos separados. Sua principal característica prática de diferenciação em relação aos esméticos é que são mais fluidos, favorecendo algumas aplicações e manipulação. Os nemáticos *são opticamente uniaxiais em relação à direção paralela às moléculas*. LCD nemáticos são usados para manipulação da polarização de LASER através do controle da birrefringência nemática (variação do índice de refração conforme a polarização da luz incidente), que varia de 0,04 a 0,40 como função de sua composição. Seu nome deriva da palavra grega para *parafuso*.

E os *Colestéricos*, que apresentam uma estrutura de camadas planares semelhante à dos esméticos ao mesmo tempo em que as moléculas se distribuem menos regularmente em cada camada, como ocorre com os nemáticos. O nome deriva de *colesterol*, uma substância orgânica presente em certos tecidos animais, que tem uma distribuição molecular semelhante.

Para uma dada camada as moléculas preferencialmente se distribuem alinhadamente na direção de seu comprimento, chamada de *eixo diretor*, e se afastam da camada seguinte por uma distância da ordem de 0,5 nm, a qual tem moléculas alinhadas entre si, mas rotacionadas entre 10 e 30 minutos de arco em relação às do plano anterior. Este desalinhamento progressivo aparece volumetricamente como uma distribuição helicoidal, e a distância necessária para que o eixo diretor rotacione 360° é chamada de *pitch* do cristal líquido colestérico. As aplicações dos cristais líquidos colestéricos, porém, sempre utilizam metades de *pitch*, já que basta uma rotação de 180° para que a simetria retorne ao sistema.

Diversas substâncias são usadas como base para confecção de dispositivos mostradores de cristal líquido, especialmente as derivadas de radicais ciano, do grupo químico das alquilas, de bifenilas e terfenilas, além de pirimidinas. Algumas delas conferem propriedades específicas de utilização ao cristal líquido, especialmente relacionadas à faixa de comprimentos de onda à qual se aplicam. Na figura 5.2, retirada de Collings (1990), um gráfico mostra a densidade óptica que alguns grupos de cristais líquidos apresentam a diversos comprimentos de onda, do ultravioleta até o azul.

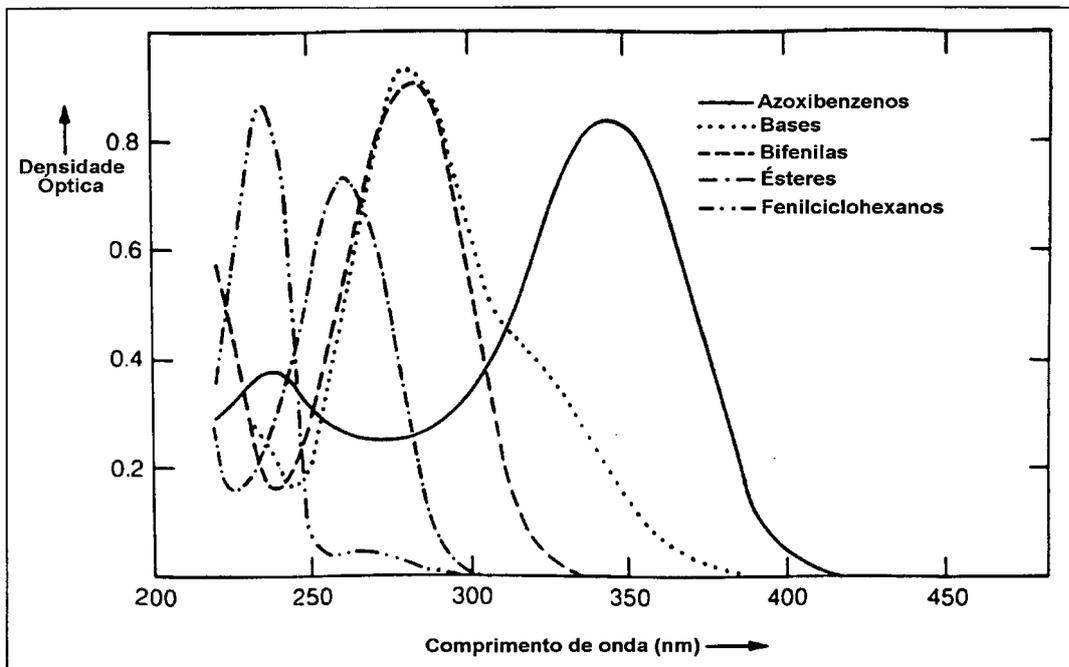
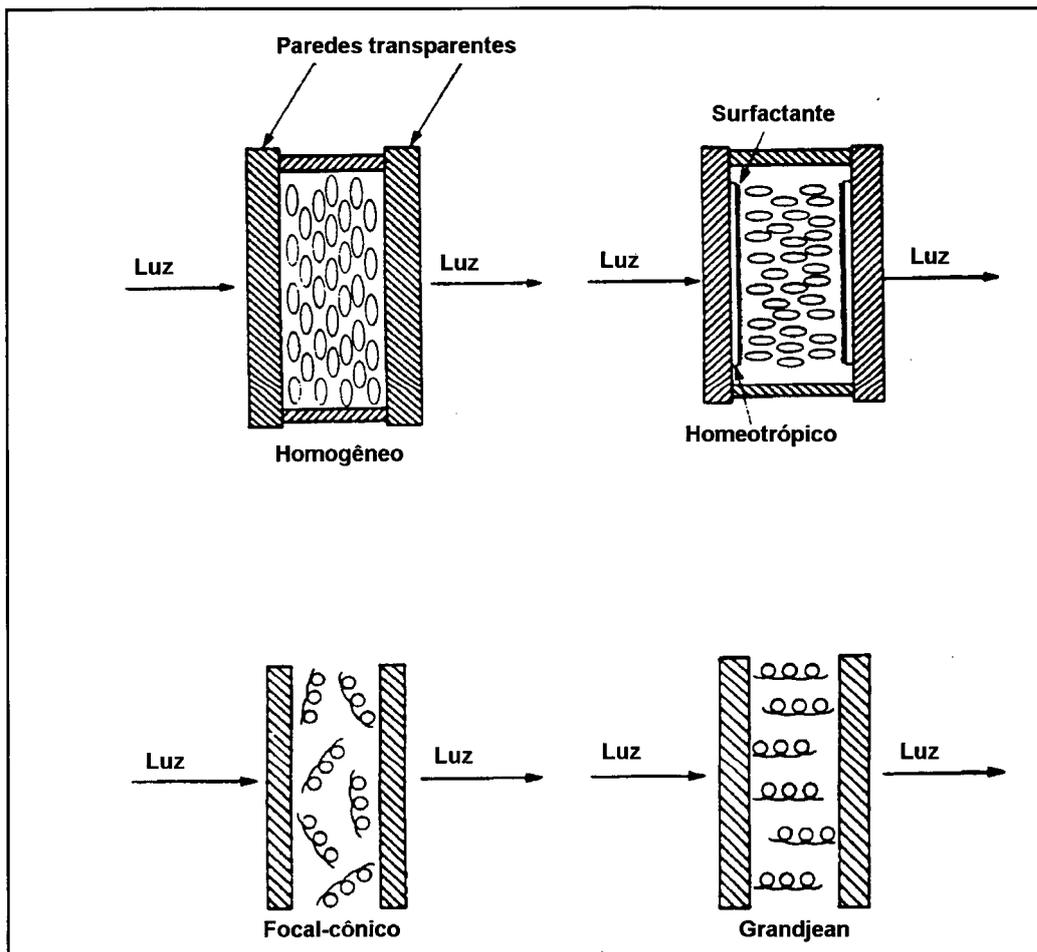


Figura 5.2 - Densidade óptica de cristais líquidos em diferentes comprimentos de onda



**Figura 5.3 - Alinhamento molecular para cristais líquidos nemáticos (superior) e colestéricos (inferior)**

Para que se tornem utilizáveis, os cristais líquidos são contidos em células formadas por duas placas paralelas de material transparente ao comprimento de onda a que se destinam. Conforme o tipo de cristal líquido utilizado e a inclinação entre o eixo diretor e as paredes transparentes, o alinhamento molecular recebe um nome diferente, conforme é mostrado na figura 5.3, retirada de Collings (1990). Assim, para cristais líquidos nemáticos, quando o eixo diretor é paralelo às superfícies transparentes, o alinhamento chama-se *homogêneo*, e as moléculas são forçadas a se orientar através da acomodação em finos riscos, paralelos ao eixo diretor, traçados nas placas paralelas. Se o eixo diretor deve ser perpendicular às paredes - o chamado alinhamento *homeotrópico* - as paredes transparentes são forradas com substâncias surfactantes, como a lecitina, que forçam, através de interações de Van der Waals (ou dipolares), as moléculas do cristal líquido a se orientarem.

Para cristais líquidos colestéricos o processo de obtenção da polarização forçada, do tipo *Grandjean*, é semelhante ao descrito acima, e para os esméticos são usados processamentos térmicos associados a campos elétricos ou magnéticos.

Em termos de aplicações, os cristais líquidos pode ser utilizados na confecção de *isoladores ópticos e polarizadores circulares*, que são dispositivos ópticos passivos, constituídos por uma célula de cristal líquido colestérico, cuja característica é a de bloquear ou permitir a passagem de radiações eletromagnéticas conforme sua polarização circular seja dextrógira ou levógira. Nestas aplicações são mais baratos e têm maior largura de banda do que seus concorrentes. Como polarizadores têm uma deficiência importante relacionada com o corrimento de frequência com a temperatura, da ordem de 0,35 a 1,4 nm/°C, que pode impedir seu uso em aplicações mais exigentes, embora tenham vantagens relacionadas com a insensibilidade angular, custo e durabilidade. LCD's são também aplicados na construção de *filtros*, constituídos por um sanduíche de polarizadores cruzados a 90°, têm a característica de bloquear (refletindo) especificamente um determinado comprimento de onda, deixando passar todos os demais. Têm uso como óculos de proteção individual, janelas de proteção ambiental e no isolamento de instrumentos que trabalham no infravermelho. Têm vantagens sobre filtros comuns porque refletem a radiação indesejada, evitando superaquecimento da célula.

Sólidos, líquidos e gases respondem minimamente a campos magnéticos ou elétricos, enquanto os cristais líquidos têm reorientação espacial importante mesmo sob campos muito débeis. Esta característica mantém relação com o fato de os cristais líquidos apresentarem assimetria, semelhantemente aos sólidos, mas principalmente porque os cristais líquidos têm moléculas grandes, facilmente polarizáveis por fatores intrínsecos, como a não-homogeneidade de distribuição de cargas entre seus átomos constituintes. Esta não-homogeneidade de carga gera dipolos elétricos, de forma que o eixo ao longo dos planos moleculares pode ser orientado pela aplicação de um campo elétrico externo, de muito baixa intensidade.

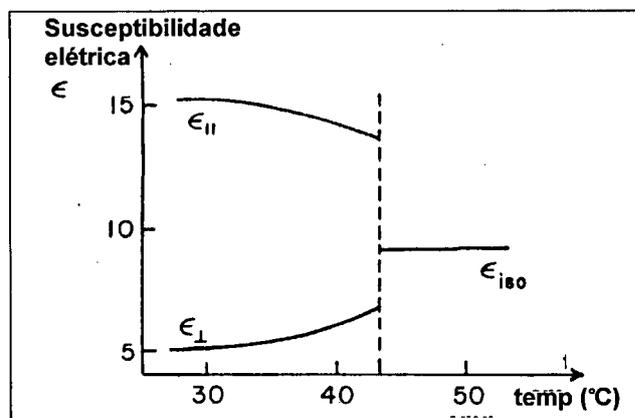


Figura 5.4 - Susceptibilidade elétrica de um cristal líquido típico em função da temperatura (Collings, 1990)

A polarização elétrica de um material pode ser definida como a quantidade de dipolos por unidade de volume, e a razão entre a polarização elétrica e o campo elétrico aplicado é uma constante para uma mesma inclinação entre o campo e o eixo diretor de um dispositivo de cristal líquido, e é chamada de *susceptibilidade elétrica* do material. Um gráfico que mostra a variação térmica da susceptibilidade elétrica de um típico cristal líquido é mostrado na figura 5.4. Neste gráfico  $\epsilon_{\perp}$  e  $\epsilon_{\parallel}$  representam a susceptibilidade de um material quando exposto respectivamente a um campo perpendicular e paralelo ao eixo diretor. A anisotropia da susceptibilidade elétrica dos cristais líquidos permite que sejam usados como agentes ativos na transmissão de luz.

Uma série de tipos de mostradores utilizando cristais líquidos foram desenvolvidos e aplicados durante a sua evolução, mas todos eles se baseiam no fato de a luz que passa através de uma célula de cristal líquido sofre uma alteração do estado de sua polarização que pode ser controlada através da aplicação de um campo elétrico. Desta forma, eletrodos convenientemente dispostos podem modificar a propagação da luz em pequenas áreas dentro de uma célula, que podem ter o formato de um segmento de um dígito, um ponto ou qualquer outra forma que possa transferir uma informação visual.

Os mostradores de cristal líquido, ao contrário dos mostradores de LED ou mostradores baseados em tubos de raios catódicos, não produzem, mas controlam a luz. Esta luz precisa vir de uma fonte externa, que pode estar do lado oposto ao do observador, em relação à célula de cristal líquido, ou do mesmo lado.

Diversas grandezas estão relacionadas à operação dos mostradores de cristal líquido, e algumas delas são :

- a) *Tensão de limiar*, que é a tensão mínima que precisa ser aplicada aos eletrodos da célula de cristal líquido para que ocorra uma alteração perceptível no seu brilho ;
- b) *Resposta em tensão* é a variação de tensão aplicada aos eletrodos de uma célula de cristal líquido necessária para que o brilho resultante varie desde 10% até 90% do máximo para uma dada iluminação ;
- c) *Tempo de comutação* é o tempo necessário para que o brilho de uma célula de cristal líquido varie de 10% a 90% após a aplicação de um impulso degrau de polarização.

Na verdade há dois tempos de comutação levemente diferentes, pois o tempo de acionamento é ativo, ou seja, o cristal líquido responde a um sinal externo aplicado, enquanto o tempo de desligamento é passivo, ou de relaxação, pois somente o sinal externo é retirado, e nenhum outro é aplicado.

Os tipos de mostradores de cristal líquido mais importantes são :

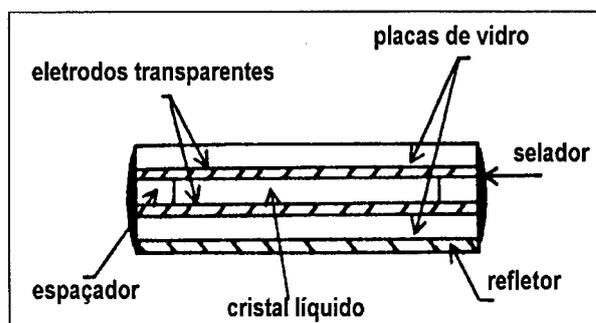


Figura 5.5 - LCD por espalhamento dinâmico (Collings, 1990)

- a) *LCD por modo de espalhamento dinâmico* é o mais antigo tipo de LCD. Funciona baseado no fenômeno da redução do índice de reflexão de uma célula de cristal líquido quando exposta a um campo elétrico. Esta redução na reflexão é causada pela agitação das moléculas de impurezas presentes no cristal líquido exposto ao campo. Para este tipo de LCD eram necessários algumas dezenas de volts de acionamento, e a luz ambiental podia ser controlada através de eletrodos transparentes de óxidos metálicos depositos sobre as placas de vidro que continham o cristal. Já neste tipo havia a necessidade da aplicação de tensões alternadas aos eletrodos, para evitar que houvesse a decomposição eletroquímica dos mesmos. Na figura 5.5 se vê um corte transversal de uma célula de cristal líquido por espalhamento.
- b) *Modo nemático rotacionado* foi desenvolvido no início dos anos 1970 e permitiu a difusão dos aparelhos portáteis com LCD, pois exige tensões muito menores para a polarização do cristal. É hoje o método de construção de LCD usado em quase todos as aplicações, exceto algumas específicas, como telas de computadores portáteis, que usam evoluções derivadas do mesmo método. Baseia-se na inclusão de polarizadores orientados de  $90^\circ$  colocados em faces opostas da célula de cristal líquido, e na orientação química ou mecânica do eixo diretor do cristal, também defasado de  $90^\circ$  em cada face, forçando a rotação intrínseca na polarização da célula, acompanhando os polarizadores. O polarizador secundário pode ser um espelho, e desta forma a aparência da célula sem aplicação de campo elétrico é prateada, pois a luz que penetra na célula é rotacionada através do eixo diretor e consegue ultrapassar a barreira dos polarizadores,

submergindo na direção dos olhos do observador. Quando um potencial suficiente é aplicado aos eletrodos uma rotação induzida modifica a polarização do eixo diretor e a luz que penetra na célula já não consegue submergir, resultando em uma mancha negra que repete o formato do eletrodo. Na figura 5.6, retirada de Collings (1990), a condição ativa mostra os polarizadores e o eixo diretor rotacionado (representado pelos traços) coincidentemente, permitindo à luz incidente retornar, enquanto na condição inativa a rotação elétrica forçada do eixo diretor não coincide com a rotação dos polarizadores, e a luz que penetra na célula não retorna.

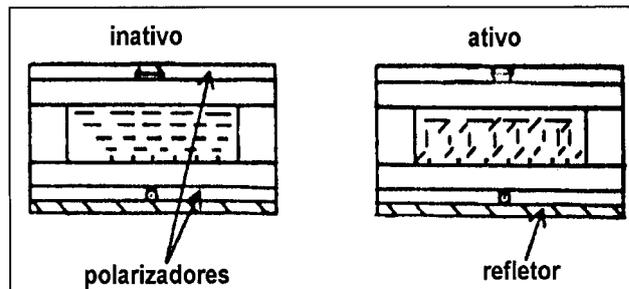


Figura 5.6 - Mostradores nemáticos rotacionais por transmissão e reflexão

Tempos de comutação de 2 a 5 centésimos de segundo são comuns neste tipo de mostrador, e a partir de 1985 uma evolução permitiu melhorar o ângulo de visão através da rotação do eixo diretor do cristal líquido aumentada de  $90^\circ$  para  $270^\circ$ , numa estrutura que recebeu o nome de mostrador *nemático super rotacionado*. Esta evolução permitiu ainda a redução da tensão de limiar.

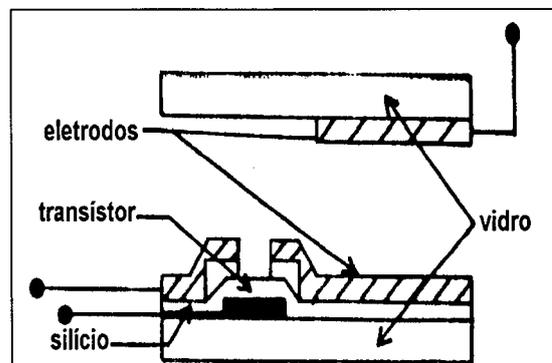


Figura 5.7 - Pixel de mostrador de matriz ativa (Collings, 1990)

- c) *Mostrador de matriz ativa* é o mais recente desenvolvimento em termos de mostradores de cristal líquido, e foi idealizado a partir da evolução das técnicas de produção de circuitos integrados em larga escala, e combina o mostrador nemático super rotacionado com chaveamento ativo a

transistor, célula por célula. Com esta implementação, mostrada na figura 5.7, o tempo de resposta da célula foi diminuído, assim como a tensão de limiar.

## **Capítulo 6**

### **O sistema de leitura óptica de cronômetros SISLOC**

## 6 – O sistema de leitura óptica de cronômetros - SISLOC

### 6.1 – Requisitos e necessidades atendidas

A calibração de cronômetros digitais e analógicos tem sido um dos principais serviços do LABELO - o laboratório de metrologia elétrica, tempo e frequência da PUCRS - ao longo dos últimos seis anos, em número de unidades calibradas, de forma semelhante ao que vem ocorrendo com outros laboratórios secundários da Rede Brasileira de Calibração (RBC). Apesar de ser um instrumento de medida cujos resultados mantêm acentuada dependência em relação ao operador, pois inclui um componente humano crítico denominado *tempo de resposta*, é largamente utilizado nos mais variados processos industriais, obrigando seus proprietários a calibrá-los periodicamente.

Este processo de calibração periódica esbarra em dois problemas críticos:

- a) implica em manter por um longo tempo o operador envolvido no processo, disparando, travando e anotando dados em planilhas, com elevado índice de alocação do espaço laboratorial nas cercanias do equipamento padrão;
- b) acaba impondo à medição uma carga de incerteza de elevada magnitude, especialmente se comparada à incerteza associada intrinsecamente aos padrões de tempo e frequência hoje difundidos ( $\Delta f/f$ ), como os baseados nas propriedades ressonantes do quartzo e do rubídio, entre  $10^{-8}$  e  $10^{-12}$ .

As complicações advindas do *espaço x tempo* laboratorial alocado para cada cronômetro vão um pouco além das questões óbvias relacionadas ao custo homem-hora e equipamento-hora tradicionais. Calibrações prolongadas por vários dias facilitam a ação de agentes interferentes não previsíveis, como faltas de energia elétrica, flutuações ambientais provocadas por falhas nos sistemas automáticos de manutenção, danos provocados por ação inadvertida do pessoal da limpeza e desgaste das pilhas e baterias, para não falar de eventos mais improváveis, como furto, roubo e incêndio nas instalações do laboratório. A própria utilização dos cronômetros, por outro lado, está limitada geralmente à medição de curtos intervalos de tempo, o que contrasta com os cinco a sete dias em que o instrumento permanece, como regra geral, dentro do laboratório de calibração. De qualquer forma o princípio de operação deste tipo de instrumento permite extrapolações baseadas na proporcionalidade entre os erros encontrados e seus respectivos intervalos de amostragem, desde que seja observado um período

---

mínimo necessário para que eventuais flutuações periódicas de apresentação no mostrador sejam compensadas, apontando para um valor médio convergente.

A influência da operação humana no disparo e travamento do cronômetro sob calibração, porém, representa o principal empecilho técnico que obstrui a obtenção de incertezas menores no processo. O tempo de resposta humano é relativamente grande e não-repetitivo, oscilando em torno de dezenas a algumas centenas de milissegundos a cada operação, de modo que não se pode garantir incertezas globais muito abaixo de 1 segundo para processos ortodoxos de calibração, apesar de a maioria dos cronômetros possuir resolução de centésimos, e alguns até milésimos, de segundo. De acordo com a pesquisa comentada anteriormente, desenvolvida com a cooperação do Instituto de Psicologia da PUCRS, através do seu Centro Psicotécnico (ver item 2.4), foi evidenciado que o tempo de resposta a estímulo visual e auditivo não-repetitivo pode atingir 0,4 segundo, considerando vários operadores em dias e horários distintos. Apesar da limitação projetiva de pesquisas desta natureza é lícito que se suponha que as demais pessoas compartilhem de tempos de resposta semelhantes.

Este número pode sugerir, entretanto, que não haja necessidade de minimizar a incerteza resultante do processo de calibração, já que a utilização do instrumento no ambiente industrial subentende um operador humano que, de qualquer modo, introduz uma incerteza de elevado valor. Argumentos desta natureza podem ser descartados aprioristicamente porque todo trabalho metrológico deve buscar a redução dos custos e das incertezas, sejam de origem ambiental, operacional ou humana, e é o que se tem conseguido com o aperfeiçoamento dos processos. Idealmente o procedimento de calibração deve eliminar completamente a influência do operador metrologista, de forma a permitir ao cliente projetar precisamente sua incerteza, baseada nas suas próprias condições de manuseio, inclusive porque existem casos nos quais o usuário aplica o cronômetro como parte de um sistema de medição que opera independentemente de reação manual. Além disto há a necessidade de reduzir a incerteza do cronômetro para pelo menos 1/10 da principal fonte de incerteza na medição de tempo – o operador – de forma que a influência da incerteza do cronômetro no balanço de incertezas possa ser desprezada, isto é, não introduza parcela significativa.

Outro problema associado ao método tradicional de calibração de cronômetros é a impossibilidade de levantar rapidamente o erro na unidade de tempo, ou erro relativo. A determinação deste erro exige um longo intervalo de tempo de medição, necessário para que a diferença de indicação entre o cronômetro e o padrão atinja a resolução da leitura digital e fique explícita visualmente no mostrador do instrumento. Este intervalo de tempo mínimo é da ordem de  $10^2$  ou  $10^3$  segundos, para cronômetros operando com indicação de centésimos de segundo, e corresponde à razão entre uma

unidade de tempo equivalente à resolução do cronômetro e o erro unitário da base-de-tempo interna, geralmente da ordem de poucas unidades de microssegundos por segundo.

Este tempo mínimo de calibração, porém, não pode ser aplicado ao processo manual porque a incerteza injetada pela operação humana tem valor duas ou mais ordens de grandeza superior à resolução do cronômetro, nos seus limites de medição básicos. Na prática, os cronômetros sob calibração medem intervalos de tempo bem maiores de forma a permitir que o erro integralizado atinja pelo menos a ordem de grandeza da incerteza acrescentada ao processo pelo operador. O operador pode, assim, calcular o erro relativo, o que é feito a partir da divisão do erro total pelo intervalo de tempo de cronometragem.

As limitações do método ortodoxo acabam gerando a necessidade de permanência do cronômetro a calibrar, dentro do laboratório metrológico, por um período de até sete dias, incluindo um dia para recebimento e despacho e um dia para climatização pré-calibração. Esta demora excessiva obriga o cliente a adquirir um número maior de unidades de reserva, calibrando-as também. Outra consequência negativa é o custo elevado associado a um trabalho metrológico tão longo, envolvendo metrologistas, equipamentos padrão, energia e riscos associados, além da incerteza injetada pelo operador, centenas de vezes maior que a resolução do mostrador de alguns cronômetros.

Para evitar as limitações do processo de calibração manual de cronômetros, portanto, este trabalho desenvolve, apresenta e avalia metrológica e operacionalmente um sistema automático de calibração óptica de cronômetros, mecânicos ou eletrônicos, capaz de completar a tarefa num prazo tipicamente inferior a uma hora, praticamente sem interferência humana. Atualmente dois sistemas semelhantes se encontram em operação no LABELO-PUCRS, em Porto Alegre. Estes sistemas reduzem por um fator próximo a  $10^3$  o produto *tempo de bancada X incerteza de medição* associado a uma calibração de cronômetro, permitindo que o operador defina, dentro de certos limites, a incerteza pretendida no serviço específico que realiza, otimizando seu custo em relação à necessidade do usuário solicitante, eliminando todas as limitações do método manual.

## 6.2 – Princípios de operação

O Sistema Automatizado de Calibração Óptica de Cronômetros, ou simplesmente SISLOC, captura opticamente a variação periódica do índice de reflexão de certas partes do mostrador de cristal líquido de cronômetros e relógios digitais, ou a modificação do ângulo de reflexão produzida em um feixe LASER focalizado sobre um plano imaginário que contém o ponteiro móvel de interesse, em

cronômetros e relógios mecânicos. Em instrumentos digitais esta pulsação pode ser capturada em diversos segmentos diferentes do mostrador, de modo que não ocorre nenhum caso de incompatibilidade, além de manter uma relação de proporcionalidade direta, ou pelo menos repetitiva, estável e convergente, com relação à frequência da base-de-tempo interna, de cristal de quartzo, do cronômetro.

No mostrador dos cronômetros digitais existem segmentos pulsantes com períodos de 0,5 segundo e 1 segundo, usualmente, e menos freqüentemente de 2 segundos, e conforme o modelo de cronômetro pode-se dispor de um número menor ou maior de pontos de captura, mas sempre há pluralidade de possibilidades, permitindo que seja feita uma escolha preferencial a fim de manter uma certa uniformidade nos dados recolhidos e no tratamento matemático a eles aplicado. Seja qual for o ponto de captura, porém, o período médio da pulsação é um indicativo fiel do comportamento do cronômetro e pode ser extrapolado para um intervalo de tempo qualquer, definido como unitário. A variável operacional, neste caso, é o período no qual o cronômetro fica sob a observação do *Sistema*, definido automaticamente a partir da regularidade com que pulsa o segmento escolhido.

A captura desta pulsação ocorre simplesmente focalizando um feixe luminoso intenso e colimado sobre o ponteiro, ou segmento pulsante, fazendo incidir uma amostra do feixe refletido sobre um foto-receptor de baixa inércia elétrica (resposta rápida). O sinal elétrico de saída deste foto-receptor reflete a pulsação luminosa do mostrador do cronômetro, tendo o mesmo período instantâneo deste, já que os tempos de comutação do foto-elemento são 8 a 10 ordens de grandeza menores que o intervalo medido. O envio deste pulso diretamente a um contador de tempo (período) produz geralmente bons resultados, mas a variação na intensidade instantânea de iluminação ambiente, como a que pode ser esperada pela aproximação do operador, por exemplo, tende a induzir uma leve variação na relação *tempo-alto/tempo-baixo* do sinal, produzindo leituras flutuantes no período instantâneo indicado no contador, que podem ser interpretadas como falhas na captura ou simplesmente retardam a finalização da calibração.

Para otimizar a operação da interface óptica do primeiro protótipo o sinal elétrico de saída do elemento de captura foi formatado através de um amplificador paramétrico, adaptado para liberar apenas um pulso a cada transição baixo-alto ou alto-baixo. A largura deste pulso foi definida eletricamente através de um circuito monoestável padrão, com realimentação a cristal piezoelétrico, mantendo-o sob estreitos limites, bastante imune a variações de condições ambientais ou elétricas. No segundo protótipo, em vista da melhoria significativa na qualidade do sistema óptico empregado, um simples circuito disparador foi intercalado entre o elemento sensor e o contador. Em acréscimo, para

---

evitar que flutuações sejam consideradas, o SISLOC utiliza um modo de integração baseado nas funções estatísticas incorporadas ao contador, que é programado para devolver a média de um certo número de amostras, obtendo um valor adequadamente estável e convergente.

Com estas duas técnicas a instabilidade da leitura direta no contador cai a valores da ordem de  $1 \times 10^{-7}$ , nitidamente inferior à instabilidade inerente a qualquer base-de-tempo convencionalmente usada em cronômetros. O processamento estatístico realizado pelo contador é complementado, então, pelo programa de gerenciamento do sistema, baseado em computador pessoal, que automatiza completamente o processo de calibração.

Na prática a flutuação dinâmica das bases-de-tempo de relógios e cronômetros usuais é da ordem de  $1 \times 10^{-6}$  a  $1 \times 10^{-7}$  s/s, embora leituras ópticas instantâneas normalmente conduzam a flutuações de dezenas de microssegundos por segundo, o que não reflete a realidade da base-de-tempo, mas sim as características de processamento interno do cronômetro associadas às do mostrador de cristal líquido. Os erros, medidos normalmente sob longos intervalos de tempo, estão compreendidos abaixo de uma dezena de segundos por dia, o que corresponde a um erro máximo unitário de cerca de uma centena de microssegundos por segundo. Desvios de um décimo de segundo por dia, impossíveis de serem detectados pelo método tradicional, correspondem à resolução de um microssegundo por segundo, que pode ser assumido como a incerteza máxima aceitável de um sistema automatizado de calibração de cronômetros. Como consequência direta qualquer medida que possa ser feita com incertezas embutidas iguais ou inferiores a uma unidade de microssegundo por segundo resulta em uma calibração igual, ou melhor, do que a obtida após 24 horas de observação através do método tradicional.

Como os períodos considerados são da ordem de 0,5 ou 1 segundo, grandes em relação aos associados à oscilação da base-de-tempo (32768 Hz), usualmente não é indicada a opção tradicional de determinação de período através da medição do número de pulsos gerados pelo sistema a ser calibrado num certo intervalo de tempo, definido pelo sistema padrão. Este processo, normalmente utilizado em freqüencímetros, é adequado para medição de períodos curtos, de sinais de altas-freqüências, mas implica em longos tempos de amostragem para sinais mais lentos. No caso em questão foi imprescindível que o contador estivesse adaptado para medição de períodos longos, processando inversamente a informação. Neste caso o contador mede o período do sinal aplicado através da contagem do número de pulsos internos, de sua própria base-de-tempo ou de base padrão externa, que ocorrerem entre dois pulsos sucessivos do sinal sob medição, o que permite que o período

instantâneo possa ser conhecido, pelo menos em tese, imediatamente após um único ciclo de comutação do sinal de entrada.

A incerteza deste processo pode ser muito baixa, dependendo da frequência do sinal da base-de-tempo de referência e da precisão do circuito discriminador de pulsos do contador, mas sempre será no mínimo igual a um período da frequência da base, para um único ciclo de contagem. Na prática apenas alguns poucos modelos de cronômetros traduzem a frequência da base-de-tempo interna em termos de comutações de segmento de mostrador de forma suficientemente estável para que uma única medida represente de fato aquela frequência. As flutuações periódicas no intervalo de tempo entre comutações de segmentos pulsantes, geradas pelo processamento interno das interrupções de programação dos cronômetros e pela instabilidade na comutação do cristal líquido, porém, podem ser isoladas da parcela fixa e repetitiva de tempo por integração de períodos maiores, de forma semelhante ao processo utilizado nos protótipos.

### 6.3 - Diagrama de blocos

O Sistema Automatizado de Calibração Óptica de Cronômetros, materializado nos protótipos em operação no LABELO-PUCRS, consiste das seguintes partes, explicitadas no diagrama de blocos da figura 6.1 e detalhadas logo abaixo :

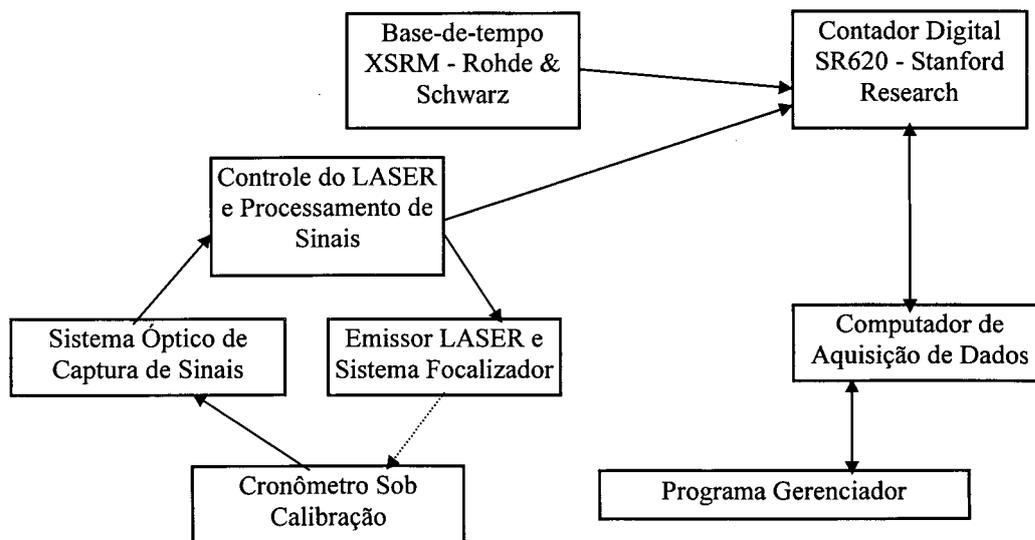


Figura 6.1 – Diagrama de blocos do Sistema

#### a) Unidade de controle do LASER e processamento de sinal

Responsável pelo controle de intensidade do LASER, produção dos sinais sonoro e visual de sincronismo e formatação do sinal elétrico provindo do foto-receptor, esta unidade ainda integra o sistema de aterramento e isolamento eletromagnético e a fonte de alimentação.

A fonte é simples, de 10 V, regulada e protegida contra ruídos de alta-frequência induzidos na linha. O sinal de entrada é primariamente aplicado a um amplificador integrado paramétrico, cujo fator de amplificação é corrigido automaticamente (no primeiro protótipo), em uma ampla faixa, dependendo da relação CC/CA presente no sinal de entrada que provém do foto-receptor. Este tratamento visa ampliar artificialmente o contraste na relação claro-escuro definida pela refletividade do mostrador. Esta característica varia sensivelmente em função da ampliação óptica utilizada, da intensidade do LASER, do ângulo entre a reflexão polarizada do cristal líquido e a polarização do feixe LASER, além da iluminação ambiente e da área do ponto de captura no mostrador. Na saída desta etapa o *Sistema* fornece um sinal bastante definido, o mais aproximado possível de um sinal digital, à etapa seguinte. Conjugado a este amplificador há um sistema de filtro do tipo *passa-baixas*, encarregado de evitar a interferência de pulsações espúrias produzidas, por exemplo, pela cintilação das lâmpadas fluorescentes da iluminação ambiente.

Um circuito disparador de rampa ascendente (nos dois protótipos) se encarrega de produzir um sinal digital de período igual ao do ponto focalizado no cronômetro, e excita, por sua vez, um gerador de *bips*, responsável pelo sincronismo sonoro, um sinal pulsante apropriado para excitar o LED (Light Emitter Diode) ou LCD (Liquid Crystal Display) de sincronismo óptico, e um monoestável de relação tempo alto/tempo baixo extremamente pequena ( $\sim 1/1000$ ).

#### **b) Sistema mecânico de posicionamento do feixe LASER**

Responsável pela movimentação nas coordenadas XY do emissor LASER do sistema óptico, de forma a permitir o ajuste de convergência do feixe e focalização do ponto de reflexão no mostrador, consistia em um mecanismo posicionador de lâminas de um microscópio desativado. No segundo protótipo este sistema mecânico pode ser omitido e o LASER ficou acoplado diretamente ao sistema óptico, de forma que a regulagem do foco da objetiva do estereoscópio simultaneamente posiciona e focaliza o feixe luminoso incidente. Em junho de 1998 foi finalmente retirado do primeiro protótipo, que também passou a integrar a fonte LASER e o sistema de captura óptica numa única unidade.

#### **c) Sistema óptico de captura do feixe refletido**

Circuito de interfaciamento óptico-elétrico do sistema, consiste, no primeiro protótipo, de um Estereoscópio IMPAC - Tokyo - de fator de magnificação de objetiva zoom de 0,7X a 4,5X e oculares de 20X, enquanto no segundo protótipo foi usado um Estereoscópio STEMI – DRC com ocular de 20X e objetiva 6,3X. O emissor LASER consta de um diodo produzido pela *Infiniter* para as canetas *LASER pointer*, comuns no mercado. Capaz de se adequar aos diferentes cronômetros e à quase totalidade dos pontos de captura disponíveis, forma a imagem do segmento escolhido, ou do ponteiro, sobre o receptor fotoelétrico empregado, permitindo que o operador proceda o correto posicionamento do cronômetro. A característica principal deste bloco é o fator de ampliação do estereoscópio, que deve ser suficiente para que o ponto refletivo de captura de qualquer cronômetro possa ser ampliado até ocupar quase todo o campo visual, impedindo reflexões espúrias no fundo do mostrador.

Além das duas oculares o estereoscópio do segundo protótipo possui uma saída que foi aproveitada para a instalação de uma câmera de vídeo que permitiu a otimização da direção de incidência do feixe luminoso, antes da fixação definitiva do emissor LASER. A câmera é dispensável na operação normal do sistema, mas pode ser usada para facilitar ao operador a busca de um posicionamento que minimize reflexões espúrias e evite os ângulos críticos (cegos) que ocorrem quando o polaróide do mostrador do cronômetro está à 90° com a direção do campo elétrico do feixe LASER.

#### **d) Contador digital de períodos longos**

Recebe o sinal pulsado diretamente do monoestável ou disparador, fornecendo seu período. É adequado à recepção do sinal elétrico produzido pela etapa de processamento de sinal e permite tratamento estatístico aos sinais de entrada, sendo capaz de medir intervalos de tempo da ordem de 1 segundo com resolução de  $1 \times 10^{-12}$  s, admitindo fonte externa de base-de-tempo, além de gerenciamento e aquisição de dados via microcomputador. O *SR 620 - Universal Timer Interval Counter* - da *Stanford Research Systems*, que atende a todas estas especificações foi aplicado nos dois protótipos.

#### **e) Base-de-tempo padrão**

Fonte de frequência de referência usada como *clock* externo do contador, eliminando a necessidade de calibração de seu relógio interno, assim como a incerteza associada. Foi usado um *Rubidium Frequenzstandard XSRM* da *Rohde & Schwarz*, com sua saída de 5 ou 10 MHz.

#### **f) Computador para aquisição e tratamento dos dados**

Em cada protótipo o contador digital utilizado foi conectado a uma porta de comunicação serial de um microcomputador, permitindo aos dados de saída da medição de período processamento automático até a finalização da calibração. Esta mesma conexão permite que o programa de gerenciamento faça alterações nos parâmetros de configuração do contador sempre que situações específicas forem detectadas. Os dados, diretamente armazenados num arquivo temporário no disco rígido, permitem a posterior plotagem de um gráfico para a observação das flutuações das leituras, assim como as possíveis correlações que estas flutuações possam ter com eventos externos. A análise destes dados armazenados permite também a identificação do momento em que as leituras estatisticamente processadas apontam para um período médio representativo, que pode ser anotado e usado como dado para uma eventual correção do programa gerenciador.

Um programa gerenciador do sistema, capaz de adquirir informações diretamente do contador digital, processando-as e retroagindo de forma a modificar os parâmetros de amostragem do próprio contador, foi elaborado para uso com o primeiro protótipo. O objetivo da rotina foi dotar o sistema de capacidade de adaptação automática a diferentes tipos de cronômetros e posicionamentos LASER-cronômetro-interface óptica, convergindo para um valor de período representativo no mais curto espaço de tempo possível, além de eliminar dados espúrios e fornecer diretamente os dados para emissão do certificado de calibração do cronômetro. No segundo protótipo os parâmetros de amostragem não mais foram deixados sensíveis às condições de calibração porque a comparação dos dados deixou claro que os melhores resultados eram sempre obtidos com baixo número de amostras de longos períodos.

### **6.4 – Calibração de cronômetros**

#### **6.4.1 - O que pode ser calibrado**

Todo o cronômetro cuja interface instrumento-operador inclua um segmento luminoso pulsante, ou com mudança de índice de reflexão, ou que disponha de um movimento tal que permita a interrupção síncrona de um feixe de luz incidente, pode ser calibrado pelo SISLOC. O ponto de captura pode ser inclusive o segmento vertical inferior direito do dígito de sete segmentos relativo aos décimos de segundo, que pulsa regularmente a cada ciclo de dez décimos de segundo, ou um segundo. Até julho de 1998 cerca de 1500 cronômetros de vários tipos, marcas e modelos, tinham sido testados, não sendo detectadas incompatibilidades excludentes com nenhum instrumento específico,

---

confirmando a tese de que o *Sistema* pode ser aplicado à totalidade dos casos de calibração de cronômetros industriais de mão hoje existentes. No anexo 9 é mostrado um procedimento para calibração de cronômetros via SISLOC.

Em princípio o sistema permite a calibração de qualquer cronômetro ou temporizador cujo mostrador de cristal líquido (LCD) seja constante e automaticamente atualizado ou disponha de um ponto pulsante através dos quais possa ser feita a mira do feixe LASER. Cronômetros ou temporizadores com mostrador de LED, mais raros, podem também ser calibrados sem a necessidade de um feixe LASER de incidência, já que o próprio segmento se encarrega de fornecer a luz necessária ao acompanhamento. Acessoriamente, resultados satisfatórios foram obtidos nos testes de compatibilidade do SISLOC com cronômetros mecânicos embora o período de amostragem deva necessariamente ser reduzido. Nestes casos a captura de pulsos ocorre quando o ponteiro dos segundos, o mais rápido, interrompe a reflexão do feixe LASER incidente no fundo do mostrador, desviando a luz para fora do foco do sistema óptico de captura. O período entre pulsos coincide com o tempo de rotação do ponteiro, 60 segundos (ou 30, ou 100, em alguns casos), e a queda gradual de tensão na mola exige uma redução no tempo de amostragem de forma a se obter uma leitura estável, com flutuação compatível com o grau de incerteza do processo.

A sensibilidade do *Sistema* fica visível de forma contundente no caso de calibração de cronômetros mecânicos quando estes são deixados sob amostragem continuada por algumas horas. O *drift* causado pela lenta redução na tensão da mola de impulsão (*corda*) destes cronômetros fica claramente destacado da componente aleatória do período de rotação do ponteiro. De qualquer modo a presença de cronômetros analógicos em processos industriais vem se tornando cada vez menos freqüente devido ao baixo custo e precisão dos atuais cronômetros digitais, com perceptível tendência à breve extinção de seu uso. A relação entre o número de cronômetros mecânicos e o número de cronômetros digitais de uso industrial que chegam para calibração já é próxima a 1:10.

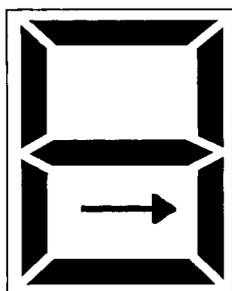
#### **6.4.2 - Procedimento básico**

O processo de calibração de cronômetros através do sistema automatizado abrange operações variadas, de natureza mecânica, elétrica e óptica, como segue:

##### **6.4.2.1 - Escolha do ponto de captura**

Nesta etapa o operador observa o mostrador do cronômetro, elegendo um determinado ponto de captura de sinais. De modo geral existe um ponto pulsante entre os algarismos de horas e minutos, entre os de minutos e segundos, ou entre os de segundos e centésimos ou milésimos, que pode ser usado, mas muitos cronômetros têm um ponto separado, de dimensões maiores, que pulsa a intervalos de meio ou um segundo. Em quase todos os cronômetros o ponto pulsante está sempre visível, mas há casos onde ele somente aparece quando uma função exclusiva está ativa. Não há restrição absoluta em relação às dimensões ou à forma do ponto de captura, desde que o sistema de focalização do feixe LASER e o sistema de ampliação e focalização da imagem funcionem adequadamente, permitindo que o foco luminoso incidente possa ficar inscrito no ponto de captura e que este possa ser ampliado até ocupar a maior parte do campo visual da ocular. Em termos práticos bons resultados podem ser alcançados mais rapidamente quando o ponto disponível é maior.

Nos casos de exceção à regra, quando o cronômetro digital não dispõe de nenhum dos pontos acima mencionados, pode-se utilizar o segmento vertical inferior direito do algarismo dos décimos de segundo, do algarismo dos segundos, das dezenas de segundos ou até dos minutos. Este segmento, denominado C e mostrado na figura 6.2, permanece ativo em todos os algarismos representados pelo dígito, exceto o 2, o que faz com que possamos obter uma reflexão nítida a cada ciclo completo de dez comutações, ou 1 segundo, 10 segundos, 60 segundos ou 600 segundos, respectivamente.



**Figura 6.2 – Segmento utilizável pelo SISLOC**

Nos cronômetros mecânicos deve-se ter a preocupação de evitar que a reflexão do feixe LASER seja dupla, isto é, que o ponteiro móvel interrompa o feixe incidente e, no momento seguinte, o feixe refletido pelo fundo do mostrador. Basta uma pequena abstração geométrica para compreender que, desde que o feixe LASER incidente não seja perpendicular à superfície do cronômetro, haverá reflexões duplas sempre que o plano vertical que contém o feixe LASER incidente e refletido não coincida com o plano vertical que contém o ponteiro móvel, no momento da interrupção do feixe. Uma regra prática para escolher adequadamente o ponto de captura é fazer com que ocorra a

---

interrupção somente quando as projeções do ponteiro e do feixe LASER, no plano horizontal, forem colineares.

#### **6.4.2.2 - Focalização do sistema óptico**

##### **6.4.2.2.1 – Em cronômetros com mostrador LCD**

No caso de cronômetros digitais com mostrador de cristal líquido o operador coloca o cronômetro sobre a mesa do estereoscópio, aciona o interruptor que alimenta o LASER, posiciona o cronômetro de forma que a mira do feixe LASER atinja uma parte do mostrador LCD que não possua nenhum segmento (fundo cinza) e rotaciona lentamente o cronômetro no plano horizontal procurando uma posição na qual o brilho da reflexão do feixe LASER no fundo do mostrador seja máxima.

Como o LASER é uma luz coerente e polarizada, interage com a rede polarizadora presente invariavelmente nos mostradores de cristal líquido, podendo inclusive anular a reflexão do feixe, fenômeno que ocorre quando as direções de polarização são mutuamente perpendiculares, formando entre si o ângulo crítico de  $90^\circ$ . Na prática existe um ângulo ótimo, que pode ser descoberto experimentalmente pelo operador, no qual a reflexão e a relação claro-escuro é máxima, bastando observar a intensidade de reflexão em função do giro horizontal do cronômetro, mantendo fixo o ponto pulsante, que age como se fosse o centro de rotação.

Este procedimento não é condicional, podendo a calibração normalmente dispensar a busca deste ângulo ótimo, mas resultados mais estáveis são obtidos com menor número de leituras se este critério for considerado pelo operador, o que aumenta a velocidade da calibração, melhorando a produtividade. Apenas em casos especiais, quando o ponto de captura é extremamente pequeno, pode ser absolutamente imprescindível que o operador considere esta propriedade óptica da interação entre o LASER e a lâmina polaróide do mostrador.

Definido este ângulo o operador translada o cronômetro sem girá-lo, posicionando o segmento escolhido para captura exatamente sob a mira do feixe LASER. Em seguida o operador corrige a altura da objetiva, através do botão lateral de ajuste, observando que há uma altura máxima e uma altura mínima entre as quais ocorre a captura, quando o LED e o sinal sonoro acusam a pulsação. É recomendável que o sistema capture a pulsação aproximadamente no centro dos limites inferior e superior de altura da objetiva, garantindo que movimentos pouco perceptíveis, como os causados por

vibrações mecânicas na bancada, não consigam desfocar o feixe LASER a ponto de introduzir ruído na captura óptica.

#### **6.4.2.2.2 – Em cronômetros com mostrador de LED**

Em cronômetros digitais com mostrador de LED o procedimento é o mesmo, excetuando-se o fato de que neste caso não há necessidade de girar horizontalmente o cronômetro buscando a melhor reflexão do feixe LASER, porque o sistema captura a própria luz do LED.

#### **6.4.2.2.3 – Em cronômetros mecânicos**

Em cronômetros mecânicos o feixe LASER deve ser posicionado num ponto próximo à periferia do mostrador, de forma que o ponteiro escolhido para captura, e somente ele, passe com sua extremidade sob a luz. É importante que o fundo do mostrador sobre o qual o LASER fica apontado tenha um coeficiente de óptico de reflexão diferenciado em relação ao ponteiro móvel, para que a passagem deste produza um contraste suficiente para a excitação do disparador. Por exemplo, se o ponteiro é escuro, o LASER não deve ser apontado para letras ou outras marcas existentes no fundo do mostrador cujas cores também sejam escuras, mas sim para regiões claras ou espelhadas, e vice-versa.

Em qualquer caso o feixe LASER não deve incidir perpendicularmente em relação à tampa transparente que protege o mostrador, porque esta superfície é muito polida e gera uma reflexão intensa que mascara a modulação da pulsação do segmento ou ponteiro. Para evitar a perpendicularidade a base sobre a qual repousa o cronômetro já possui uma inclinação próxima a  $10^\circ$  em um dos protótipos, enquanto o outro possui uma base articulada que permite ao operador gerar esta inclinação.

#### **6.4.2.3 - A configuração do contador**

Com o comando do programa gerenciador, desenvolvido especificamente para os protótipos, o operador apenas precisa posicionar adequadamente o cronômetro e pressionar a tecla de início. O computador faz um rastreamento da estabilidade do cronômetro e automaticamente instruí o operador caso alguma medida corretiva deva ser tomada. Após a determinação do período nominal do ponto pulsante escolhido o sistema inicia a captura de dados para cálculo do período médio associado até que uma parcela mínima de amostras tenha sido capturada, quando o programa pode calcular a incerteza

---

parcial da medição num processo que continua até que haja comando externo de parada ou que a memória de armazenamento tenha se esgotado.

### 6.5 – O programa de gerenciamento

Os protótipos do SISLOC utilizam um programa de gerenciamento realizado especificamente para este fim, a partir da linguagem BASIC do MS-DOS e das instruções e comandos do protocolo de comunicação aceito pelo contador digital programável SR620 da Stanford Research Systems. Este programa, além das rotinas de tela, possui as seguintes características de processamento :

- Aceita *modo demonstrativo* para atualização rápida da tela ;
- Aceita *modo de alta resolução* ( $1 \times 10^{-12}$ s) para rotinas de auto-calibração ;
- Roda em *modo normal* com resolução de centésimos de segundo ;
- Gerencia o contador digital programável SR620 ;
- Fornece erro e incerteza para diversos períodos, na tela e no relatório impresso ;
- Avisa quando a calibração pode ser encerrada ;
- Gera um arquivo seqüencial com as leituras em modo texto, para impressão posterior de gráficos ;

Na seqüência é apresentado um diagrama de macrofunções e etapas lógicas do programa gerenciador.

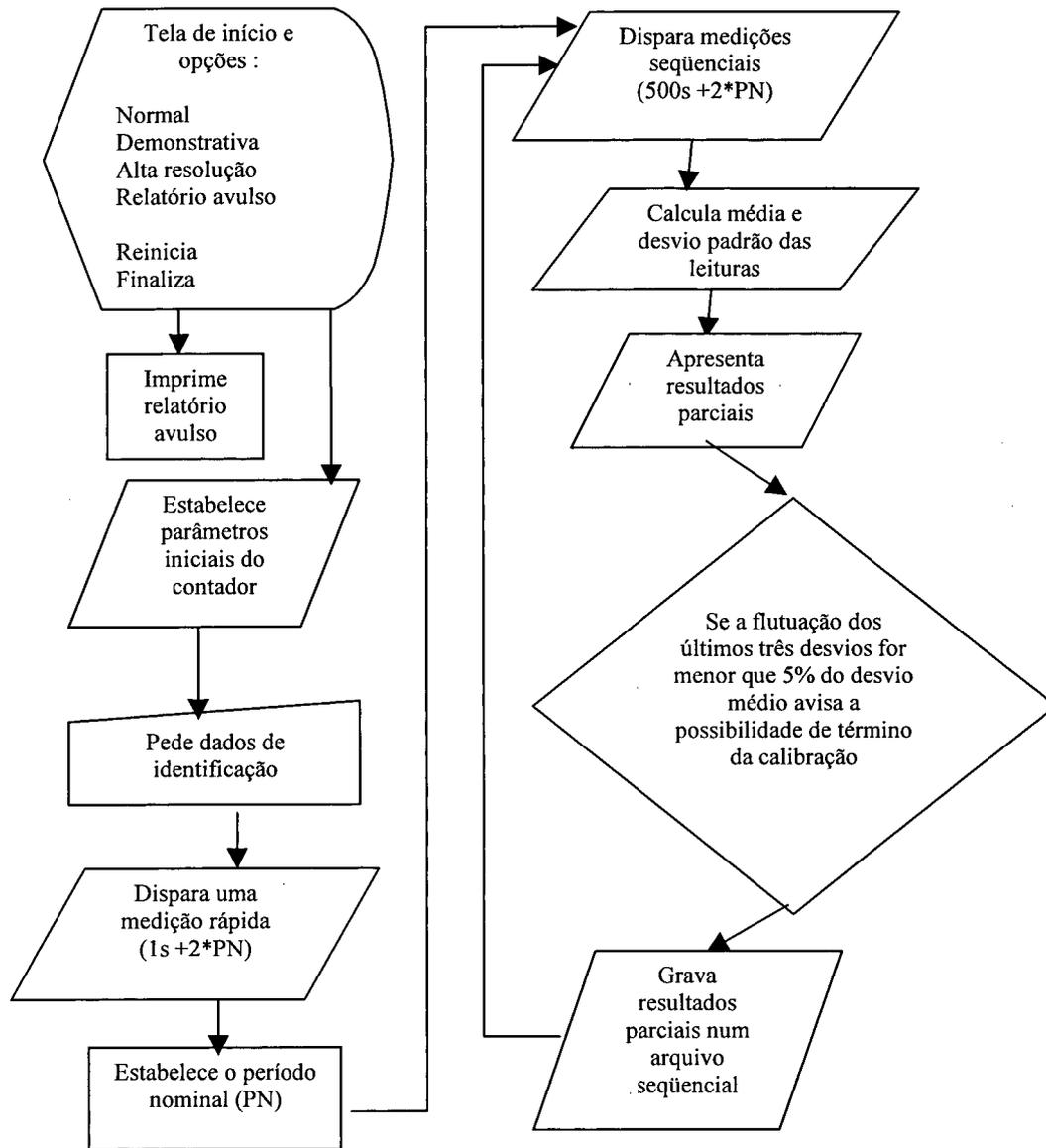


Figura 6.3 – Macrofunções do programa gerenciador

6.5.1 – Utilização do programa de gerenciamento

Estando a conexão elétrica entre a porta de comunicação serial do computador e a entrada do contador realizada, o cronômetro posicionado e o sinal pulsante sendo capturado pelo sistema óptico, basta clicar duas vezes sobre o ícone do programa gerenciador denominado SISLOC, na tela principal do ambiente Windows. Uma janela se abre mostrando a tela de abertura, conforme mostrado na figura 6.4.

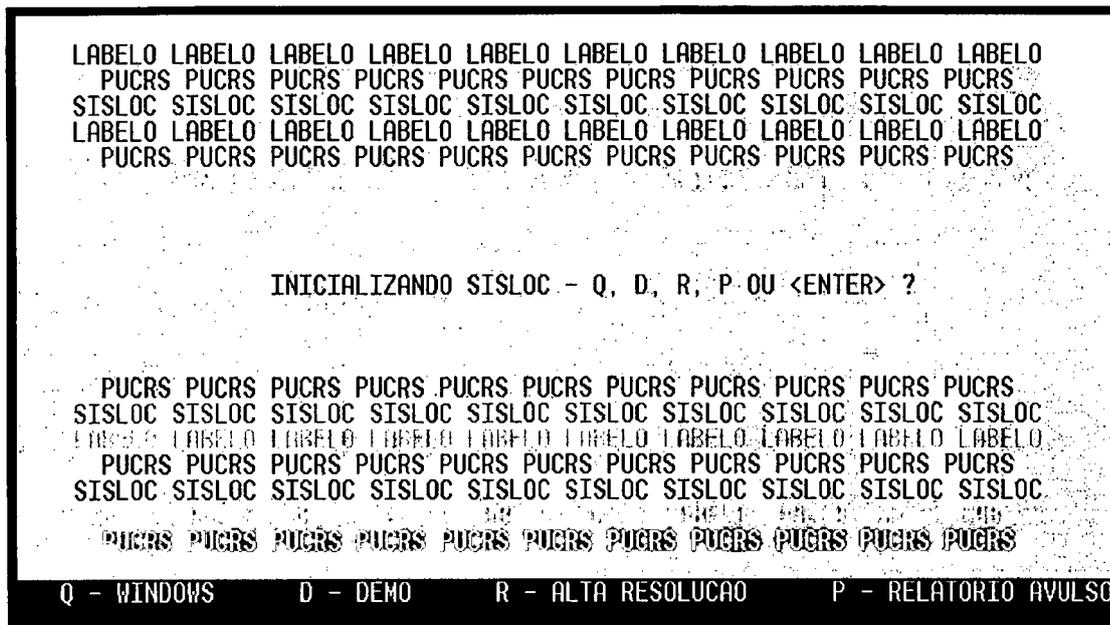


Figura 6.4 – Tela de abertura do programa gerenciador do SISLOC

O operador pode escolher entre cinco opções :

- Pressionando Q o programa finaliza e devolve o comando ao Windows.
- Pressionando P o programa desvia para uma subrotina de impressão avulsa de relatórios. Uma tela especial solicita a entrada dos dados avulsos e imprime um relatório semelhante ao emitido pelo sistema ao final de uma calibração normal.
- Pressionando D o programa desvia para uma subrotina na qual as medições seqüenciais mantêm ciclos curtos de amostragem ( $1s+2*PN$ ) e atualização dinâmica da tela. As flutuações nas leituras são normalmente grandes neste modo de amostragem em função do tempo morto característico do contador. Os resultados do modo Demo não tem valor metrológico e servem apenas para demonstrar a operação do sistema.
- Pressionando R o programa desvia para uma subrotina de medição semelhante ao modo de calibração normal, cujos resultados porém são mostrados com todos os algarismos disponíveis no contador. Somente neste modo de Alta Resolução é possível detectar a contribuição do sistema na incerteza resultante de uma calibração de cronômetros, assim como efetuar a calibração do próprio sistema.
- Pressionando <Enter> o programa aciona a rotina principal, ou modo Normal.

No caso de o operador optar pelo modo Normal, modo Demo, ou modo de Alta Resolução uma nova tela solicita a entrada do número do protocolo de admissão do cronômetro a calibrar, assim como

o nome do operador. Nesta mesma tela são apresentados os códigos de identificação dos padrões utilizados na calibração e a data, como pode ser observado na figura 6.5.



Figura 6.5 – Tela de entrada de dados de identificação da calibração

Finalizada a identificação, imediatamente o contador recebe instruções e inicia uma medição para determinação do período nominal (PN), operação que demora duas vezes o período de pulsação do ponto escolhido mais 1 segundo. O período nominal PN é mostrado no canto superior esquerdo da tela de resultados parciais enquanto uma nova medição tem início. Após dois ciclos de amostragem e a cada nova leitura, cada uma consumindo um tempo equivalente a 500 segundos mais duas vezes o período de pulsação ( $500s+2*PN$ ), o Sistema calcula o desvio padrão do conjunto de dados recolhidos, avisando o operador que a calibração pode ser encerrada desde que flutuações menores que 5% ocorram entre cada um dos três últimos desvios calculados e sua média. Na verdade, como o número de leituras suficiente para a finalização da calibração usualmente é baixo, o desvio padrão não é empregado diretamente em nenhuma etapa do programa gerenciador. Todos os processamentos envolvendo o desvio padrão das leituras corrigem seu valor multiplicando-o pelo coeficiente de Student correspondente.

As telas de apresentação de resultados parciais correspondentes aos modos Demo, Normal e de Alta Resolução são semelhantes, exceto pelo número de Algarismos e pelo rótulos Demo ou Alta Resolução que aparecem na linha inferior da tela. Nas figuras 6.6 e 6.7 são mostradas as telas de resultados parciais do modo Normal e do modo de Alta Resolução, respectivamente.

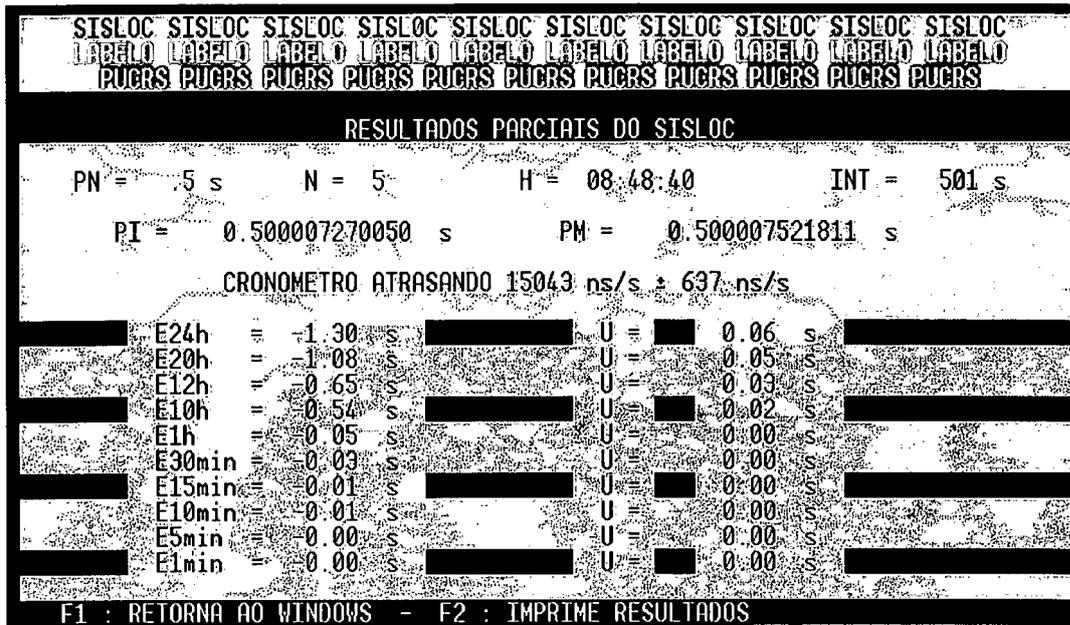


Figura 6.6 – Tela de resultados parciais do modo Normal

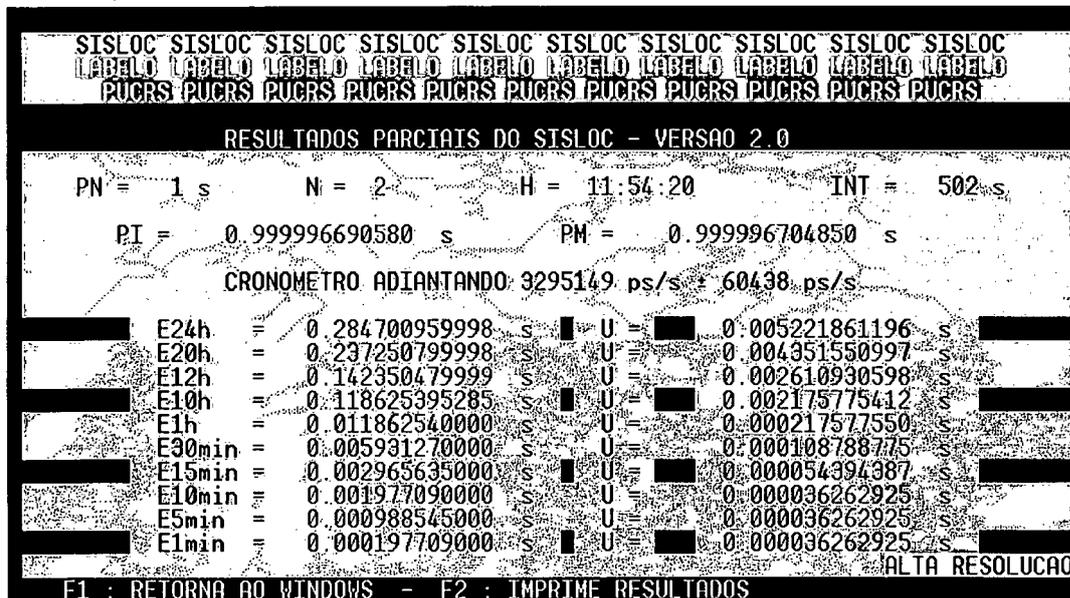


Figura 6.7 – Tela de resultados parciais do modo de Alta Resolução

Nesta tela de apresentação de resultados parciais PN representa o período nominal de pulsação do ponto de captura para o qual o feixe LASER está apontado. Como este valor não pode ser inferido diretamente pelo resultado das medições ele é tomado por aproximação a partir de uma tabela embutida no programa. N representa o número de leituras transmitidas pelo contador para o computador até o momento H, que é o instante da última leitura (hh:mm:ss), segundo o relógio interno do computador. INT é o período de tempo entre leituras sucessivas. PI, ou período instantâneo, é o valor da última leitura recebida. PM é o período médio correspondente às N leituras recebidas.

---

A diferença entre PM e PN é o valor mais provável do erro do cronômetro, considerando as N leituras, e é a partir deste dado que o programa calcula o quanto o cronômetro está atrasando ou adiantando em 1 segundo, resultado que é informado no centro da tela em nanossegundos por segundo. O desvio padrão experimental da média das N leituras, multiplicado pelo coeficiente de Student para 95% de confiabilidade, é apresentado como a incerteza sobre o resultado atual da calibração, também em nanossegundos por segundo.

Nas linhas seguintes da tela de apresentação de resultados parciais o erro e a incerteza são apresentados para uma série de intervalos de tempo usualmente solicitados pelos clientes de calibração de cronômetros, evitando que tenham que ser calculados externamente. Estes erros são obtidos por simples extrapolação do erro unitário do cronômetro até o período indicado. Assim E24h, por exemplo, significa o erro em segundos apresentado pelo cronômetro em uma medição de 24 horas. Da mesma forma a incerteza U é extrapolada para os períodos usuais, com o cuidado de manter como menor incerteza a correspondente ao período amostral básico de 500 segundos + 2 \* PN, ou seja, aproximadamente 10 minutos.

A partir da quarta leitura o programa gerenciador compara o desvio padrão experimental da média atual com a média dos três últimos valores do desvio, e caso a coincidência encontrada seja superior a 95% do valor da média atual, aparece na parte inferior da tela um aviso de que a amostragem foi suficiente, podendo a calibração ser encerrada. A amostragem, entretanto, pode continuar até que a memória disponível para armazenamento de dados nos meios físicos do computador esteja esgotada, a critério do operador. Neste caso deve estar disponível, para cada ciclo de leitura, uma memória correspondente a 300 bytes no disco rígido.

Optando pela finalização da calibração o operador deve solicitar a impressão de um relatório, através do pressionamento da tecla F2, e em seguida, se desejar, pode sair do programa gerenciador através da tecla F1. O relatório impresso após a finalização da calibração tem a aparência mostrada na figura 6.8. Os dados relativos à calibração ficam temporariamente armazenados no arquivo *c:\qb45\dados\leitura.txt*, que deve ser renomeado adequadamente caso seja necessário o arquivamento integral dos dados da calibração.

```

                                SISLOC
                    RESULTADOS FINAIS DA CALIBRACAO DE CRONOMETROS

PROTOCOLO DO CRONOMETRO :          1234
NOME DO OPERADOR :                JOAO
DATA DA CALIBRACAO (MM/DD/AAAA) : 07-16-1998
TAG DOS PADROES UTILIZADOS :      F078f e f048r
NUMERO DE LEITURAS EFETUADAS :    8
INTERVALO ENTRE LEITURAS :       502 s
PERIODO MEDIO DAS LEITURAS (s) :  0.500002087123
TIPO DE CALIBRACAO :              NORMAL (GS=500, BAIXA RESOLUCAO)
ESTADO DO CRONOMETRO :            ATRASANDO 4174 ns/s ± 1234 ns/s

E24h (s) :   -0.36                U24h (s) :   0.11
E20h (s) :   -0.30                U20h (s) :   0.09
E12h (s) :   -0.18                U12h (s) :   0.05
E10h (s) :   -0.15                U10h (s) :   0.04
E1h (s) :    -0.02                U1h (s) :    0.00
E30min (s) : -0.01                U30min (s) : 0.00
E15min (s) : -0.00                U15min (s) : 0.00
E10min (s) : -0.00                U10min (s) : 0.00
E5min (s) :  -0.00                U5min (s) :  0.00
E1min (s) :  -0.00                U1min (s) :  0.00

DADOS DE CALIBRACAO GRAVADOS NO ARQUIVO C:/QB45/DADOS/LEITURA.TXT
VERSAO DO PROGRAMA : 2.0

```

**Figura 6.8 – Relatório impresso ao final de uma calibração automatizada**

Neste relatório final de calibração, de uso interno ao laboratório, o número de Algarismos Impressos nos campos *erro* e *incerteza*, mostrados sob o título de *ESTADO DO CRONÔMETRO*, não seguiu o critério metrológico que restringe esta exposição exclusivamente aos Algarismos realmente significativos. Rigorosamente a informação acima poderia ser impressa corretamente como  $(4,2 \pm 1,2)$   $\mu\text{s/s}$ , mas características intrínsecas de notação numérica da linguagem utilizada na programação tornaram mais atrativo a apresentação com excesso de Algarismos. A opção alternativa seria apresentar os resultados na forma de potências de dez, mas reflexões sobre a inteligibilidade visual do resultado afastaram esta possibilidade.

Como este documento é utilizado posteriormente para validação do programa gerenciador, inclusive nos casos de auto-calibração do sistema, o conhecimento de todos os Algarismos disponíveis até a ordem dos nanossegundos, no caso de calibração convencional, e até a ordem dos picossegundos, no caso da auto-calibração, é necessário, como se pode observar na planilha de validação do programa gerenciador, mostrada no anexo 3. De fato, o erro de cálculo que foi detectado quando da aplicação desta planilha produziu divergência na segunda casa decimal da incerteza, e teria ficado oculto para a maioria dos resultados, mas não para aqueles nos quais um arredondamento eventual tivesse que ser feito justamente no limite da comutação do dígito.

Não se optou pela apresentação em potência de dez, classicamente um formato de representação que exige maior atenção na interpretação, preferindo-se a uniformidade da expressão nas unidades do Sistema Internacional. Quando se trata de uma calibração convencional o erro e a incerteza são expressos em nanossegundos por segundo, enquanto numa calibração de alta resolução estas grandezas são expressas em picossegundos por segundo, sem nenhuma casa decimal em ambos os casos. Por fim, como este documento possui trânsito restrito ao laboratório de metrologia, cujo pessoal supostamente têm condições de interpretar corretamente os resultados, a ênfase da representação restrita apenas às duas unidades do SI favorece a velocidade de manuseio, a análise crítica dos resultados e o tratamento dos dados.

## **Capítulo 7**

### **Validação metrológica do sistema SISLOC**

---

## 7 – Validação metrológica do sistema SISLOC

### 7.1 - Análise de influências sobre o sistema

#### 7.1.1 – Sistema de disparo e travamento

Na calibração de cronômetros a ênfase de atuação do laboratório metrológico fica fortemente restrita à determinação das incertezas do cronômetro embora na medição de períodos de tempo utilizando estes instrumentos a influência do operador represente um acréscimo de incerteza de ordem elevada. O laboratório não pode, pela própria natureza da operação dos cronômetros de mão, determinar incertezas relativas ao usuário, mas pode fornecer dados estatísticos e orientação sobre esta influência, permitindo ao operador que os esteja manipulando estimar a ordem de grandeza da incerteza injetada na medição pela sua ação.

Neste trabalho, que envolve a automatização da calibração de cronômetros, a preocupação básica foi minimizar o custo e o tempo de calibração, otimizando a determinação da incerteza de medição *do cronômetro*.

Para prosseguir esta abordagem é necessário estabelecer um conjunto de pressupostos que vão auxiliar na validação metrológica do Sistema de Calibração Óptica de Cronômetros, além de estabelecer a aplicabilidade do método óptico. Estes pressupostos são relacionados a noções bem estabelecidas, e até intuitivas, sobre a passagem do tempo e o funcionamento de cronômetros analógicos e digitais, pelo menos no que se refere às aplicações às quais se destinam industrialmente estes instrumentos. São elas :

- a) um certo intervalo de tempo medido é correlacionado pelo usuário diretamente à indicação apresentada no mostrador de um cronômetro digital, ressalvados os erros do instrumento ;
- b) existe ao menos *um* segmento, no mostrador de qualquer cronômetro digital, que pulsa em cadência que pode ser relacionada diretamente com o incremento na indicação da medição de tempo ;
- c) as fontes de incerteza intrínsecas dos cronômetros digitais são :
  - 1 – alterações na frequência da base-de-tempo a cristal ;
  - 2 – irregularidades no ritmo da comutação dos segmentos do mostrador ;

- 
- 3 – resolução da indicação digital ;
  - 4 – lapsos de chaveamento no disparo e na trava de uma medição ;
- d) nos cronômetros mecânicos o passar do tempo é correlacionado à movimentação de um ou mais ponteiros, sendo um determinado instante representado pela coincidência do ponteiro com um ponto específico do mostrador, ressalvados os erros do instrumento ;
- e) as fontes de incerteza intrínsecas dos cronômetros mecânicos são
- 1 – alteração na frequência de oscilação do *balancim* ;
  - 2 – lapsos de chaveamento no disparo e na trava de uma medição ;

A análise dos pressupostos acima permite apontar algumas conseqüências diretas, tais como :

- j) os pressupostos (a), (b) e (d) indicam que um sistema automatizado de calibração de cronômetros *pode* obter informações diretamente na indicação do mostrador, nos cronômetros digitais, ou da ocultação de um determinado ponto do mostrador por um ponteiro móvel, nos cronômetros mecânicos ;
- k) as fontes de incerteza indicadas nos itens (c1), (c2), (c3) e (e1) são incluídas automaticamente em uma calibração óptica porque afetam diretamente a indicação do cronômetro ;
- l) as fontes de incerteza indicadas nos itens (c4) e (e2) *não* são avaliadas quando de uma calibração por meios ópticos porque esta ocorre durante uma *medição continuada*, não incluindo disparos e travamentos ;

Em resumo, uma calibração convencional de cronômetros engloba todas as fontes de incerteza, porque além da indicação visual, que o operador usa para sincronizar os eventos delimitatórios da medição, a indicação do cronômetro integra a diferença entre os lapsos de tempo de disparo e travamento, enquanto uma calibração por meios ópticos não considera estes lapsos. Este senão da automatização, porém, é largamente compensado pela eliminação da influência humana na calibração.

Na prática, enquanto a máxima incerteza anexada à medição por eventos relacionados ao caminho elétrico dos sinais de disparo e travamento é da ordem de 100 ns, a incerteza retirada de uma calibração convencional pela aplicação do método automatizado é da ordem de 400 ms, ou seja quatro

milhões de vezes maior. Mesmo considerando a discutível incerteza de 1 ms, relativa à divergência possível no acionamento do interruptor, o método óptico ainda introduz uma incerteza 400 vezes menor.

O sistema óptico, portanto, permite calibrar cronômetros digitais ou mecânicos com incertezas globais várias ordens de grandeza menores do que as possíveis de se obter com disparo e travamento manuais, com períodos de ocupação da bancada, do equipamento padrão e do operador, reduzidos por um fator substancial.

### 7.1.2 – Tipo de fonte de luz e ângulo de incidência do feixe luminoso

Na calibração automatizada de cronômetros uma questão relevante é a influência do tipo e do ângulo de incidência do feixe luminoso no mostrador de cronômetros digitais que produz o melhor sinal de saída para efeito de acionamento de contadores. Neste sentido foi realizado, nos laboratórios do LABMETRO/UFSC (1996), um ensaio de levantamento quantitativo relacionado à otimização de ângulos de incidência de luz em um sistema de captura fotoelétrica por reflexão em mostrador de cronômetro digital. Este ensaio determinou a melhor condição entre tipos diferentes de fontes luminosas e o ângulo de incidência mais adequado para maximizar as características do sinal refletido em um mostrador de cristal líquido. Este experimento não foi realizado com cronômetros mecânicos porque a reflexão neste tipo de mostrador independe da polarização do feixe luminoso, em princípio, importando somente as propriedades refletivas dos materiais de superfície envolvidos.

Considerando um dispositivo gerador de evento óptico passivo (refletivo), especificamente a comutação de um segmento em mostrador de cristal líquido, envolvendo uma fonte luminosa cujo feixe é refletido no referido segmento e capturado por um sensor fotoelétrico colocado na ocular de um microscópio (figura 7.1), foi determinada a combinação de variáveis fonte-ângulo que produz a maximização da relação sinal-DC na saída do sensor. Neste experimento foram utilizados os seguintes materiais :

- uma fonte de luz LASER visível ;
- uma fonte de luz branca comum colimável ;
- um cronômetro de prova com mostrador de cristal líquido;
- um sistema óptico de captura (microscópio) ;
- um sensor fotoelétrico não polarizado e uma fonte DC ;
- um osciloscópio ;

- elementos de suporte, trilhos, bases e porta-lentes.

A qualidade do sinal de saída (relação sinal-DC) foi maximizada através da manipulação das seguintes variáveis :

- ângulo de incidência LASER - cronômetro ;
- ângulo de polarização LASER - mostrador ;
- ângulo de incidência luz visível – cronômetro ;
- tipo de fonte luminosa – incandescente com feixe colimado e convergente e LASER semiconductor.

O microscópio foi colocado na posição vertical, formando ângulo de  $90^\circ$  em relação ao plano do mostrador, para que o máximo de área do segmento focalizado pudesse ser alcançado pelo sistema óptico, de ampliação limitada, conforme a figura 7.1. A ampliação do sistema óptico não foi incrementada além de 100 X porque isto implicaria aproximação entre a objetiva e o mostrador maior do que a que poderia ser implementada na prática. Este limite de aproximação objetiva-mostrador é definido por dois fatores, mostrados na figura 7.2 e descritos abaixo.

- a) a existência de uma lâmina de acrílico (ou *vidro*) separando a objetiva do mostrador, propriamente dito, por uma distância definida construtivamente ;
- b) a necessidade de um espaçamento mínimo entre a objetiva e o mostrador de tal forma que o feixe de luz consiga iluminar adequadamente o segmento focalizado, com o máximo de reflexão para a objetiva.

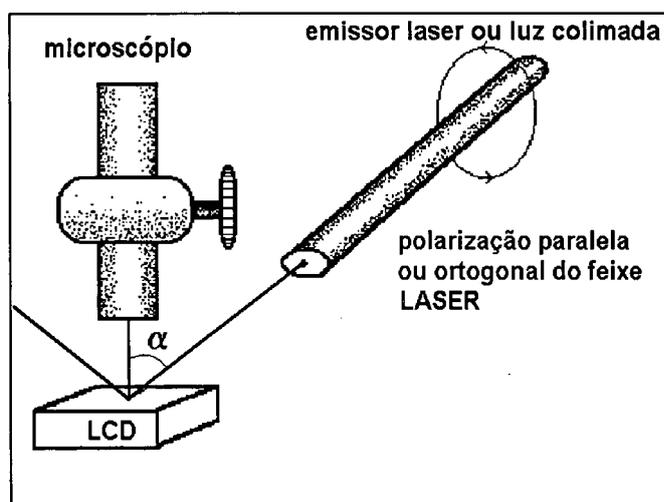


Figura 7.1 - Diagrama dos componentes ópticos do experimento

A distância  $d_2$ , também mostrada na figura 7.2, é definida pelo fator de ampliação da objetiva, e por sua vez define a distância  $d_1$ , já que a separação entre a lâmina de acrílico e o segmento focalizado é uma característica construtiva do cronômetro e não pode ser modificada. Consideradas as dimensões físicas da objetiva e seu suporte, a distância  $d_1$  define o ângulo mínimo que pode ser obtido entre o feixe de luz e a normal ao plano do segmento focalizado.

Em termos de reflexão no plano do segmento focalizado, o efeito da inclinação do feixe luminoso é, por simetria, equivalente ao efeito da inclinação do microscópio em relação à normal, ou inclinação do plano do segmento em relação à luz e ao microscópio, mas isso não é verdade quando é considerada a reflexão espúria da luz na lâmina de acrílico. Uma condição extremamente desfavorável ocorre quando a reflexão quase especular da lâmina se confunde com a reflexão difusa do segmento focalizado, no campo do microscópio. Neste caso a relação entre a luz-de-fundo e a flutuação do sinal pode subir a ponto de inviabilizar a discriminação sinal-DC no sensor fotoelétrico. Para evitar a influência da luz refletida no acrílico o segmento focalizado deve preencher a maior parte do campo visual, evitando a captura dos raios refletidos deslocados no eixo horizontal, enquanto a área transversal do feixe de luz incidente deve ser mantida a menor possível, suficiente apenas para iluminar a superfície ativa do segmento focalizado.

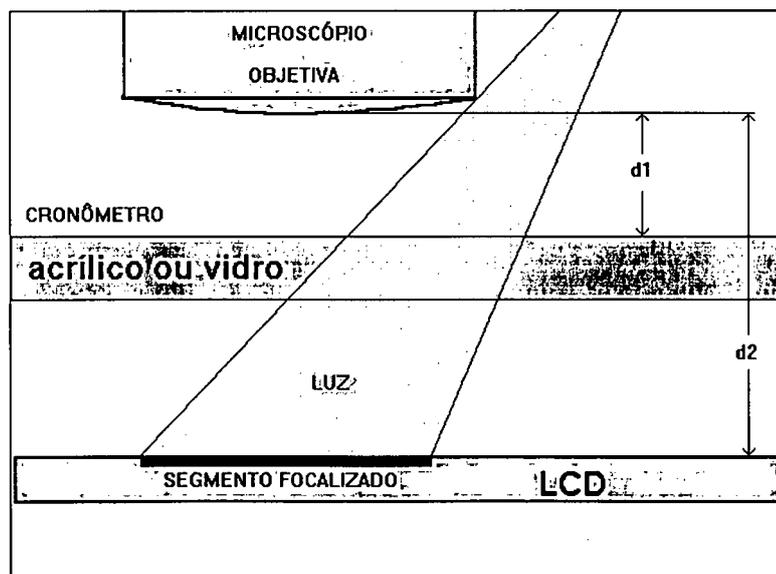


Figura 7.2 - Detalhe objetiva-luz-mostrador

As tentativas de utilizar luz branca não produziram resultados apoiadores em função da dificuldade de obter um feixe colimado com intensidade suficiente para um acionamento razoável do

---

sensor fotoelétrico, mesmo com a utilização de uma lâmpada halógena de 50 W. Nas medições preliminares, por outro lado, ficou claro que a utilização de luz branca tem inconvenientes importantes relacionados com a polarização da luz, especialmente se o microscópio não focalizar exclusivamente o segmento, mas também alguma superfície limítrofe, no mostrador, o que é regra geral já que o segmento tem formato retangular. São eles :

- a) a colimação de luz branca não é eficiente porque reduz drasticamente a intensidade do feixe, mantendo-o excessivamente divergente. Para contornar estes problemas são necessários sistemas de lentes e/ou espelhos que complicam desnecessariamente o sistema final ;
- b) na interação *luz incoerente - mostrador polarizante* somente 50% da luz incidente pode ser modulada pelo pulsar do segmento focalizado, enquanto os outros 50% são perdidos por absorção, obrigando o uso de fontes de luz mais potentes.

Considerando os problemas com luz comum, o experimento foi continuado com o uso de uma fonte LASER portátil de 1 mW, operando em 640 nm. Os ângulos de incidência luz-cronômetro,  $\alpha$  na figura 7.1, foram medidos após cada ajuste nas baterias de medições, e não têm valores redondos porque o sistema mecânico de posicionamento do emissor LASER não favorecia pequenas variações de posição. Ângulos  $\alpha$  maiores de  $35^\circ$  não produziram nenhum sinal perceptível no sensor fotoelétrico, enquanto ângulos menores que  $10^\circ$  não puderam ser implementados em função das dimensões físicas dos emissores de luz e do corpo do microscópio.

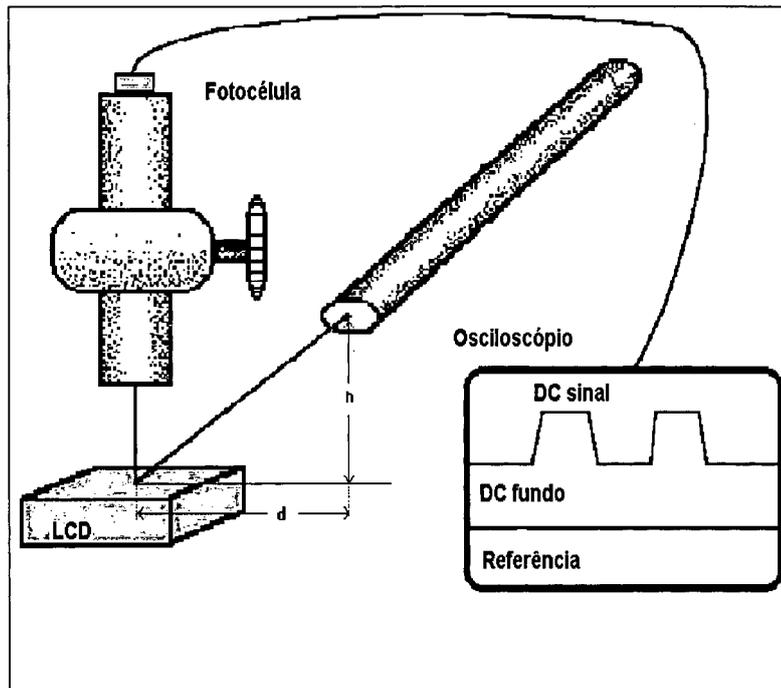


Figura 7.3 - Condições de levantamento dos dados

As polarizações paralela e ortogonal entre o feixe LASER e o cronômetro foram obtidas considerando o ângulo de máxima reflexão, sensoreada fotoeletricamente a partir da focalização do feixe LASER numa região do plano do mostrador sem nenhum segmento. Os valores DC foram lidos num osciloscópio e os ângulos escolhidos foram 0° (polarização paralela), 30°, 60° e 90° (polarização ortogonal). Os resultados estão na tabela 7.1 e foram obtidos com a montagem da figura 7.3, onde se pode visualizar o sinal de saída do sensor, no desenho da tela do osciloscópio. O ângulo  $\alpha$  está mostrado na figura 7.1.

Tabela 7.1 - Leituras do experimento

h (mm)	d (mm)	$\alpha$ (°)	Polarização (°)	DC <sub>fundo</sub> (V)	DC <sub>ativo</sub> (V)	D
336	235	35	0	0,1	0,3	2
336	235	35	30	0	0,1	-
336	235	35	60	0	0	-
336	235	19	90	0	0	-
336	111	19	0	0,2	3,1	14
336	111	19	30	0,2	1,3	5
336	111	19	60	0,1	0,4	3
336	111	19	90	0	0	-
336	59	10	0	0,2	4,1	19
336	59	10	30	0,2	4,0	19
336	59	10	60	0,1	2,4	23
336	59	10	90	0	0,2	-

Na tabela 7.1 D representa uma grandeza adimensional que relaciona a variação de tensão gerada no sensor fotoelétrico com a tensão *offset* sobreposta. A comutação periódica do segmento pulsante é a responsável pela modulação da luz refletida, que é reproduzida em tensão à saída do

sensor, enquanto a tensão *offset* mantém correspondência com a luz-de-fundo que o atinge. A figura 7.4 mostra a interligação elétrica do sensor (S) com a bateria (B), o resistor (R) e o osciloscópio (O), utilizada no experimento, enquanto a equação 7.1 foi usada para o cálculo de D.

$$D = \frac{DC_{ativo} - DC_{fundo}}{DC_{fundo}} \quad (\text{eq. 7.1})$$

Onde

$DC_{ativo}$  é o nível de tensão presente na saída do sensor quando o segmento está ativo

$DC_{fundo}$  é o nível de tensão presente na saída do sensor quando o segmento está inativo

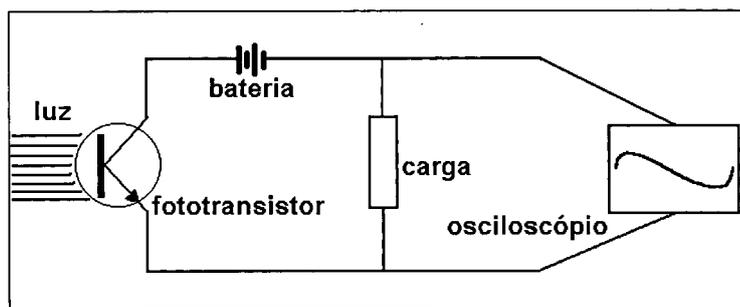


Figura 7.4 - Circuito elétrico do experimento

Desde que uma corrente de polarização adequada seja estabelecida sobre o sensor, um D baixo significa que há muita reflexão externa ao segmento focalizado. Esta reflexão externa pode ser originária da lâmina de acrílico ou de áreas próximas ao segmento, no próprio LCD. Por outro lado um D baixo também pode indicar uma reflexão pobre. De qualquer maneira a maximização de D reduz problemas com amplificação de sinal à saída do sensor. A grandeza D (não-normalizada) pode ser considerada uma medida adequada para quantificar o resultado deste experimento, e as tensões DC apresentadas na tabela 7.1 foram obtidas através do circuito elétrico exposto na figura 7.4. Nesta figura, S representa o sensor fotoelétrico, B a bateria e R um resistor de carga usado para converter as flutuações de corrente no sensor em variações de tensão compatíveis com o osciloscópio.

O resultado dos testes preliminares com luz branca deixaram claro que ainda que não haja uma única condição impeditiva para sua aplicação, vários problemas técnicos seriam acrescentados ao experimento. Por outro lado, a disponibilidade de fontes LASER baratas, de baixa potência, operando no visível e portáteis, são pontos favoráveis à sua aplicação neste experimento.

Os valores de D, na tabela 7.1, mostram que a situação ideal seria obtida com o uso de ângulos  $\alpha$  próximos a  $0^\circ$  e polarizações paralelas entre o LASER e o polaróide do cronômetro, com ângulos próximos a  $0^\circ$ . Em relação este último ângulo não há maiores problemas porque variações de até  $\pm$

30° não produzem flutuação significativa na discriminação. Isto significa que o operador pode rotacionar o cronômetro manualmente, determinando o melhor ângulo baseado exclusivamente na intensidade refletida, percebida qualitativamente por observação visual.

Já o ângulo  $\alpha$  é mais crítico, e o valor ótimo de 0° pode ser atingido numa montagem especial na qual tanto o feixe LASER incidente quanto o refletido sigam o mesmo caminho. Tal dispositivo pode ser feito com semi-espelhos, como ocorre com os microscópios ou estereoscópios com saída para câmera, mas tentativas anteriores mostraram que uma parte significativa do feixe LASER original retorna para o sensor a partir do próprio semi-espelho, sem ser refletido no segmento, produzindo uma luz-de-fundo excessiva. Em função destas constatações a alternativa escolhida para os protótipos envolve a utilização de microscópios ou estereoscópios com caminhos ópticos independentes, que se cruzam apenas no foco.

### 7.1.3 – Unidade de Tratamento de Sinais do sistema óptico (UTS)

A incerteza introduzida pelo tratamento do sinal advindo do sensor fotoelétrico provém fundamentalmente do amplificador paramétrico que foi colocado no caminho do sinal do primeiro protótipo. Este amplificador foi necessário em função da ampla variedade de pontos de captura encontrados nos cronômetros, cada qual produzindo níveis de reflexão claro/escuro próprios, aos quais o sistema tinha que se adaptar automaticamente. A flutuação adaptativa do nível de amplificação, porém, é indesejável e precisa ser minimizada de modo a evitar que sob pulsos de períodos longos a modificação do nível de amplificação acarrete flutuações excessivas na incerteza em tempo agregada pelo circuito de limiar, na seqüência. Isto é obtido através da elevação da constante de tempo intrínseca do amplificador, e traz como consequência um certo retardo no surgimento do sinal de saída após a fixação do cronômetro. A figura 7.5 mostra o circuito da UTS do sistema óptico, usada no protótipo 1.

Neste circuito o sinal vindo do sensor fotoelétrico é aplicado ao primeiro amplificador operacional, cuja função é o acoplamento de impedâncias, e enviado ao segundo operacional com ganho variável. O sinal de saída do segundo operacional é amplificado por um par de transístores e enviado às entradas de um chaveador 7414. Uma das saídas do chaveador é utilizada para acionar um LED enquanto outra aciona um oscilador que gera uma sinal sonoro, e uma terceira saída aciona um monoestável, cujo tempo alto é delimitado por um cristal oscilador de 1 MHz, que envia o pulso ao contador externo.

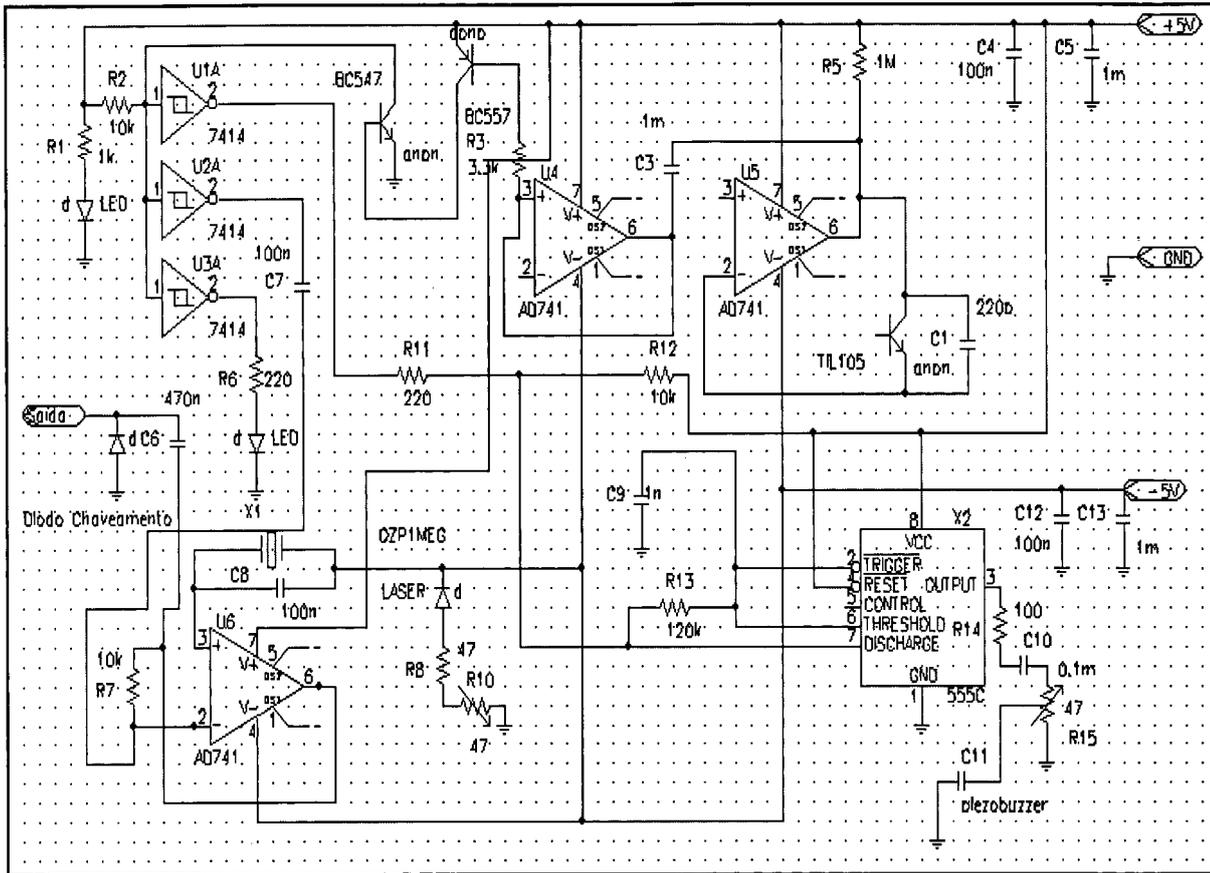


Figura 7.5 – Diagrama elétrico da UTS do protótipo 1 do sistema óptico. Capacitâncias dadas em farad e resistências em ohm.

Após a amplificação o sinal é convertido para um formato retangular e utilizado para disparar um circuito monoestável rápido a cristal, responsável pelo sinal de saída ao contador, além de um circuito oscilador de *bips* e um LED que orientam visual e auditivamente o operador sobre a eficácia do posicionamento do cronômetro.

Os erros introduzidos pela UTS na medição de tempo, porém, podem aparecer somente como instabilidades no período instantâneo medido pelo *Sistema*, estas instabilidades são compensadas automaticamente pela continuação da medição, já que a frequência da pulsação não é definida pela UTS, mas sim pelo cronômetro sob calibração. Embora a incerteza derivada do tratamento do sinal elétrico fique diluída na incerteza global da calibração, existindo apenas sentido acadêmico em determiná-la separadamente, isto foi feito com o duplo objetivo de identificar também uma possível, embora pouco provável, tendência significativa injetada pela UTS. De qualquer modo quando da calibração geral do sistema a parcela correspondente à UTS foi considerada juntamente com todas as demais fontes de incerteza intrínsecas do método.

Para reduzir ainda mais a influência da UTS, no segundo protótipo do sistema um conversor eletro-óptico mais simples foi desenvolvido, perfeitamente adaptado à melhoria no sistema óptico que foi obtida pela utilização de um novo e melhor estereoscópio. O circuito elétrico deste novo conversor é apresentado na figura 7.6. Neste circuito o sinal LASER refletido excita diretamente o disparador através do fototransistor, eliminando a influência do amplificador de ganho variável. O sinal provindo do sensor alimenta diretamente uma porta de um chaveador 7414 e sua saída excita diretamente um LED e a entrada do contador externo.

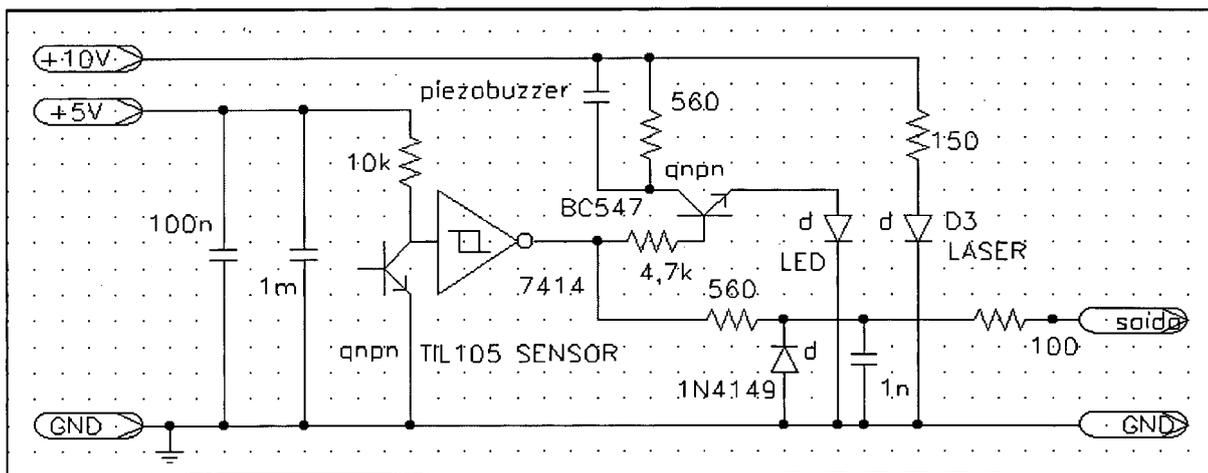


Figura 7.6 – Diagrama da UTS do protótipo 2 do sistema óptico.  
Capacitâncias dadas em farad e resistências em ohm.

## 7.2 – Considerações específicas sobre o método óptico de captura do sinal

Quando se faz uma análise em *tempo real* do comportamento de diversos modelos de cronômetros digitais percebe-se que alguns apresentam um retardo variável significativo na comutação de um dado segmento do mostrador, com amplitude de flutuação de período entre comutações seqüenciais de até algumas centenas de microssegundos. Esta flutuação aumenta de intensidade proporcionalmente à densidade de processamento digital embutida no cronômetro, ou de sua quantidade de funções, e é uma característica técnica particular de cada modelo de instrumento, já que o retardo flutuante, que ocorre a cada ciclo de comutação de segmento, corresponde a um maior ou menor *caminho* lógico percorrido pelo sinal da base-de-tempo interna.

Cronômetros digitais multifunções exigem inúmeras interrupções de sistema, que obviamente acompanham o pulsar do *clock* interno e o estado particular do barramento de saída do mostrador, alterando o período entre pulsos seqüenciais. De qualquer forma nem fabricante nem usuário se preocupam com este pormenor porque a flutuação de período é pequena demais para ser percebida por

---

qualquer operador humano, para o qual se destina o instrumento, além de que é autocompensada, produzindo um período médio que tende ao período da base interna após um grande número de ciclos da máquina. Somente no processo de calibração via sistema óptico de aquisição é que esta flutuação pode ser percebida.

Nestes casos, um contador usado no seu modo *default* – mostrando o valor instantâneo da última medição – tende a apresentar valores discrepantes para o período medido, apontando para incertezas da ordem de centenas de microssegundos por segundo. Um estudo do comportamento desta flutuação, porém, revela que ela tem caráter repetitivo, e a média dos períodos apresentados sempre converge para um valor estável, relacionado diretamente com a frequência da base-de-tempo interna do cronômetro, em última análise a fonte da atualização da indicação do mostrador que está sendo calibrado. A característica autocompensatória e repetitiva da flutuação se torna visível quando o contador é acoplado, via sistema, a uma unidade de aquisição de dados que esteja capacitada a fornecer visualmente a distribuição das medidas. Caso o contador utilizado tenha a característica de desprezar um ou mais pulsos de entrada a cada ciclo de medição (tempo morto), porém, como no caso do SR620 que foi utilizado, a média das leituras pode deixar de ser representativa para pequenos e médios tamanhos de amostra.

Como o sistema de captura e tratamento dos sinais de longo período envolve integralização unitária, isto é, cada período (entre cada comutação, exceto o tempo morto) é medido pelo contador padrão, e não o período total de um número  $n$  de comutações, estas flutuações induzem todo o sistema a um desvio padrão excessivo, estatisticamente correto, mas não-representativo do comportamento global do cronômetro, considerado em um intervalo de tempo usual de utilização. Os erros medidos em relação ao valor esperado são claramente repetitivos quando observados em um gráfico com algumas dezenas de intervalos amostrados, permitindo que o sistema eleja um grupo mínimo de pontos adequado à obtenção de uma média que efetivamente represente o período da base-de-tempo interna do cronômetro. O alcance deste objetivo pode ser detectado, após um determinado número de ciclos, quando médias sucessivas comparadas apresentem divergências inferiores à incerteza máxima tolerável. O programa gerenciador do sistema avisa o operador quando a leitura é confiável, o que não impede que o processo seja feito manualmente.

Este problema também pode ser contornado de forma bastante simples se o contador utilizado dispuser de funções estatísticas selecionáveis embutidas, bastando que o equipamento seja programado para fornecer a média de um número grande de amostras, totalizando algumas centenas de segundos. Todos os experimentos de avaliação do sistema indicaram que o valor médio estatístico

invariavelmente converge para o período da base-de-tempo interna procurado, dentro de uma flutuação menor que a incerteza presumida na operação humana, para tamanhos de amostra ao redor de 500 segundos. A principal consequência associada a isto é que o intervalo de tempo necessário para que o contador adquira dados suficientes para calcular a média será um pouco maior do que o necessário para um cronômetro cuja comutação de segmentos seja feita em períodos regulares, mas ainda assim menor do que o tempo consumido no processo que entrega ao programa a decisão sobre o tamanho da amostra. O tempo total de calibração, neste caso, será um múltiplo deste intervalo, já que o processo de avaliação metrológica inclui vários ciclos de amostragem.

Embora apenas no processo de calibração de alguns tipos específicos de cronômetros multifunções que apresentam um retardo flutuante significativo exista a necessidade de aumentar o tamanho da amostra de calibração, não há prejuízo em aplicar o método indiscriminadamente a todos os cronômetros. O acréscimo no tempo de calibração é pequeno o suficiente para ser desprezado em função da uniformização de procedimentos, evitando triagens iniciais manuais ou automáticas. Numa avaliação global qualitativa pode-se concluir que os mesmos resultados que se obtém com a calibração manual de um cronômetro, em termos de incerteza acerca do valor do erro atribuído ao mesmo, podem ser obtidos num intervalo de tempo entre 100 e 1000 vezes menor através do sistema automatizado.

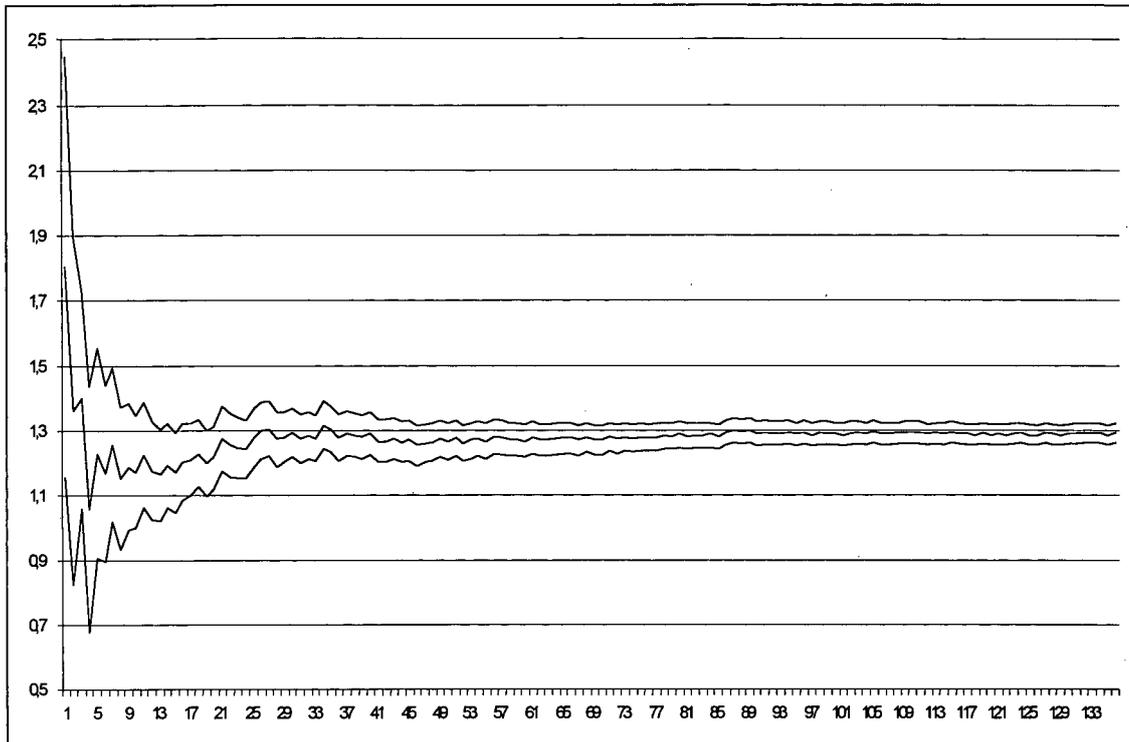
Para confirmar experimentalmente esta redução de tempo consumido em uma calibração um cronômetro *Mondaine Stopwatch*, calibrado manualmente em 5 dias (120 h), consideremos os dados fornecidos na tabela 7.2 abaixo.

**Tabela 7.2 – Incerteza em calibração manual de cronômetro, em 120 horas**

<b>Erro encontrado em 24 horas</b>	<b>Erro médio : - 1,3 s</b>  <b>Desvio padrão experimental (n-1) : 0,6 s</b>	<b>Incerteza padrão tipo A : (sendo t = 2,65 para 95%)</b>  $0,6 \times 2,65/\sqrt{5} =$  <b>U = 0,71 s</b>
- 1,5 s		
- 2,0 s		
- 1,0 s		
- 0,5 s		
- 1,5 s		

O mesmo cronômetro submetido ao sistema automatizado conclui a calibração com incerteza menor que 0,71 s (tipicamente 0,5 s em 24 h) em uma única amostragem de 500 segundos, ou seja, em um período de tempo 864 vezes menor que o necessário para o método manual. No gráfico da figura 7.7, obtido diretamente através do sistema automatizado para o mesmo cronômetro *Mondaine Stopwatch*, a curva em azul mostra o erro estimado para o cronômetro (por dia, em segundos) enquanto as curvas em rosa e amarelo demarcam o intervalo definido pela incerteza proposta pelo SISLOC em uma calibração continuada por cerca de 24 horas. Já na primeira leitura, na qual o erro/dia

foi suposto em 1,8 s e a incerteza foi indicada como  $\pm 0,6$  s os valores concordam completamente com o resultado após uma amostragem continuada por mais de cem leituras ( $1,29 \pm 0,03$ ) s.



**Figura 7.7 – Erro/dia projetado (em segundos, no eixo vertical) em função do número de leituras (eixo horizontal) em um cronômetro Mondaine Stopwatch. As curvas superior e inferior delimitam a incerteza sobre o valor projetado do erro.**

Em outro experimento o mesmo cronômetro foi deixado sob calibração manual continuada por 36 dias completos, em um único ciclo de medição, na tentativa de minimizar a influência do acionamento humano relativamente ao período total calibrado, aproximando o resultado do que seria esperável no processo automatizado. Neste caso, na ausência de várias leituras para a caracterização da variância, a incerteza sobre o resultado foi presumida como sendo o intervalo de tempo máximo indicado pelos testes de resposta humana no acionamento sincronizado de interruptores, ou seja, 0,4 s. Ao final do período de 36 dias a contagem de tempo do cronômetro foi parada e o erro de sua indicação em relação ao padrão de rubídio foi determinado, conforme a tabela 7.3, abaixo.

**Tabela 7.3 – Experimento de calibração manual de cronômetro**

Calibração manual continuada por 36 dias do cronômetro Mondaine Stopwatch		
Disparo	Travamento	Erro
Indicação do padrão 11h 34min 00s Data 15/07/1998 Cronômetro 00min 00s 00cs	Indicação do padrão 11h 34min 00s Data 20/08/1998 Cronômetro 11h 59min 15s	Erro total : - 45s Erro/dia : - 1,25s Incerteza total : $\pm 0,4s$ Incerteza/dia : $\pm 0,01s$

Com a redução da influência da imprecisão humana no acionamento do cronômetro através da ampliação do ciclo de medição a incerteza sobre o resultado da calibração foi reduzida até os centésimos de segundo, embora o custo em termos de tempo de calibração inviabilize a aplicação indiscriminada deste processo, tipicamente experimental. A comparação deste resultado com o que é obtido para o mesmo cronômetro pelo sistema automatizado, como é mostrado no gráfico da figura 7.7, por exemplo, confirma também a eficácia do método óptico.

### 7.3 – Sistema padrão de referência

A avaliação e a validação metrológica do Sistema Automatizado de Calibração Óptica de Cronômetros foram realizadas através de uma série de experimentos planejados durante a etapa inicial da tese, sendo executados com os protótipos, para confirmação de aplicabilidade do método, a partir da metade do ano 1998. Alguns experimentos sofreram atualização, em relação aos originalmente propostos, ou foram simplesmente realizados em condições de laboratório para determinação crítica da incerteza imposta pelo método óptico à calibração de cronômetros. De forma geral, para a contextualização e validação do método utilizado na testagem do sistema automatizado, é conveniente classificar as fontes de incerteza do processo de calibração óptica como sendo:

- a) Provenientes do cronômetro sob calibração ;
- b) Provenientes do sistema mecânico-óptico de captura ;
- c) Provenientes do processamento do sinal pelo sistema ;
- d) Provenientes da base-de-tempo padrão ;
- e) Provenientes do contador digital ;
- f) Provenientes do operador ;

Para a estimação da incerteza na calibração automatizada de cronômetros houve acesso direto à incerteza em frequência atribuída à base-de-tempo padrão (fornecida em seu certificado de calibração, reproduzido parcialmente no anexo 4), à incerteza introduzida no processo pelo contador, calibrado especificamente para a função de frequência (certificado reproduzido parcialmente no anexo 5), à

incerteza do gerador Fluke 6061A (certificado reproduzido parcialmente no anexo 7) e à incerteza devida ao divisor  $10^N$  (certificado reproduzido parcialmente no anexo 6). A ação corretiva de minimização de incertezas do *Sistema* se concentrou sobre os elementos ópticos, de processamento elétrico e sobre o operador. A incerteza proveniente do operador, porém, ficou restrita à possibilidade de erros grosseiros, facilmente detectáveis, pelo fato de que não existe no *Sistema* a influência da resposta humana sobre o período de tempo medido. O *Sistema* colhe automaticamente o sinal, enquanto os comandos de disparo e trava são eletrônicos, muito rápidos e de caráter autocompensatório. Acessoriamente a geração de planilhas de leitura é feita completamente de forma automatizada, evitando inclusive a ocorrência de erros na digitação dos dados.

O processamento do sinal elétrico do *Sistema* pode ser subdividido em duas partes; uma delas está associada ao circuito digital de amplificação e formatação do sinal (UTS), enquanto outra parte engloba o contador e seus sistemas internos. Relativamente ao circuito digital de processamento a possibilidade de erro é restrita pela autocompensação gerada na multiplicação das medições, já que toda flutuação de período introduzida por circuitos lógicos posteriores à fonte de sinal periódico são por ela delimitados, podendo unicamente gerar acréscimo na componente aleatória de seu valor característico. A fonte de flutuação possível neste *Sistema* estaria relacionada à não-repetibilidade dos tempos de subida e descida do sinal digital de saída do *Sistema*, que poderia ser detectada pelo discriminador de nível de tensão, na entrada do contador, como uma pequena flutuação de período. Para contornar este problema no primeiro protótipo um dispositivo monoestável de tempo ativo muito curto ( $t_H=1\mu s$ ), realimentado por um sistema ressonante a cristal de quartzo, garante que, para temperaturas externas fixas, flutuações no tempo de subida e descida não ultrapassem a ordem dos nanossegundos. O circuito monoestável pode ser observado no diagrama elétrico da UTS, na figura 7.5. Durante a fase de testes e experimentos o novo e mais simples circuito utilizado com o segundo protótipo se mostrou com idêntico desempenho em relação ao primeiro. Neste caso a minimização da flutuação de tempos de subida e descida foi garantida pela utilização direta de um circuito chaveador 7414, mostrado na figura 7.6. Em qualquer caso, um circuito de processamento ideal diferiria dos realizados nos protótipos apenas por não introduzir flutuação aleatória no período de pulsação além daquela que pode ser atribuída à fonte. Para um grande número de medições, por outro lado, esta componente aleatória tem sua influência minimizada.

## 7.4 – Estimativas de incerteza

### 7.4.1 – Contador/base-de-tempo do SISLOC

O contador digital utilizado possui uma incerteza alegada pelo fabricante, para a escala e função específica aplicada, que pode ser obtida pela consulta ao manual de operação e especificações. Utilizando o SR620 da Stanford Research Systems a incerteza na medição de período atinge 125 picossegundos, na escala de 1 segundo, quando utilizando a base interna de tempo e uma amostragem mínima de um ciclo de medição. A calibração desta função e escala determinou diretamente o valor do erro introduzido pelo contador através de um circuito retroalimentado simples, no qual o instrumento foi posto a medir o período da saída de 1 Hz do próprio padrão de rubídio que serve como sua base-de-tempo externa. Foi possível, então, eliminar a influência do próprio padrão de tempo, ainda que seja inexpressiva na resolução do contador, de forma que o valor lido desviou do valor esperado por consequência do erro exclusivo do contador. A montagem usada para determinação do erro do contador é apresentada na figura 7.8.

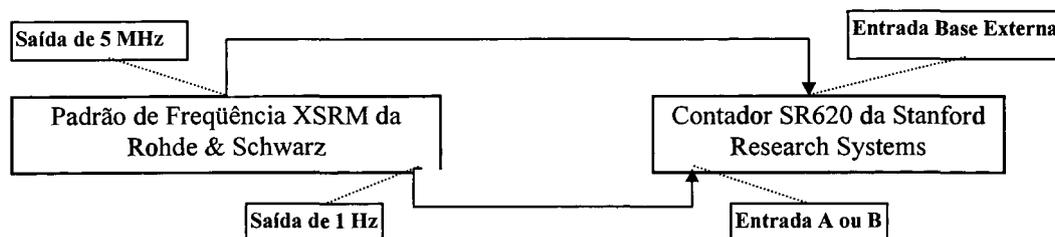
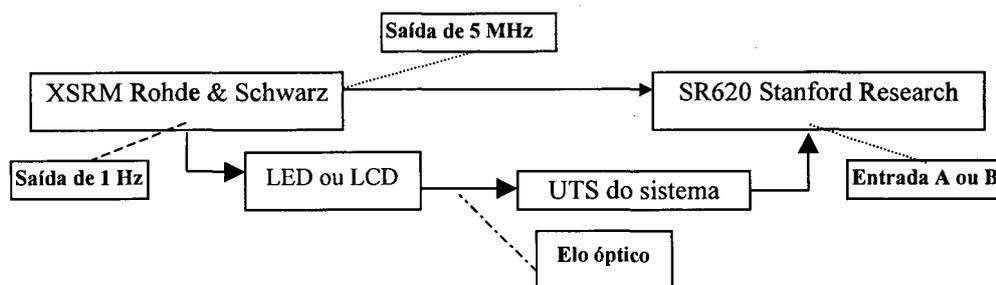


Figura 7.8 – Esquema de ligações para determinação do erro do contador

Este experimento foi realizado seis vezes entre o outono e o inverno de 1998 e o resultado foi sempre muito estável em todas as leituras, que oscilaram entre 0,999 999 999 999 s e 1,000 000 000 000 s, obtidas com tempo de amostragem idêntico ao usado na calibração de cronômetros. A melhor estimativa para o erro do contador nesta escala pode ser determinada pela média das seis leituras (-0,16 ps), sendo a incerteza associada a este valor o desvio padrão experimental da média corrigido por Student (95%) e pela raiz quadrada do número de medições, resultando em cerca de  $\pm 0,43$  ps/s, aproximadamente a metade da resolução da indicação digital. A incerteza assim determinada se mostrou muito menor que a alegada pelo fabricante para a mesma escala e função porque no caso da calibração de cronômetros pelo sistema automatizado o ciclo de amostragem foi fixado em 500 segundos, ou seja, quinhentas vezes maior que o utilizado pelo fabricante no seu teste. Estes  $\pm 0,43$  ps/s podem ainda ser multiplicados por 86400 s/dia, resultando em uma incerteza de cerca de  $\pm 40$  ns/dia, de forma a uniformizar as unidades e permitir comparação com o erro e a incerteza fornecidos pelo programa gerenciador.

#### 7.4.2 – Unidade de tratamento dos sinais ópticos

O erro introduzido exclusivamente pela unidade de processamento de sinal do sistema foi determinado colocando-a como um terceiro elemento na montagem descrita na figura 7.8. O processo consiste em tomar o sinal de 1 Hz do padrão aplicando-o diretamente a um LED ou um dispositivo LCD, colocado apropriadamente no foco do dispositivo óptico de captura do sistema, da mesma forma como se faz com um cronômetro. Para esta calibração um LED e um dispositivo LCD foram interligados aos cabos de conexão de sinal aceitos pela base-de-tempo padrão, sendo colocados fixos em uma pequena caixa, visando a praticidade das futuras calibrações. O erro da interface óptico-elétrica do *Sistema* foi determinado, então, conforme o esquema mostrado na figura 7.9, abaixo.



**Figura 7.9 - Determinando o erro da unidade de tratamento de sinal do SISLOC**

O comportamento da UTS dos protótipos foi equivalente quanto à incerteza que introduzem na medição, em ambos os casos apontando para valores menores que uma centena de picossegundos por segundo, tanto para erro quanto para a incerteza expandida em relação ao erro. Na tabela 7.4 os dados de saída desta calibração são mostrados conforme ficaram armazenados no arquivo temporário criado pelo programa de gerenciamento. Nas colunas em destaque o erro/dia (ERD) e a incerteza expandida/dia (SLD), ambos em segundos, representam a contribuição direta da UTS. Todas as operações de medição e calibração referenciadas adiante foram aplicadas exclusivamente ao segundo protótipo da UTS, salvo indicação oposta.

**Tabela 7.4 – Erro (ERD) e incerteza expandida (SLD) (em s/dia)  
na calibração da UTS do sistema óptico**

PN	PR\$	NO\$	DT\$	PADROES	TIPO						
X	PI(X)	PM(X)	SL	SAL	ERD	SAD	ERD+SAD	ERD-SAD	SLD	ERD+SLD	ERD-SLD
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	1	2,19E-11	2,19E-11	<b>3,33E-06</b>	1,92E-06	5,25E-06	1,41E-06	<b>1,92E-06</b>	5,25E-06	1,41E-06
3	1	1	4,90E-11	5,04E-11	<b>1,01E-06</b>	2,62E-06	3,63E-06	-1,62E-06	<b>2,55E-06</b>	3,56E-06	-1,54E-06
4	1	1	4,10E-11	5,06E-11	<b>1,40E-06</b>	2,02E-06	3,42E-06	-6,14E-07	<b>1,64E-06</b>	3,04E-06	-2,33E-07
5	1	1	4,54E-11	5,16E-11	<b>3,11E-07</b>	1,71E-06	2,02E-06	-1,40E-06	<b>1,50E-06</b>	1,82E-06	-1,19E-06
6	1	1	4,28E-11	4,65E-11	<b>-1,58E-07</b>	1,34E-06	1,18E-06	-1,50E-06	<b>1,23E-06</b>	1,07E-06	-1,39E-06
7	1	1	4,10E-11	4,58E-11	<b>2,47E-07</b>	1,18E-06	1,43E-06	-9,33E-07	<b>1,05E-06</b>	1,30E-06	-8,07E-07
8	1	1	4,75E-11	4,47E-11	<b>1,12E-06</b>	1,05E-06	2,17E-06	7,27E-08	<b>1,12E-06</b>	2,24E-06	6,81E-09
9	1	1	4,62E-11	4,99E-11	<b>7,58E-07</b>	1,08E-06	1,84E-06	-3,26E-07	<b>1,00E-06</b>	1,76E-06	-2,46E-07
10	1	1	4,64E-11	4,72E-11	<b>3,28E-07</b>	9,58E-07	1,29E-06	-6,30E-07	<b>9,41E-07</b>	1,27E-06	-6,12E-07
11	1	1	4,47E-11	4,50E-11	<b>1,26E-07</b>	8,60E-07	9,86E-07	-7,35E-07	<b>8,54E-07</b>	9,79E-07	-7,28E-07
12	1	1	4,26E-11	4,30E-11	<b>6,48E-08</b>	7,80E-07	8,44E-07	-7,15E-07	<b>7,73E-07</b>	8,37E-07	-7,08E-07
13	1	1	4,35E-11	4,31E-11	<b>4,25E-07</b>	7,44E-07	1,17E-06	-3,18E-07	<b>7,51E-07</b>	1,18E-06	-3,25E-07
14	1	1	5,06E-11	5,16E-11	<b>-2,35E-07</b>	8,52E-07	6,17E-07	-1,09E-06	<b>8,36E-07</b>	6,02E-07	-1,07E-06
15	1	1	5,33E-11	6,05E-11	<b>2,42E-07</b>	9,58E-07	1,20E-06	-7,16E-07	<b>8,44E-07</b>	1,09E-06	-6,02E-07
16	1	1	5,23E-11	6,21E-11	<b>3,78E-08</b>	9,47E-07	9,85E-07	-9,10E-07	<b>7,99E-07</b>	8,36E-07	-7,61E-07
17	1	1	5,16E-11	6,01E-11	<b>-1,73E-07</b>	8,86E-07	7,13E-07	-1,06E-06	<b>7,61E-07</b>	5,88E-07	-9,34E-07
18	1	1	5,15E-11	6,03E-11	<b>7,20E-08</b>	8,60E-07	9,32E-07	-7,88E-07	<b>7,35E-07</b>	8,07E-07	-6,63E-07
19	1	1	5,63E-11	6,44E-11	<b>-4,37E-07</b>	8,91E-07	4,54E-07	-1,33E-06	<b>7,78E-07</b>	3,42E-07	-1,21E-06
20	1	1	5,73E-11	6,29E-11	<b>-7,60E-07</b>	8,45E-07	8,45E-08	-1,61E-06	<b>7,69E-07</b>	9,05E-09	-1,53E-06
21	1	1	5,77E-11	6,51E-11	<b>-4,85E-07</b>	8,51E-07	3,65E-07	-1,34E-06	<b>7,54E-07</b>	2,69E-07	-1,24E-06
22	1	1	5,65E-11	6,38E-11	<b>-3,97E-07</b>	8,13E-07	4,16E-07	-1,21E-06	<b>7,20E-07</b>	3,23E-07	-1,12E-06
23	1	1	5,87E-11	6,48E-11	<b>-7,55E-07</b>	8,05E-07	4,99E-08	-1,56E-06	<b>7,29E-07</b>	-2,59E-08	-1,48E-06
24	1	1	5,95E-11	6,81E-11	<b>-4,75E-07</b>	8,26E-07	3,51E-07	-1,30E-06	<b>7,23E-07</b>	2,47E-07	-1,20E-06
25	1	1	5,84E-11	6,79E-11	<b>-5,29E-07</b>	8,06E-07	2,77E-07	-1,33E-06	<b>6,93E-07</b>	1,64E-07	-1,22E-06
26	1	1	5,74E-11	6,68E-11	<b>-4,52E-07</b>	7,74E-07	3,22E-07	-1,23E-06	<b>6,65E-07</b>	2,13E-07	-1,12E-06
27	1	1	5,78E-11	6,67E-11	<b>-6,75E-07</b>	7,58E-07	8,25E-08	-1,43E-06	<b>6,57E-07</b>	-1,80E-08	-1,33E-06
28	1	1	5,68E-11	6,63E-11	<b>-6,48E-07</b>	7,38E-07	9,02E-08	-1,39E-06	<b>6,33E-07</b>	-1,53E-08	-1,28E-06
29	1	1	5,63E-11	6,52E-11	<b>-5,27E-07</b>	7,13E-07	1,85E-07	-1,24E-06	<b>6,15E-07</b>	8,77E-08	-1,14E-06
30	1	1	5,76E-11	6,62E-11	<b>-7,83E-07</b>	6,83E-07	-1,01E-07	-1,47E-06	<b>5,94E-07</b>	-1,90E-07	-1,38E-06
31	1	1	5,67E-11	6,59E-11	<b>-8,08E-07</b>	6,68E-07	-1,40E-07	-1,48E-06	<b>5,75E-07</b>	-2,34E-07	-1,38E-06
32	1	1	5,58E-11	6,48E-11	<b>-8,07E-07</b>	6,47E-07	-1,61E-07	-1,45E-06	<b>5,56E-07</b>	-2,51E-07	-1,36E-06
33	1	1	5,49E-11	6,38E-11	<b>-7,88E-07</b>	6,27E-07	-1,61E-07	-1,41E-06	<b>5,39E-07</b>	-2,49E-07	-1,33E-06
34	1	1	5,46E-11	6,30E-11	<b>-6,76E-07</b>	6,10E-07	-6,61E-08	-1,29E-06	<b>5,28E-07</b>	-1,48E-07	-1,20E-06
35	1	1	5,38E-11	6,23E-11	<b>-6,74E-07</b>	5,94E-07	-7,98E-08	-1,27E-06	<b>5,13E-07</b>	-1,61E-07	-1,19E-06
36	1	1	5,30E-11	6,14E-11	<b>-6,82E-07</b>	5,77E-07	-1,04E-07	-1,26E-06	<b>4,99E-07</b>	-1,83E-07	-1,18E-06

AMOSTRAGEM SUFICIENTE EM X = 5

A incerteza relativa à UTS, da ordem de  $\pm 500$  ns/dia, é aproximadamente uma ordem de grandeza maior em comparação com a incerteza introduzida pelo contador (aproximadamente  $\pm 40$  ns/dia) o que sugere sua importância relativa.

### 7.4.3 – Incerteza global do SISLOC

Medir separadamente os erros e as incertezas acrescidas por contribuição individual dos elementos do sistema de calibração óptica de cronômetros foi útil para uma compreensão mais acurada

do comportamento dos equipamentos, mas um método mais direto é recomendável. De posse dos certificados de calibração dos padrões envolvidos, o erro introduzido globalmente pelo sistema na determinação do período de pulsação intrínseco de um cronômetro foi determinado aplicando a mesma técnica usada na calibração da UTS, com a ressalva da possibilidade de variação do período de pulsação em passos de  $1 \mu\text{s/s}$  e  $10 \mu\text{s/s}$ . Este processo consistiu em aplicar ao dispositivo óptico de captura da UTS um sinal luminoso pulsado de período bem definido, comparando-o com o valor medido pelo *Sistema* completo. Este sinal luminoso simula perfeitamente o que seria proveniente de um cronômetro, sendo obtido das duas formas descritas abaixo;

- a) através da conexão de um LED ou LCD diretamente à saída de 1 Hz de uma fonte de frequência padrão, como o Rubidium Frequenzstandard XSRM, da Rohde & Schwarz, colocando-o sob o campo óptico do dispositivo de captura do *Sistema*, como foi feito para calibrar a UTS, como mostrado na figura 7.9. O valor de período medido desta forma pode, então, ser comparado com o valor medido pelo contador de períodos longos, como o SR620 da Stanford Researchs, quando o sinal de 1 Hz do padrão é aplicado diretamente, por conexão elétrica ;

Este método tem a vantagem de ser facilmente implementável, aproveitando toda a estabilidade da base-de-tempo padrão, e a desvantagem de não possibilitar a variação do período da pulsação. A incerteza expandida calculada através de seis medições feitas com este método – descrito na calibração da UTS – atingiu  $\pm 500 \text{ ns/dia}$ .

- b) com a saída do padrão de frequência conectada às entradas para bases-de-tempo externas do Sintetizador Fluke 6061A e do Contador SR620, pode-se gerar naquele qualquer frequência que seja necessária, dentro de um amplo intervalo, mantendo-a estável em uma parte em  $10^{10}$  e com resolução de 10 Hz. A figura 7.10 ilustra esta montagem. A saída deste gerador pode ser, então, aplicada à entrada de um divisor decádico conveniente, que alimentará um LED ou LCD cuja frequência pode ser tão baixa quanto necessário, de forma a obter pulsos luminosos semelhantes aos obtidos com cronômetros, e que pode ser colocado no lugar do cronômetro sob calibração ;

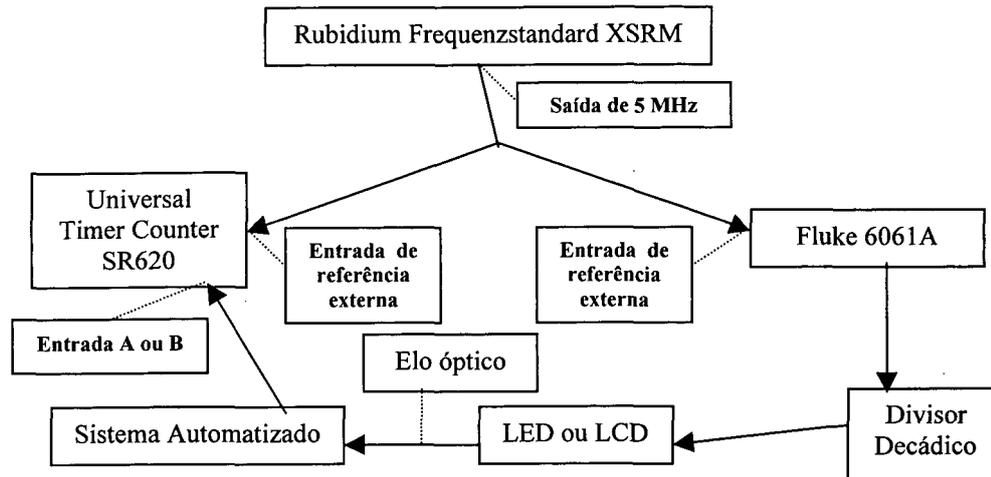


Figura 7.10 : Diagrama em blocos do circuito “b” de avaliação de erros do *Sistema*

A atuação sobre o controle de frequência do Sintetizador Fluke 6061A permitiu que fosse simulado qualquer valor de erro (múltiplo de  $1 \mu\text{s/s}$ ), para mais ou para menos, no período de pulsação do LED ou LCD, em relação ao período considerado como *de referência*, exatamente como ocorre com cronômetros. Apesar do incremento na incerteza global gerado pela introdução de um sintetizador de frequência no caminho do sinal elétrico entre a base-de-tempo e o SISLOC, por este método foi possível determinar a linearidade da indicação do *Sistema* frente a diferentes períodos, correspondentes a diferentes cronômetros sob calibração.

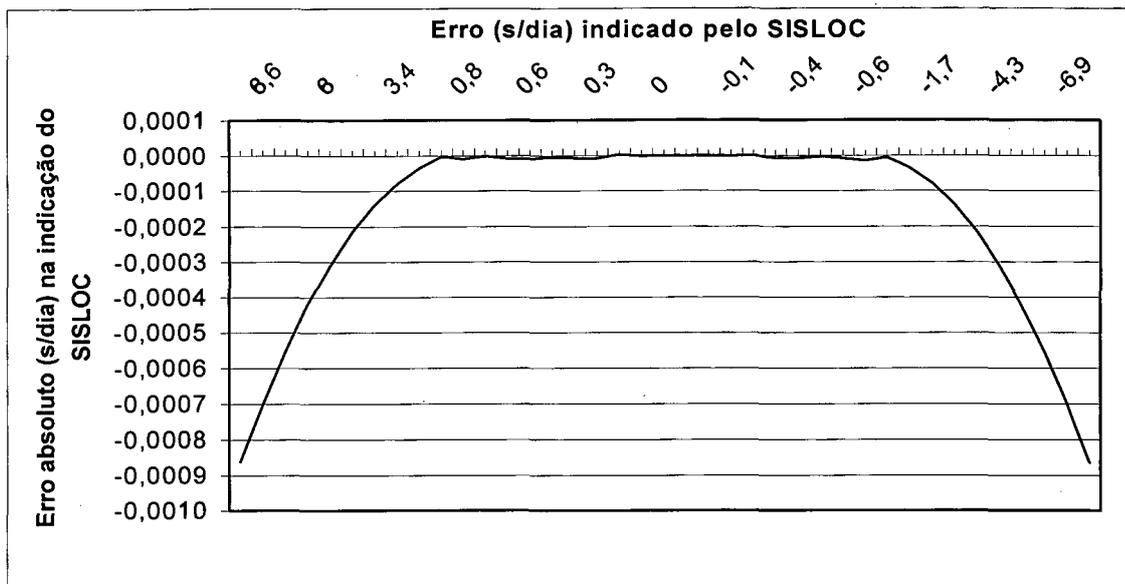
Embora o único documento oficial de calibração do gerador Fluke 6061A (reproduzido no anexo 7) assumia uma incerteza em sua frequência gerada equivalente à resolução de seu mostrador (10 Hz), neste experimento foi assumida uma incerteza de  $121 \mu\text{Hz}$ , para 9,999 MHz, 10 MHz e 10,001 MHz de saída. Esta incerteza substancialmente menor foi obtida graças à introdução da base-de-tempo padrão de rubídio como fonte externa de referência do gerador. As medições que indicaram a incerteza de  $121 \mu\text{Hz}$  foram feitas com o auxílio do contador SR620 e se encontram no anexo 8.

Cada uma das linhas da tabela 7.5, abaixo, representa uma calibração completa feita através do sistema automatizado pelo método descrito no item b. Os degraus de  $1 \mu\text{s/s}$  e  $10 \mu\text{s/s}$  foram obtidos através do incremento de 10 Hz e 100 Hz, respectivamente, sobre a frequência central de 10 MHz na saída do sintetizador. Cada  $1 \mu\text{s/s}$  de variação no período da pulsação gerada representa um incremento de 86,4 ms/dia no erro esperado.

Tabela 7.5 – Dados de calibração do SISLOC

Desvio de período gerado ( $\mu\text{s/s}$ )	Erro projetado pelo desvio (s/dia)	Erro indicado pelo SISLOC (s/dia)	Incerteza indicada pelo SISLOC (s/dia)	Erro absoluto do SISLOC (projetado-indicado) (s/dia)
- 100	+ 8,64000000	+ 8,64086260	$2,4 \times 10^{-6}$	$-8,63 \times 10^{-4}$
- 90	+ 7,77600000	+ 7,77670210	$2,2 \times 10^{-6}$	$-7,02 \times 10^{-4}$
- 80	+ 6,91200000	+ 6,91255570	$1,3 \times 10^{-6}$	$-5,56 \times 10^{-4}$
- 70	+ 6,04800000	+ 6,04842070	$1,8 \times 10^{-6}$	$-4,21 \times 10^{-4}$
- 60	+ 5,18400000	+ 5,18431140	$1,7 \times 10^{-6}$	$-3,11 \times 10^{-4}$
- 50	+ 4,32000000	+ 4,32021440	$1,9 \times 10^{-6}$	$-2,14 \times 10^{-4}$
- 40	+ 3,45600000	+ 3,45613870	$1,9 \times 10^{-6}$	$-1,39 \times 10^{-4}$
- 30	+ 2,59200000	+ 2,59207910	$2,2 \times 10^{-6}$	$-7,91 \times 10^{-5}$
- 20	+ 1,72800000	+ 1,72803442	$6,6 \times 10^{-7}$	$-3,44 \times 10^{-5}$
- 10	+ 0,86400000	+ 0,86400300	$1,5 \times 10^{-5}$	$-3,00 \times 10^{-6}$
- 9	+ 0,77760000	+ 0,77760900	$1,0 \times 10^{-5}$	$-9,00 \times 10^{-6}$
- 8	+ 0,69120000	+ 0,69120100	$1,9 \times 10^{-5}$	$-1,00 \times 10^{-6}$
- 7	+ 0,60480000	+ 0,60480770	$7,8 \times 10^{-6}$	$-7,70 \times 10^{-6}$
- 6	+ 0,51840000	+ 0,51840950	$5,7 \times 10^{-6}$	$-9,50 \times 10^{-6}$
- 5	+ 0,43200000	+ 0,43200440	$8,1 \times 10^{-6}$	$-4,40 \times 10^{-6}$
- 4	+ 0,34560000	+ 0,34560670	$6,3 \times 10^{-6}$	$-6,70 \times 10^{-6}$
- 3	+ 0,25920000	+ 0,25920730	$4,1 \times 10^{-6}$	$-7,30 \times 10^{-6}$
- 2	+ 0,17280000	+ 0,17279740	$3,2 \times 10^{-6}$	$2,60 \times 10^{-6}$
- 1	+ 0,08640000	+ 0,08640133	$2,9 \times 10^{-7}$	$-1,33 \times 10^{-6}$
0	0,00000000	- 0,00000070	$3,1 \times 10^{-6}$	$7,00 \times 10^{-7}$
+ 1	- 0,08640000	- 0,08639880	$1,6 \times 10^{-6}$	$-1,20 \times 10^{-6}$
+ 2	- 0,17280000	- 0,17280050	$3,7 \times 10^{-6}$	$5,00 \times 10^{-7}$
+ 3	- 0,25920000	- 0,25919900	$1,8 \times 10^{-6}$	$-1,00 \times 10^{-6}$
+ 4	- 0,34560000	- 0,34560080	$5,6 \times 10^{-6}$	$8,00 \times 10^{-7}$
+ 5	- 0,43200000	- 0,43199300	$1,2 \times 10^{-5}$	$-7,00 \times 10^{-6}$
+ 6	- 0,51840000	- 0,51839190	$4,6 \times 10^{-6}$	$-8,10 \times 10^{-6}$
+ 7	- 0,60480000	- 0,60479720	$5,2 \times 10^{-6}$	$-2,80 \times 10^{-6}$
+ 8	- 0,69120000	- 0,69119200	$1,3 \times 10^{-5}$	$-8,00 \times 10^{-6}$
+ 9	- 0,77760000	- 0,77758600	$1,1 \times 10^{-5}$	$-1,40 \times 10^{-5}$
+ 10	- 0,86400000	- 0,86399490	$4,8 \times 10^{-6}$	$-5,10 \times 10^{-6}$
+ 20	- 1,72800000	- 1,72796498	$7,9 \times 10^{-7}$	$-3,50 \times 10^{-5}$
+ 30	- 2,59200000	- 2,59192202	$9,8 \times 10^{-7}$	$-7,80 \times 10^{-5}$
+ 40	- 3,45600000	- 3,45586080	$1,2 \times 10^{-6}$	$-1,39 \times 10^{-4}$
+ 50	- 4,32000000	- 4,31978441	$6,8 \times 10^{-7}$	$-2,16 \times 10^{-4}$
+ 60	- 5,18400000	- 5,18368740	$1,1 \times 10^{-6}$	$-3,13 \times 10^{-4}$
+ 70	- 6,04800000	- 6,04757440	$1,8 \times 10^{-6}$	$-4,26 \times 10^{-4}$
+ 80	- 6,91200000	- 6,91144790	$1,2 \times 10^{-6}$	$-5,52 \times 10^{-4}$
+ 90	- 7,77600000	- 7,77529986	$3,6 \times 10^{-7}$	$-7,00 \times 10^{-4}$
+ 100	- 8,64000000	- 8,63913460	$3,6 \times 10^{-6}$	$-8,65 \times 10^{-4}$

No gráfico da figura 7.11 o comportamento do erro absoluto do SISLOC, indicado na tabela 7.5, é apresentado relacionado ao erro/dia projetado correspondente, permitindo a identificação da dependência existente entre estas duas grandezas.



**Figura 7.11 – Erro absoluto do SISLOC versus erro/dia projetado (s/dia)**

A análise do gráfico da figura 7.11 permite concluir que o erro absoluto do SISLOC é sempre menor que 1 ms/dia, para qualquer projeção de erro dentro do intervalo [-10 s/dia ; +10 s/dia] que engloba praticamente a totalidade dos cronômetros digitais de uso industrial já calibrados pelo LABELO. Por outro lado, para erros compreendidos no intervalo [-3 s/dia ; +3 s/dia] o erro introduzido pelo SISLOC é igual ou menor que 0,1 ms/dia.

Na tabela 7.6 um quadro sucinto apresenta as contribuições individuais de incerteza (erros sistemáticos mais aleatórios) da base-de-tempo padrão Rubidium Frequenzstandard XSRM, do contador digital SR620 e do sintetizador de frequência 6061A, obtidas através das informações constantes nos respectivos certificados de calibração ou através de medições realizadas sob condições praticamente iguais às aplicadas na calibração de cronômetros. No caso da base-de-tempo padrão foram simplesmente somadas as parcelas sistemática e aleatória indicadas no certificado de calibração. O contador digital, porém, foi calibrado especificamente para a escala de medição de período de 1 segundo, sob amostragem de 500 segundos, em procedimento descrito alguns parágrafos atrás, na configuração definida na figura 7.8, tendo seu erro sistemático e aleatório incluídos em um único valor assumido como incerteza na sua indicação. O sintetizador de frequência foi também calibrado nas condições de utilização, do modo descrito no anexo 8, resultando que sua contribuição inclui igualmente as parcelas sistemática e aleatória.

Tabela 7.6 – Quadro das contribuições globais de incerteza dos componentes utilizados

Componente calibrado	Contribuição global
Base-de-tempo XSRM $(-1,6 \pm 0,6) \times 10^{-12}$ Hz/Hz ou $\pm 2,2 \times 10^{-12}$ s/s	$\pm 1,9 \times 10^{-7}$ s/dia
Contador SR620 (referência externa, 500 s de amostra) $\pm 0,43 \times 10^{-12}$ s/s	$\pm 3,7 \times 10^{-8}$ s/dia
Sintetizador 6061A (referência externa, 500 s de amostra, 10 MHz) $\pm 121 \mu\text{Hz}$ ou $1,21 \times 10^{-11}$ s/s	$\pm 1,0 \times 10^{-6}$ s/dia

A curva de erro apresentada na figura 7.11, assim, pode corretamente ser atribuída ao SISLOC, para todos os efeitos práticos, pois as contribuições da base-de-tempo padrão ( $\pm 1,9 \times 10^{-7}$  s/dia), do contador digital ( $\pm 3,7 \times 10^{-8}$  s/dia), e do sintetizador de frequência ( $\pm 1,0 \times 10^{-6}$  s/dia), consideradas conjuntamente com os erros sistemáticos correspondentes, são todas várias ordens de grandeza menores que a incerteza atribuível ao sistema como um todo ( $\pm 1,0 \times 10^{-3}$  s/dia), como se pode verificar através da análise individual de seus comportamentos, descritos na tabela 7.6.

### 7.5 – Condições ótimas de utilização do SISLOC

Na calibração de cronômetros industriais de mão não há sentido em buscar incertezas numericamente muito menores que a introduzida pela operação humana, da ordem de décimos de segundo para qualquer período de medição, exceto nos casos onde o cronômetro é utilizado com disparo e trava mecanicamente acoplados ao sistema sob acompanhamento. Mesmo nesta situação peculiar, porém, a imprecisão acrescida à medição utilizando um típico cronômetro industrial de mão está relacionada à resolução de sua indicação, ou seja, 1 centésimo de segundo ou 1 milésimo de segundo, nos tipos mais sofisticados, já que na grande maioria dos casos uma única medição é realizada.

De acordo com os resultados da calibração do SISLOC, demonstrados no item anterior, a incerteza em uma calibração de cronômetro é sempre menor que 1 milissegundo em um período de 24 horas, em todos os casos cujo erro esteja compreendido entre  $-10$  e  $+10$  segundos/dia. Mesmo admitindo que calibrações possam ser necessárias em cronômetros cujo erro esteja além deste limite, seus resultados podem ainda ser utilizados sem necessidade de acréscimos à incerteza de  $\pm 1$  ms, desde que o intervalo de projeção seja convenientemente reduzido, como é praxe em cronômetros mecânicos.

Esta possibilidade se deve ao fato de que a incerteza indicada no resultado de calibrações automatizadas é projetada para um período de 24 horas visando a uniformização da apresentação dos certificados, independentemente do tipo de cronômetro. Na verdade a incerteza calculada pela análise estatística dos dados se refere ao intervalo de amostragem usado na calibração (500 s), sendo depois projetada para 24 horas pela introdução do fator 86400 s/dia dividido pelo período nominal do ponto pulsante utilizado. Desta forma a incerteza máxima de 1 ms pode ser proporcionalmente reduzida quando o período de projeção é menor que 24 horas. Na verdade isto é feito pelo próprio programa gerenciador, no cálculo e apresentação dos resultados.

Na figura 7.12 um gráfico qualitativo mostra como a incerteza apresentada pelo SISLOC se relaciona com o período do ponto pulsante utilizado, com o período amostral e com os períodos projetados desde 1 minuto até 24 horas. É útil observar que para períodos inferiores a 500 segundos (aproximadamente 10 minutos) não há redução proporcional da incerteza apresentada porque, como o período mínimo amostrado é 500 segundos, o sistema desconhece, a rigor, flutuações na indicação do cronômetro em qualquer instante intermediário. Em teoria, a partir de considerações sobre a estabilidade pressuposta como característica de qualquer cronômetro associada a estratégias estatísticas simples, seria possível determinar a incerteza interpolada para intervalos de tempo inferiores à amplitude amostral. Esta incerteza seria mais otimista do que a indicada pelo SISLOC para estes períodos, mas completamente inútil para a caracterização do cronômetro, pois seu valor estaria sempre muito abaixo da resolução do instrumento.

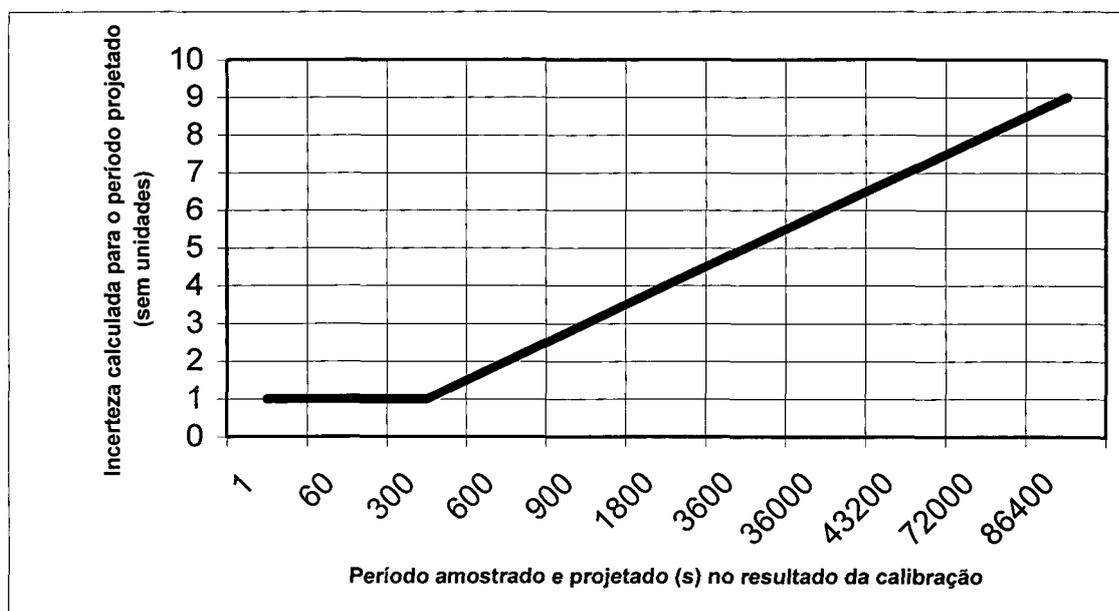


Figura 7.12 – Extrapolação da incerteza (em tempo) em função do período amostral

Na tela de apresentação do programa gerenciador, assim como no relatório impresso, o erro e a incerteza projetados para os diversos intervalos de tempo previstos são apresentados usando a lógica que impede qualquer redução da incerteza para aquém do valor calculado para o intervalo de amostragem. Na prática isto equivale dizer que a incerteza indicada para os períodos de 10 minutos, 5 minutos e 1 minuto é a mesma, ainda que o erro seja diferente para cada um destes intervalos. Outra consequência desta atitude é que a barreira representada pelo valor de incerteza de  $\pm 1$  ms não é significativa a não ser que o período considerado seja 24 horas. Para períodos menores a incerteza associada a uma calibração com o SISLOC pode ser bem menor.

Na projeção extrapolada da incerteza sobre o resultado de uma calibração de cronômetro a lógica aplicada pode ser compreendida como derivada do modelo matemático linear imputado ao erro do instrumento. Se for suposto que o erro em frequência ( $\Delta f/f$ ) da base-de-tempo interna do cronômetro é fixo, por exemplo  $a$ , afetando de forma proporcional sua indicação, o erro esperado para qualquer intervalo  $\Delta t$  medido é  $a \times \Delta t$ . Um gráfico que mostrasse o comportamento do erro de medição do cronômetro em relação ao período medido seria uma linha reta com inclinação  $a$ . Por outro lado se uma característica subjacente da medição de  $a$  é uma incerteza  $Ua$ , obtida para um determinado  $\Delta t_0$  específico (no SISLOC este intervalo é da ordem de 10 minutos), a incerteza projetada para qualquer outro período  $\Delta t (> \Delta t_0)$  necessariamente deve sofrer um acréscimo proporcional.

A incerteza projetada por extrapolação para este período maior, porém, não deve ser confundida com a que seria obtida se o período de amostragem  $\Delta t_0$  fosse efetivamente ampliado até alcançar  $\Delta t$ . Nesse caso não haveria necessidade de extrapolar a incerteza pois o conhecimento do erro para este  $\Delta t$  definido seria diretamente estimado a partir das características da medição efetivamente realizada.

O gráfico da figura 7.13 detalha uma situação geral na qual um cronômetro é calibrado sobre um intervalo de amostragem  $\Delta t_0$ , sendo determinado um erro  $E$  para este intervalo. A pressuposição teórica de que este erro mantém proporcionalidade com o período amostral permite que se determine o erro relativo do cronômetro,  $a = E/\Delta t_0$ , cujo arcotangente corresponde ao ângulo de inclinação  $\alpha_1$ . Sobre o valor deste erro determinado no processo de calibração para uma incerteza de medição  $U_0$  que define uma faixa de valores possíveis para o erro  $E$ . Por consequência o ângulo  $\alpha_1$  também possui acoplada uma incerteza definida pelo intervalo  $[\alpha_2; \alpha_3]$ .

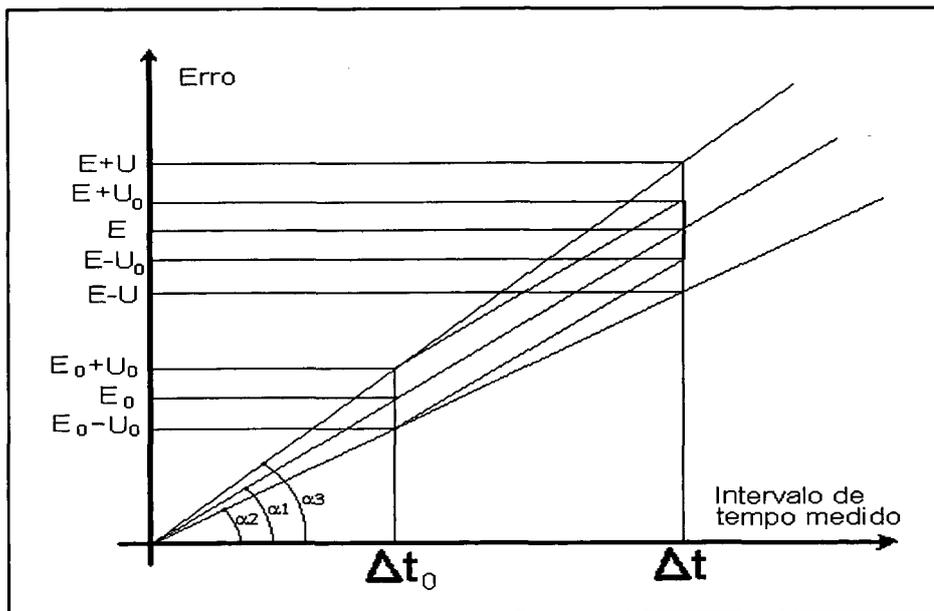


Figura 7.13 – Curva de erros em função da amostragem na calibração de cronômetros

Assim, se houver uma extrapolação do erro do cronômetro para um período maior  $\Delta t$ , a incerteza  $U_0$  deixa de representar o desconhecimento sobre o valor exato do erro. Neste caso uma nova incerteza  $U$ , que considera as diferentes inclinações possíveis do gráfico do erro, precisa ser assumida.

Simetricamente, se as condições forem mantidas as mesmas durante todo o intervalo  $\Delta t$ , por outro lado, significando que a amplitude das flutuações das leituras de período de pulsação do cronômetro se estabilize no mesmo patamar da correspondente ao intervalo  $\Delta t_0$  – uma pressuposição plausível – e a calibração for estendida até este novo período, a incerteza resultante desta calibração mais demorada seria reduzida proporcionalmente, aproximando-se do valor  $U_0$ . É possível concluir que uma calibração mais demorada, na qual o cronômetro permaneça mais tempo sob avaliação do sistema automatizado produza resultados mais favoráveis em termos de incerteza. Há, como sempre, um compromisso entre a necessidade a ser atendida e o custo de seu atendimento.

## 7.6 – Validação do programa de gerenciamento

Embora uma das características do programa gerenciador do Sistema de Calibração Óptica de Cronômetros seja sua simplicidade, a começar pela linguagem utilizada na programação, existe sempre a possibilidade de erros na lógica de processamento dos dados numéricos, de forma que foi implementado um procedimento de auditoria para validá-lo. Este procedimento envolveu os dados de uma calibração completa de um cronômetro, a partir da qual um auditor refez manualmente os cálculos previstos no programa, seguindo um roteiro lógico e metrologicamente correto.

No processo de validação do programa gerenciador o auditor recebeu os seguintes documentos:

- a) uma cópia impressa dos dados completos da calibração, como na tabela 7.4, conforme armazenados no arquivo de saída ;
- b) o relatório de calibração de cronômetros, como o da figura 6.8, emitido automaticamente ao fim da calibração ;
- c) uma planilha de conferência desenvolvida especificamente para esta finalidade, como a da figura 7.14, na qual os cálculos manuais do auditor podem ser facilmente confrontados com os cálculos que o sistema deve fazer e os resultados que deve emitir ;

Cálculos do SISLOC	Conferência
<p>N é o número de leituras feitas                      PI é o valor das leituras                      PN é o período nominal de pulsação do segmento                      PM é a média das leituras                      SL é o desvio padrão da média das leituras                      SLD é a incerteza expandida da média das leituras                      ERD é o erro do cronômetro projetado para 24 horas</p> $PM = \frac{\sum PI}{N}$ $SL = \sqrt{\frac{\sum (PI - PM)^2}{N - 1}}$ $ERD = (PM - PN) \times \frac{86400}{PN}$ $SLD = SL \times \frac{86400}{3.PN} \times \frac{t_{n,95\%}}{\sqrt{N}}$ <p>Um aviso de que a calibração pode ser encerrada é visualizado quando a média dos três últimos valores de SLD diverge menos de 5% de cada um deles, individualmente.</p>	

$$E_{24h} = -ERD$$

$$E_{20h} = -ERD \times \frac{20}{24}$$

$$E_{12h} = -ERD \times \frac{12}{24}$$

$$E_{10h} = -ERD \times \frac{10}{24}$$

$$E_{1h} = -ERD \times \frac{1}{24}$$

$$E_{30\text{ min}} = -ERD \times \frac{1}{2 \times 24}$$

$$E_{15\text{ min}} = -ERD \times \frac{1}{4 \times 24}$$

$$E_{10\text{ min}} = -ERD \times \frac{1}{6 \times 24}$$

$$E_{5\text{ min}} = -ERD \times \frac{1}{12 \times 24}$$

$$E_{1\text{ min}} = -ERD \times \frac{1}{60 \times 24}$$

$$U_{24\text{ h}} = SLD$$

$$U_{20\text{ h}} = SLD \times \frac{20}{24}$$

$$U_{12\text{ h}} = SLD \times \frac{12}{24}$$

$$U_{10\text{ h}} = SLD \times \frac{10}{24}$$

$$U_{1\text{ h}} = SLD \times \frac{1}{24}$$

$$U_{30\text{ min}} = SLD \times \frac{1}{2 \times 24}$$

$$U_{15\text{ min}} = SLD \times \frac{1}{4 \times 24}$$

$$U_{10\text{ min}} = SLD \times \frac{1}{6 \times 24}$$

$$U_{5\text{ min}} = SLD \times \frac{1}{6 \times 24}$$

$$U_{1\text{ min}} = SLD \times \frac{1}{6 \times 24}$$

Se ERD é negativo então o programa informa que o cronômetro está adiantando. Se ERD é positivo o programa informa que o cronômetro está atrasando.

O erro específico é calculado como...

$$\frac{|ERD|}{86400} \times 10^9 \text{ ns / s}$$

sendo apresentado, por truncagem, apenas sua parte inteira.

A incerteza específica expandida sobre o valor do erro é calculada como...

$\pm \frac{SLD}{86400} \times 10^9 \text{ ns / s}$ <p>sendo aplicável este fator apenas para extrapolações a partir de períodos superiores ao tempo amostral de 500 segundos. Abaixo deste limite aplica-se o valor de incerteza correspondente a 500 s.</p>	
--	--

**Figura 7.14– Planilha de conferência para validação do programa gerenciador**

Os documentos utilizados nesta auditoria, descritos nos itens a, b e c deste tópico, se encontram no anexo 3, inclusive com as anotações e os cálculos correspondentes. Estes documentos se referem à primeira auditoria realizada, quando duas não conformidades foram encontradas. Apesar de elas terem sido imediatamente corrigidas sua apreciação permite avaliar a eficácia do método para a detecção de erros no processamento, e por este motivo foram mantidas nos anexos.

## Capítulo 8

### Estimativas de incertezas na medição de tempo em aplicações industriais

---

**8 – Estimativas de incertezas na medição de tempo em aplicações industriais**

Este capítulo é dedicado ao usuário final que faz uso de um cronômetro de mão calibrado para medir intervalos de tempo. Apesar do fato de que o tema da tese se refere à calibração de cronômetros, assunto que deve interessar primordialmente aos laboratórios credenciados para este serviço, não se destinando ao usuário final de cronômetros calibrados, foi entendido que seria proveitoso incluir um capítulo demonstrando uma forma metrologicamente correta de utilizar as informações fornecidas no certificado de calibração. O texto apresentado abaixo tem este objetivo, pretendendo ser um roteiro idealizado para guiar o usuário de forma que consiga tirar proveito das informações presentes no certificado de calibração, adaptando-as para as particularidades da sua aplicação e permitindo uma correta medição de intervalos de tempo.

Quando um usuário recebe o certificado de calibração de um cronômetro a segunda etapa de um processo crítico de utilização de medições de tempo deve estar iniciando. A primeira foi, imperativamente, a análise que evidenciou a necessidade da calibração, ou seja, a tomada de posição ante uma medição de tempo cuja qualidade influi em algum grau relevante na qualidade de um produto ou serviço oferecido por este usuário. A utilização do resultado de uma calibração de cronômetros, em princípio, não difere substancialmente da que se orienta para qualquer outro instrumento de medição de aplicação industrial. Em síntese, alguma correção pode ter de ser feita em uma determinada leitura correspondente a uma medição de um certo intervalo de tempo, sendo que a esta medição irá corresponder uma incerteza que deve ser calculada utilizando os dados do certificado.

Uma medição de intervalos de tempo, porém, envolve uma grandeza não materializável, que não pode ser acumulada. O tempo não pára quando se aperta um botão, mas apenas nosso contador deixa de ser incrementado, de forma que não medimos *o tempo*, mas apenas algum *intervalo de tempo* entre dois eventos distinguíveis cujo lapso nos interessa. O cronômetro apenas acompanha o passar do tempo associando-o à acumulação de um número em uma memória, o que é feito a uma taxa fixa dada por um oscilador piezoelétrico, ou à posição de um ponteiro que se move atrelado à oscilação ritmada de um sistema anel-mola. Assim sendo o operador do cronômetro manual desempenha parte integrante do sistema de medição, no sentido de que é ele que faz a tarefa de uma espécie sofisticada de sensor.

Os cronômetros têm um comportamento caracterizado pela frequência de sua base-de-tempo interna, que impõe ao instrumento um erro proporcional ao intervalo de tempo medido. Assim, pelo menos em princípio, a incerteza sobre o resultado da medição da taxa de erro de um certo cronômetro pode ser proporcionalmente expandida para qualquer intervalo arbitrário, superior ao calibrado,

conforme discutido anteriormente. Esta extrapolação do erro e da incerteza obviamente tem suas limitações. Se o comportamento do cronômetro não for rigorosamente previsível, isto é, se o intervalo expandido for suficientemente grande para ocorrer uma perda considerável da tensão da mola, ou se existir uma pequena deformação ou desgaste em uma área delimitada de uma engrenagem, ou se o efeito do aumento do atrito causado pela deposição de uma pequena quantidade de sujeira em uma parte de uma peça móvel passa a se fazer sentir a partir de uma determinada posição desta peça, a calibração fica sem efeito. Neste caso o cronômetro mecânico precisa ser descartado, e o sistema óptico de calibração desenvolvido nesta tese tem condições de detectar o problema que se caracteriza por uma exacerbação da incerteza de medição indicada.

Por outro lado as condições ambientais nas quais um cronômetro é utilizado dificilmente coincidem com as existentes no laboratório de calibração, induzindo um acréscimo circunstancial na incerteza de uma determinada medição. Para orientar o usuário de cronômetros acerca das características próprias deste tipo de medição estão expostos abaixo alguns tópicos de relevância.

### 8.1 – Caracterizando o mensurando : exemplo de procedimento básico

O usuário de cronômetros, muitas vezes, pode não ter claro em sua mente as limitações do instrumento que utiliza, nem a diversidade de aplicações que ele pode ter. Assim é útil que, de uma forma didática, se faça a diferenciação de três tipos diferentes de medições :

- a) Monitoração de evento único : É o caso mais simples de medição de tempo, exemplificado tipicamente por competições esportivas de velocidade, como provas de natação, maratonas e obstáculos. Nestes casos o bom senso manda que o cronômetro calibrado seja operado por pessoal treinado de forma que a incerteza da operação humana seja minimizada ao máximo. Já que os intervalos medidos são quase sempre pequenos o erro proporcional introduzido pelo desvio de frequência da base-de-tempo também será quase sempre muito menor que o erro humano ;
- b) Monitoração de evento repetitivo : É o caso mais comum na indústria, onde se pretende avaliar o intervalo de tempo típico no qual ocorre um determinado evento. Trata-se de um mensurando que varia a cada nova medição, sendo que o interesse do usuário geralmente se orienta para o valor médio de muitas medições de intervalo de tempo. Neste caso estão o tempo de secagem de tintas, de evaporação de solventes, de aquecimento de substâncias, de passagem de fluidos por estricções, de despegamento de fitas autocolantes e inúmeros outros processos de interesse industrial, como medições para cálculo de produtividade e MTBF. Nestes casos há uma variabilidade intrínseca ao

---

processo de medição cuja origem está fora do binômio operador-cronômetro, e raramente uma precisão muito elevada é procurada ;

- c) Controle da duração de um evento : É a situação onde existe uma especificação do intervalo de tempo dentro do qual um evento deve se situar e pretende-se verificar se esta especificação é ou não obedecida. Nestes casos não se costuma exigir do processo de medição incerteza muito menor que 1/10 da faixa de tolerância admitida.

Qualquer que seja o tipo de medição de intervalos de tempo utilizado, porém, em primeiro lugar o usuário deve reconhecer que a introdução de um ser humano no laço de medição tem conseqüências importantes e nefastas para a qualidade dos resultados, quando comparados com os obtidos por meios automáticos. Um operador pode introduzir um erro de até 0,5 s em acionamentos seqüenciais de disparo e trava, de modo que se esta ordem de incerteza for considerada excessiva para uma dada aplicação a utilização de cronômetros de mão é ostensivamente desaconselhada. Bons cronometristas operando em condições de total atenção, sem agentes interferentes, podem introduzir erros tão pequenos quanto 0,2 s na medição de intervalos de tempo entre eventos luminosos e sonoros combinados, mas tais resultados não são garantidos. Mesmo que as condições externas, como o nível de ruído e o grau de iluminação, estejam sob controle de forma a não influenciar negativamente o operador, problemas de saúde, questões emocionais ou até distúrbios inconscientes afetam certamente a resposta a estímulos de qualquer indivíduo.

A temperatura ambiente também afeta significativamente o comportamento de cronômetros de mão na medida em que altera a frequência de oscilação elétrica da base-de-tempo a cristal piezoelétrico. Para uma correta avaliação desta influência é preciso saber a diferença entre a temperatura de utilização e a temperatura na qual o cronômetro foi calibrado. Para cada grau Celsius de diferença de temperatura são acrescentados ou subtraídos cerca de 0,5  $\mu\text{s/s}$  da indicação de um cronômetro típico, conforme experimentos realizados em meados de 1998, já descritos. Como não é prático nem barato determinar para cada cronômetro esta taxa de variação térmica, o produto da diferença de temperatura entre o laboratório e o ambiente industrial e a taxa típica exposta acima vai produzir um número que, em seu valor absoluto, deve ser adicionado à incerteza apontada no certificado.

Para melhor compreensão do processo simplificado de utilização de um cronômetro industrial calibrado, é descrito abaixo um exemplo de aplicação.

Dados do certificado de calibração :

erro : - 87,7  $\mu\text{s/s}$  (o cronômetro atrasa)

incerteza :  $\pm 4,7 \mu\text{s/s}$

temperatura de calibração : 23 °C

Dados da medição realizada pelo usuário :

temperatura de utilização : 30 °C

indicação no cronômetro do intervalo medido : 30 min 26 s 90 cs

resolução do cronômetro nesta escala : 0,01 s

Resultado da medição :

transformando para segundos : 30 min 26 s 90 cs = 1826,9 s

erro do cronômetro :  $1826,9 \text{ s} \times (-87,7 \mu\text{s/s}) = - 160219 \mu\text{s} = - 0,16 \text{ s}$  (de atraso)

correção da leitura : - (- 0,16 s) = + 0,16 s

resultado corrigido :  $1826,9 \text{ s} + 0,16 \text{ s} = 1827,1 \text{ s} = 30 \text{ min } 27 \text{ s } 06 \text{ cs}$

incerteza devido à diferença de temperatura :

$$(30 \text{ °C} - 23 \text{ °C}) \times 0,5 \mu\text{s}/(\text{s} \times \text{°C}) = \pm 3,5 \mu\text{s/s}$$

$$\text{que corresponde a uma incerteza absoluta : } \pm 3,5 \mu\text{s/s} \times 1827,1 \text{ s} = \pm 0,006 \text{ s}$$

incerteza presumida do operador (independente do intervalo medido) :  $\pm 0,5 \text{ s}$

incerteza indicada no certificado de calibração :  $\pm 4,7 \mu\text{s/s} \times 1827,1 \text{ s} = \pm 0,009 \text{ s}$

Na calibração a incerteza encontrada se deve fundamentalmente ao comportamento aleatório da base-de-tempo interna do cronômetro, enquanto na indústria as duas fontes de incerteza são a diferença de temperatura e a influência do operador. É lícito considerar as fontes de incerteza acima quantificadas como independentes, porque se referem a situações bem distintas, portanto podem ser unificadas através de uma média quadrática simples.

$$\text{Unificação das incertezas : } \sqrt{(0,6)^2 + (0,9)^2 + (50)^2} \cong 50 \text{ cs} = 0,5 \text{ s}$$

Resultado final da medição : 30 min 27 s 06 cs  $\pm 0,5 \text{ s}$

Há obviamente um absurdo na forma de apresentação deste resultado. Já que a incerteza final é da ordem de  $\frac{1}{2}$  segundo não há sentido em apresentar centésimos. O resultado mais correto seria

---

Resultado final da medição : 30 min 27 s  $\pm$  0,5 s

No exemplo acima a incerteza global da medição é praticamente igual à incerteza introduzida pela operação humana, o que é verdadeiro para a maioria das situações reais. Para situações extremas, é claro, a superioridade da influência humana pode não ser tão acentuada. Se a temperatura de utilização for muito diferente da laboratorial ou o intervalo de tempo medido for muito longo, por exemplo, ou simplesmente a incerteza indicada no certificado de calibração for elevada, como normalmente acontece com cronômetros de baixa qualidade ou mecânicos, o balanço de incertezas pode ser mais equilibrado.

## 8.2 – O processo de medição manual de intervalos de tempo : fontes de incertezas

Este item tem o objetivo de alertar o usuário industrial de cronômetros para características deste instrumento, de seu manuseio ou do tratamento dos dados resultantes de medições de intervalos de tempo, que podem prejudicar sua utilização adequada, assim como apontar fontes de incerteza de medição. Muitas não podem ser quantificadas previamente mas geralmente podem ser acompanhadas pela análise comparativa de resultados de incerteza em calibrações periódicas sucessivas.

- a) em cronômetros mecânicos o desgaste natural do mecanismo causa folgas nos eixos e engrenagens, com um incremento na incerteza de medição que pode ser acompanhado ao longo de alguns anos de calibrações sucessivas ;
- b) a má conservação de cronômetros mecânicos e eletrônicos que sofrem quedas ou são armazenados e utilizados em ambientes poeirentos ou sob atmosferas agressivas. Quedas causam deformações no mecanismo ou alteração nas variáveis mecânicas associadas ao cristal oscilador. Deposição de graxas, solventes e poeiras causam aumento de atrito nas engrenagens ou alteração na condutividade elétrica da superfície da placa de circuito impresso ;
- c) exposição a fontes térmicas, como o sol ou a proximidade a fornos. O aquecimento é especialmente danoso aos cronômetros eletrônicos pois altera o comportamento subsequente de capacitores com dielétrico polarizado, como eletrolíticos e de tântalo, freqüentemente usados nestes dispositivos, além de produzir ciclos de dilatação e contração que produzem estresse mecânico na peça de cristal oscilador ;

- 
- d) o desgaste excessivo da carga da bateria modifica parâmetros do bloco elétrico do oscilador e leva o sistema para uma região de não-linearidade na qual diferentes patamares de equilíbrio se sucedem, cada qual caracterizado por uma nova frequência levemente diferente da anterior, modificando o comportamento do cronômetro e aumentando a incerteza de medição ;
- e) a reação humana inclui o tempo de resposta do operador a estímulos externos, variável que não pode ser desprezada em uma medição de tempo. O tempo de resposta humano varia entre operações sucessivas para um mesmo operador e entre diferentes operadores. Genericamente o tempo de resposta para qualquer pessoa sadia, empenhada em reagir prontamente a um estímulo previsto, tem um limite superior pouco menor que 0,4 s. Como em qualquer medição de tempo há dois estímulos independentes a serem interpretados pelo operador é lícito considerar o valor seguro de 0,5 s, ou a média quadrática dos tempos parciais, como a incerteza a ser atribuída à ação humana (ver figura 8.1) ;
- f) a sinalização dos eventos que delimitam o intervalo de tempo a ser medido deve ser evidente e, na medida do possível, redundante. A resposta humana a estímulos externos é uma reação que pode ser aperfeiçoada por treinamento.

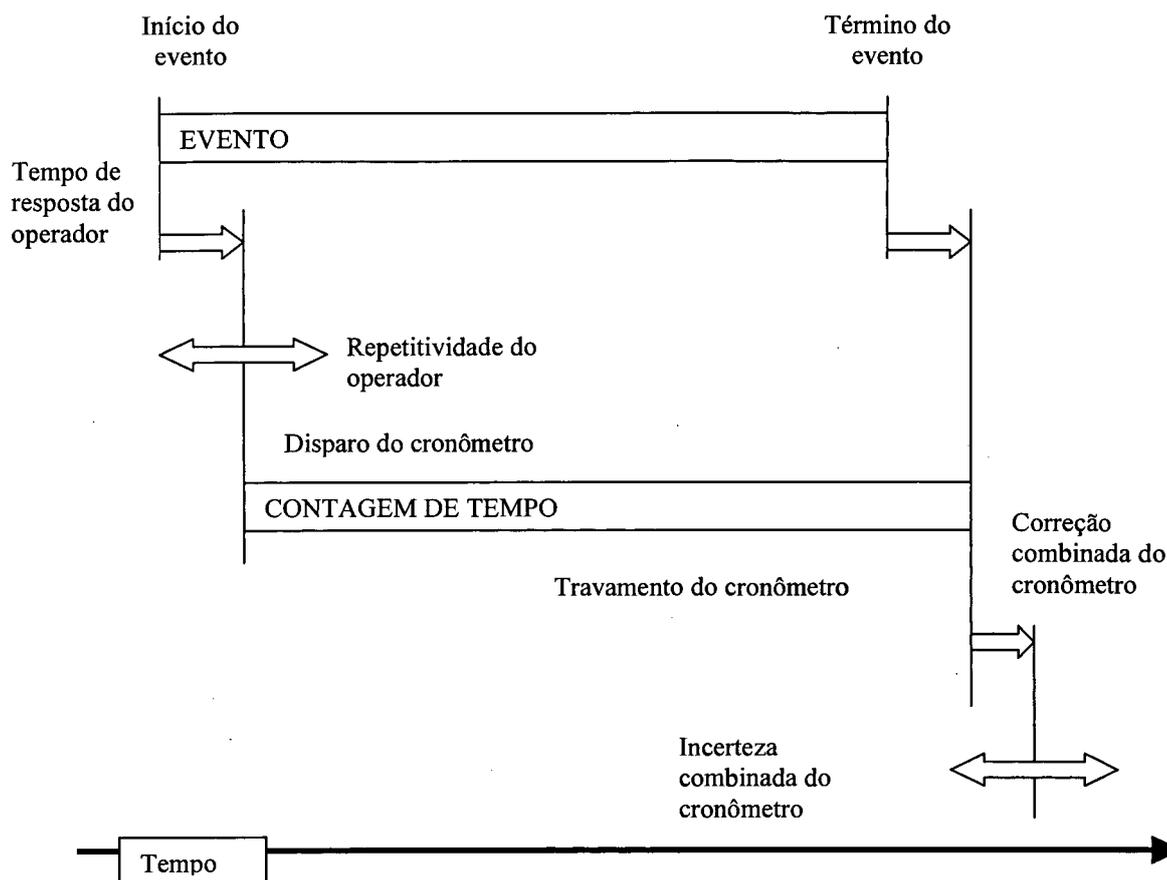


Figura 8.1 – Processo de medição manual de intervalos de tempo

### 8.3 – Estimativa da influência do operador

As características de um operador que realiza medições manuais de intervalos de tempo são variáveis de indivíduo para indivíduo e, para um mesmo indivíduo, fortemente dependente de seu estado emocional, condições físicas, conforto e fatores ambientais, entre outros. A proposta neste trabalho é de que os operadores sejam submetidos a um procedimento simples de qualificação, realizado em condições que se assemelhem às reais de utilização do cronômetro, repetidas vezes e em momentos diversos. No início do desenvolvimento do SISLOC foi realizado no LABELO um trabalho conjunto com o Centro Psicotécnico do Instituto de Psicologia da PUCRS que pretendia determinar o tempo de resposta a estímulos do pessoal do laboratório. Uma das etapas deste trabalho foi realizada com instrumental simples, comum em laboratórios metrológicos industriais, e pode ser realizado por empresas interessadas em levantar estes dados diretamente.

Para qualificar um operador é necessário um sistema simples que exige apenas uma fonte de frequência padrão calibrada, um divisor de frequência calibrado que permita obter, a partir da fonte padrão, um sinal digital de período comparável ao que se quer testar, um LED e um sinalizador sonoro

que possam ser acionados pelo sinal de saída do divisor, e um cronômetro calibrado, numa montagem descrita na figura 8.2.

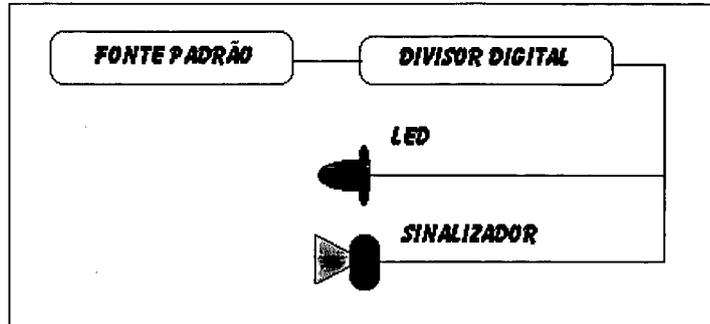


Figura 8.2 – Montagem para avaliação do tempo de resposta humano

Neste experimento o LED e o sinalizador sonoro vão emitir sinais de período idêntico ao sinal de saída do divisor. Se este for adequadamente escolhido, períodos de 10 segundos a 1 minuto poderão ser utilizados. O operador a ser avaliado segura o cronômetro e é avisado que deve medir o intervalo de tempo correspondente a uma transição ligado-desligado-ligado ou desligado-ligado-desligado dos emissores. O sistema é acionado e, na primeira transição que ocorrer, o operador dispara o cronômetro, travando-o na transição seguinte.

Supondo que a frequência de saída da fonte padrão é bem conhecida, assim como o fator de divisão empregado, o período de transição dos emissores pode ser calculado com precisão. Basta então comparar a indicação do cronômetro com este período determinado e, por subtração, encontrar o erro do operador naquela medição. Após vários ciclos uma média simples e um desvio padrão multiplicado pelo coeficiente de Student vão caracterizar o desempenho do operador naquele momento. A repetição deste experimento, com o mesmo operador, em diferentes ocasiões, pode auxiliar a quantificar mais precisamente a influência humana em um determinado processo de medição.

Assim, para cada operador, seria possível estimar dois parâmetros : tendência típica e repetitividade típica. A tendência corresponde à estimativa da componente sistemática do operador, estimada pela diferença da grande média dos intervalos medidos e seu valor de referência. A repetitividade é estimada pelo produto do desvio padrão das medições efetuadas pelo respectivo coeficiente de Student para 95% de probabilidade de enquadramento. Estes parâmetros poderiam ser utilizados para seleccionar os melhores operadores para medições críticas. No conjunto os dados dos grupos de operadores poderiam ser usados para melhor estimar valores típicos para estas incertezas.

---

#### 8.4 – Balanço de incertezas

O usuário de um cronômetro calibrado, aplicado à medição de intervalos de tempo em um processo industrial que necessite acompanhamento detalhado, vai certamente tentar extrair o máximo das informações que a medição puder fornecer. Neste caso não será suficiente simplesmente considerar a incerteza horizontal de 0,5 s no processo de medição, mas sim o resultado combinado dos dados de calibração do cronômetro com o levantamento do tempo de resposta do seu operador, como descrito no item 8.3, além da correção devida à diferença de temperatura entre o laboratório de calibração e o ambiente de utilização.

Um modelo de balanço simplificado de incertezas, adequado a um usuário industrial, foi apresentado no item 8.1. No atual tópico é abordada uma situação com incremento de complexidade caracterizada pela necessidade de considerar todas as fontes mensuráveis de incerteza, sem a possibilidade de ignorá-las em relação à magnitude da influência do operador. Neste caso vai ser exposta uma situação extrema, onde tanto a divergência entre a temperatura de calibração e a de uso como o intervalo de tempo medido são grandes. Por outro lado as incertezas serão apresentadas em uma planilha que permite plena visualização da operação.

Operação : Determinação da incerteza em uma medição industrial de intervalo de tempo

Dados de calibração do cronômetro :

erro : + 85,2  $\mu\text{s/s}$  (o cronômetro adianta)

incerteza na medição do erro :  $\pm 24,0 \mu\text{s/s}$  ( $k=2$ , conforme certificado)

temperatura de calibração :  $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$

Dados da medição :

número de leituras : 10

intervalo de tempo médio lido : 15 h 27 min 23 s

desvio padrão da média das leituras : 12 s

resolução do cronômetro nesta escala : 1 s

temperatura na medição :  $(30 \pm 10) ^\circ\text{C}$

incerteza desta medição baseada na calibração :  $\pm 24,0 \mu\text{s/s} \times 55643 \text{ s} = \pm 1,3 \text{ s}$

Dados da literatura :

deriva térmica :  $\pm 0,5 (\mu\text{s/s}) \times ^\circ\text{C}$

incerteza relativa à operação humana :  $\pm 0,5$  s ( $k=2$ , conforme método utilizado)

Resultado corrigido :

conversão da média para segundos : 15 h 27 min 23 s = 55643 s

cálculo da correção :  $55643 \times (-85,2 \mu\text{s/s}) = -5$  s

média corrigida : 15 h 27 min 23 s - 5 s = 15 h 27 min 18 s = 55638 s

Incerteza relativa à temperatura :

no caso crítico a calibração se dá em 21 °C e o uso em 40 °C (diferença de 19 °C)

resulta em uma incerteza :  $\pm 0,5 \mu\text{s}/(\text{s}\times^\circ\text{C}) \times 19^\circ\text{C} = \pm 9,5 \mu\text{s/s}$

que, para o intervalo medido, representa :  $\pm 9,5 \mu\text{s/s} \times 55643 \text{ s} = \pm 0,5$  s

**Tabela 8.1 – Planilha de cálculo de incertezas do exemplo apresentado**

Fonte de incerteza	Valor	Distribuição de probabilidade	Divisor	Incerteza padrão (u)	Graus de liberdade (v)
cronômetro	$\pm 1,3$ s	Normal	2	$\pm 0,65$ s	50
tipo A	$\pm 12$ s	Normal	1	$\pm 12$ s	9
resolução	$\pm 0,5$ s	Retangular	$\sqrt{3}$	$\pm 0,29$ s	$\infty$
temperatura	$\pm 0,5$ s	Retangular	$\sqrt{3}$	$\pm 0,29$ s	$\infty$
operação	$\pm 0,5$ s	Normal	2	$\pm 0,25$ s	50

Incerteza combinada (Normal)  $U_c = \sqrt{0,65^2 + 12^2 + 0,29^2 + 0,29^2 + 0,25^2} = \pm 12,03$  s

Graus de liberdade de  $U_c = \frac{12,03^4}{\frac{0,65^4}{50} + \frac{12^4}{9} + \frac{0,29^4}{\infty} + \frac{0,29^4}{\infty} + \frac{0,25^4}{50}} \cong 9$

Incerteza expandida (Normal,  $k=2,3$ )  $U = 2,3 \times (\pm 12,03) \approx \pm 28$  s

Neste caso o intervalo de tempo medido seria melhor representado como  $\Delta t = 15$  h 27 min  $\pm 28$  s.

Um estudo mais profundo da fonte desta variação talvez devesse ser feito pelo usuário, dependendo de suas necessidades. Como uma grande variação foi encontrada nos resultados diretos de medição, é provável que fontes interferentes ao processo estudado estejam atuando durante o intervalo de medição. É possível também que o próprio evento medido não possua constância temporal melhor do que a que foi encontrada. De qualquer modo este experimento demonstra como pode ser feita a quantificação das incertezas e a conseqüente identificação das principais fontes.

### 8.5 – Validade dos resultados

Fica assim caracterizado um modelo de balanço de incertezas relativamente complexo, utilizando dados de calibração, da literatura e de medição, além de incluir a influência da variação da temperatura ao longo do período de medição. O cálculo dos graus de liberdade da incerteza combinada foi realizado com o auxílio da fórmula de Welch-Satterwaite. O valor  $k=2,3$  foi obtido para uma confiabilidade de 95%. A incerteza expandida deve-se, neste caso, quase exclusivamente à dispersão encontrada nos dados da medição industrial, sugerindo que o fenômeno medido não mantém uma regularidade muito superior à indicada por  $U$ .

Na prática um levantamento muito simples das fontes de incerteza em uma medição industrial específica pode evidenciar a preponderância de uma delas. No caso descrito no item 8.4 a superioridade flagrante da dispersão das medições em relação à incerteza atribuível à operação humana poderia ser usada em uma análise crítica que impugnasse a necessidade de considerar outras fontes menores, simplificando um cálculo apriorístico da incerteza.

Se os resultados de medições de tempo, porém, forem utilizados em aplicações críticas, ou fornecidos a terceiros, a incerteza expandida deve ser rigorosamente calculada, de forma que o cliente possa avaliar precisamente o significado dos dados que recebe, incluindo-os corretamente em novas projeções de incerteza que tenham que ser realizadas.

Igualmente, quando houver qualquer alteração no processo de medição pode ser necessário refazer os cálculos incluindo eventuais novas fontes de incerteza introduzidas. A simples substituição do operador, por exemplo, não caracteriza uma alteração significativa porque a incerteza de 0,5 s atribuída à ação humana é suficientemente ampla para ser aplicada indiscriminadamente. A troca de um termômetro, porém, especialmente quando a deriva térmica é convertida de um elemento do cálculo de incerteza para servir de instrumento de correção do erro sistemático, fato que pode ocorrer em aplicações com alta exigência de confiabilidade, exige inexoravelmente que se considere seus dados de calibração na confecção da nova planilha.

Um modo bastante pragmático de determinar se há necessidade de refazer uma planilha de incertezas na medição de intervalos de tempo com cronômetros é comparar o resultado de um cálculo preliminar das influências individuais das novas fontes com os dados anteriores. Caso a incerteza acrescida ao processo seja comparativamente maior do que as consideradas anteriormente é

---

imprescindível a realização da tarefa. A investigação deve incluir também os graus de liberdade da nova fonte pois incertezas do tipo A calculadas através de baixo número de medições tendem a reduzir os graus de liberdade da incerteza combinada, aumentando consideravelmente o fator  $k$  da incerteza expandida para uma mesma confiabilidade.

## Capítulo 9

## Conclusões

## 9 - Conclusões

No início desta pesquisa, a partir dos primeiros resultados experimentais obtidos com um protótipo singelo do atual SISLOC, foram feitas estimativas sobre qual a incerteza que resultaria de um processo completamente autônomo de calibração óptica de cronômetros. Na ocasião, em virtude da precariedade do equipamento óptico disponível e do desconhecimento de uma metodologia definida que permitisse o cálculo de um valor realista da incerteza, apenas a confiança empírica de que a automatização poderia produzir resultados mais precisos em menor tempo que processo manual permitiu a continuidade dos trabalhos.

Hoje, após a análise dos dados provenientes de mais de mil calibrações realizadas com o auxílio do Sistema Automatizado de Calibração Óptica de Cronômetros, já otimizado e maduro, uma exposição realista da capacidade do processo surpreende até mesmo o pessoal diretamente envolvido. Enquanto originalmente o objetivo buscado envolvia apenas a ultrapassagem da tímida barreira representada pela estimativa da flutuação no tempo de resposta humana no acionamento de cronômetros – algo em torno de 0,4 segundo – ao final deste trabalho inclui-se na lista de características do SISLOC a capacidade de levantar o erro, em certos tipos de calibrações, com incerteza tão baixa quanto poucas centenas de picossegundos.

À calibração manual de cronômetros, cremos sinceramente, resta somente seu espaço na história da metrologia de tempo e frequência. Agora, com um sistema que envolve poucos componentes – apenas uma base-de-tempo padrão, um contador digital e um computador – o dispositivo óptico e o programa gerenciador do SISLOC podem realizar calibrações de cronômetros, com resultados equivalentes aos obtíveis através do processo manual, até mil vezes mais rapidamente. Para um laboratório como o LABELO/PUCRS, que calibra várias centenas de cronômetros todos os anos, este avanço representa um incremento substancial na produtividade.

Por outro lado esta pesquisa promoveu o estreitamento dos laços de cooperação entre os laboratórios envolvidos, o LABELO/PUCRS e o LABMETRO/UFSC, e deles com o órgão máximo em tempo e frequência no Brasil, o Observatório Nacional. Entidade, aliás, que muito antes da conclusão do sistema, já em 1996, numa demonstração da visão projetiva de seus responsáveis, em documento enviado ao LABELO, se manifestava positivamente em relação à ampliação do credenciamento do laboratório para níveis de incerteza, na calibração de cronômetros, compatíveis com o valor determinado neste trabalho.

Em síntese, o primeiro resultado desta tese foi a idealização, a construção e a avaliação metrológica do SISLOC - Sistema de Leitura Óptica de Cronômetros – um sistema automatizado dedicado à calibração de cronômetros de mão. Os dois protótipos construídos se encontram atualmente no LABELO/PUCRS, em operação, sendo que suas características incluem a compatibilidade com todos os tipos conhecidos de cronômetros de uso industrial. A incerteza global máxima introduzida pelo sistema em uma calibração é da ordem de décimos de milissegundo para erros de até 10 segundos por dia, determinados por extrapolação de 24 horas. Em situações nas quais o erro do cronômetro é menor que 1 segundo por dia, relativamente comuns em cronômetros digitais, a incerteza final pode atingir centenas de picossegundos para dez minutos de amostragem.

Como segundo importante produto deste trabalho deve ser salientado o estudo da variância aplicada à medição de tempo com o SISLOC. Ao contrário do que era pressuposto no início da pesquisa, a variância pareada, ou variância Allan, largamente usadas em medição de tempo e frequência, não produz resultados adequados quando o tratamento estatístico dos dados da medição envolve a média por grupamentos amostrais longos e regularmente separados por pequenos intervalos de *tempo morto*.

Na etapa de tomada de consciência da realidade industrial do uso de cronômetros, quando foram visitadas inúmeras empresas de diversos segmentos produtivos, comprovou-se também a pouca disseminação da cultura metrológica especificamente no tocante à medição de tempo. Virtualmente ninguém considerava, então, a influência humana em qualquer cálculo de incerteza nestas medições, sendo que o erro fornecido pelo certificado de calibração do cronômetro era utilizado simplesmente como um crivo que apenas definia a retirada daquele instrumento da linha de produção, e sua posterior reposição.

Uma adaptação do SISLOC tem sido utilizada experimentalmente na calibração de temporizadores de uso industrial, desde que exista um mostrador de LED ou LCD disponível no instrumento, com resultados promissores. Esta tentativa talvez possa ser levada adiante e, assim, mais dispositivos de tempo, tradicionalmente calibrados por via manual, possam vir a ser calibrados automaticamente. De qualquer forma a continuidade da pesquisa em metrologia e instrumentação nas instituições envolvidas está garantida pela decisão de investimento continuado, comprovada pelo patrocínio de mais estudos de pós-graduação como este.

## **Capítulo 10**

### **Referências bibliográficas**

---

**10 – Referências bibliográficas**

ALLAN, D.W. Statistics of Atomic Frequency Standards. Boulder : N.B.S., 1965.

ALLAN, D.W. Should the Classical Variance be Used as a Basic Measure in Standards Metrology ?  
I.E.E.E. Vol.IM-36, n.2, 1987.

ALLAN, D.W. et ali. Properties of signal sources and measurement methods. Proceedings of the 35<sup>th</sup>  
Annual Symposium on Frequency Control, 1981.

AUDOIN, C. Cesium Beam Frequency Standards : Classical and Optically Pumped. Metrologia  
(B.I.P.M), 1992, 29, 113-134.

BARNES, J.A. Atomic Timekeeping and the Statistics of Precision Signal Generators. Boulder :  
N.B.S., 1965.

BECHTOLD, J. Calibration of Time Base Oscillators. Santa Clara: HP Test & Measurement, 1994.

BEEHLER R.E. A Historical Review of Atomic Frequency Standards. Boulder : N.B.S., 1965.

BLAIR, B.E. Precision Measurement and Calibration. Colorado : N.B.S. , 1972.

CALIFORNIA SCIENTIFIC SOFTWARE, Introduction to Neural Networks and Expert Systems.  
Nevada, 1992.

CNPQ – Observatório Nacional – Departamento Serviço da Hora. Os Relógios e Sua Evolução.  
Brasil: 1991.

CNPQ – Observatório Nacional – Departamento Serviço da Hora. Laboratório Primário de Tempo e  
Frequência. Brasil: 1992.

COLLINGS, Peter J. Liquid crystals. Bristol : Adam Hilger, 1990.

COSTA NETO, P.L.O. Estatística. São Paulo: Edgard Blücher, 1977.

- 
- DANON Y. Windows Neural Network. St. Harad, Israel, 1996.
- EISTER, R. et ali. Física Quântica – Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas. Rio de Janeiro : Campus, 1994.
- ERIN, M. et ali. Progress in Stabilization of the He-Ne/I<sub>2</sub> Wavelength Standard at 633nm and Results of na International Comparison Between the PTB and the UME. Metrologia (B.I.P.M.), 1996, february, v.32, n.4, p.301-310.
- FEYNMAN,R.P. et ali. The Feynman Lectures on Physics – Quantum Mechanics. Massachussets : Addison-Wesley, 1965.
- GIBBLE, K. et ali. Future Slow-atom Frequency Standards. Metrologia (B.I.P.M), 1992, n.29, p.201-212.
- GONÇALVES JR. A.A. Metrologia – parte I. Florianópolis: LABMETRO, UFSC, 1997.
- HELLWIG, H. et ali. Automatic Tuning of Hydrogen MASERS. IEEE vol. 55, n. 4, april 1967.
- HELMCKE, J. Optical Frequency Standards : Atomic Clocks of the Future ?. in Kramer, 1988.
- HEWLETT PACKARD. HP application note 200-2. Santa Clara : Hewlett-Packard Company.
- HEWLETT PACKARD. HP53131A Universal Counter Operating Guide. Santa Clara : Hewlett-Packard Company, 1993.
- HEWLETT PACKARD BENCH BRIEFS. Calibration of Time Base Oscillators. EUA: 1994.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. Switzerland: 1993.
- INTERSIL- GE. Component data catalog 1987. Cupertino : 1987.
- JACOBS, Stephen D. Liquid crystal devices for LASER systems. New York : Plenum, 1986.

- 
- KARLQUIST, R. A New RF Architecture for Cesium Frequency Standards. U.S. 1991.
- KOVÁCS Z.L. Redes Neurais Artificiais. São Paulo: Acadêmica, 1996.
- KRAMER, B. The Art of Measurement. Braunschweig : P.T.B. 1988.
- KUSTERS, J.A. Traceability in Atomic Frequency Standards. HP data sheet, 1993.
- KUSTERS, J.A. et ali. A New Cesium Beam Frequency Standard Performance Data. IEEE Frequency Control Symposium, 1992.
- LESAGE, P. et ali. Characterization and measurement of time and frequency stability. Radio Science, vol.14, No.4, American Geophysical Union, 1979.
- MOCKLER, R.C. Atomic Beam Frequency Standards. Boulder : N.B.S., 1965.
- MOTOROLA. CMOS integrated circuits. Austin : Motorola Semiconductor Products INC, 1978.
- PHILIPS ELETRONICS AND COMPONENTS. IC04 Data Book HE4000B Logic Family CMOS. EUA: 1988.
- PHILIPS. Small-signal field effect transistors. Eindhoven : Philips Electr. Components and Materials, 1988.
- PHILIPS. Light emitting diodes. Eindhoven : Philips Electr. Components and Materials, 1988.
- PODOLEANU, A. Gh. Delay Measurements Using a Self-pulsating LASER with Optoelectronic Feedback. Measurement, Science & Technology, 1995, Vol.6, N.4, 371-375.
- RAMSEY, N.F. The Atomic Hydrogen MASER. N.B.S.: Boulder, 1965.
- RESNICK, R. et ali. Física Quântica – Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas. Rio de Janeiro : Campus, 1994.

- 
- RETTIG, J. et ali. Picossegund Time Interval Measurements. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements, april 1995.
- RICHARDSON J.M. Cesium Beam, Atomic Time and Frequency Standards. Boulder: N.B.S., 1965.
- ROHDE & SCHWARZ. Netzteil XSRM-Z Rubidium-Frequenzstandard Manual. Germany: 1989.
- ROHDE & SCHWARZ. Signal Generator SMG Manual. Germany: 1989.
- SAGAN, C. Cosmos. Rio de Janeiro : Francisco Alves, 1992.
- SCHOELER, N. et ali. Incerteza de Medição. Florianópolis: CERTI, LABMETRO, UFSC, 1997.
- SHIRLEY, J.H. Some Causes of Resonant Frequency Shifts in Atomic Beam Machines. Appl.Phys. Journal, 34, 783-791, 1963.
- SPIEGEL, M.R. Manual de Fórmulas e Tabelas Matemáticas. São Paulo: McGraw Hill, 1973.
- STANFORD RESEARCH SYSTEMS. Universal Time Interval Counter SR620 Manual. EUA: 1990.
- TABIRYAN, N.V. et ali. The orientational optical nonlinearity of liquid crystals. USA : Gordon.
- TAKAHASHI, H. et ali. Sampling na Real-time Methods in Electro-optic Probing System. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements, october 1995.
- TEXAS INSTRUMENTS. Advanced CMOS logic – Designer’s handbook. USA, 1988.
- THEISEN, Álvaro Medeiros de Farias. Fundamentos da Metrologia Industrial. Epecê, Porto Alegre, 1997.
- TIPLER, P.A. Física Moderna. Rio de Janeiro : Guanabara Dois, 1981.
- UDT SENSORS INC. Optoelectronic components catalog. Hawthorne : UDT Sensors INC. and Breach, 1986.

VAN PUTTEN, A.F.P. Electronic measurement systems. Hertfordshire : Prentice Hall, 1992.

WILMSHURST, T.H. Signal recovery from noise in electronic instrumentation. Bristol : Adam Hilger, 1985.

## **Anexos**

## **Anexo 1**

### **Relatório de calibração de cronômetros**

## SISLOC

## RELATORIO DE CALIBRACAO DE CRONOMETROS

PROTOCOLO DO CRONOMETRO : 0000  
 NOME DO OPERADOR : Auditoria  
 DATA DA CALIBRACAO (MM/DD/AA) : 08-13-1998  
 TAG DOS PADROES UTILIZADOS : F078f e F048r  
 NUMERO DE LEITURAS EFETUADAS : 6 N  
 INTERVALO ENTRE LEITURAS : 501 s  
 PERIODO MEDIO DAS LEITURAS (s) : 0.500006525905 PM  
 CALIBRACAO : NORMAL  
 ESTADO DO CRONOMETRO : ATRASANDO 13051 ns/s (+-) 740 ns/s

E24h (s) : -1.13	ERD	U24h (s) : 0.06	SLD
E20h (s) : -0.94		U20h (s) : 0.05	
E12h (s) : -0.56		U12h (s) : 0.03	
E10h (s) : -0.47		U10h (s) : 0.03	
E1h (s) : -0.05		U1h (s) : 0.00	
E30min (s) : -0.02		U30min (s) : 0.00	
E15min (s) : -0.01		U15min (s) : 0.00	
E10min (s) : -0.01		U10min (s) : 0.00	
E5min (s) : -0.00		U5min (s) : 0.00	
E1min (s) : -0.00		U1min (s) : 0.00	

DADOS DE CALIBRACAO GRAVADOS NO ARQUIVO C:/QB45/DADOS/LEITURA.TXT

\_\_\_\_\_  
João

## **Anexo 2**

**Conteúdo do arquivo  
LEITURA.TXT  
após a calibração**

PN	PRS	NOS	DTS	PADROES TIPO							
.5	0000	Auditoria	08-13-1998	F078f e F048r 0							
X	PI(X)	PM(X)	SL	SAL	ERD	SAD	ERD+SAD	ERD-SAD	SLD	ERD+SLD	ERD-SLD
1	.500006517243	0	0	.500006517243	0	0	0	0	0	0	0
2	.500007639875	0	0	.5000070785590001	7.938206999182642D-07	1.223174995210741	.139123741411151	1.362298736621892	1.08405125379959		
3	.500005769827	0	0	.500006642315	9.412768638718366D-07	1.147792032004702	.1134442860144715	1.261236318019173	1.03434774599023		
4	.500005386058	0	0	.5000063282507501	9.925792170491448D-07	1.093521729615077	7.212753933525309D-02	1.16564926895033	1.021394190279824		
5	.500007316522	0	0	.5000065259050001	9.665640896058042D-07	1.12767638400555	6.879137591880799D-02	1.196467759924358	1.058885008066742		

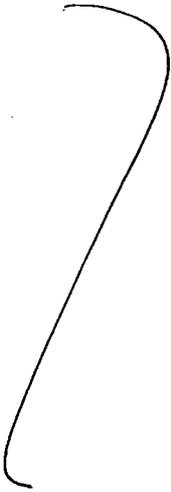
AMOSTRAGEM SUFICIENTE EM X = 5

PI A PI5

## **Anexo 3**

### **Planilha de validação do programa gerenciador**

Cálculos do SISLOC	Conferência
<p>N é o número de leituras feitas                      PI é o valor das leituras                      PN é o período nominal de pulsação do segmento                      PM é a média das leituras                      SL é o desvio padrão da média das leituras                      SLD é a incerteza expandida da média das leituras                      ERD é o erro do cronômetro projetado para 24 horas</p>	<p>0,500006517243,                      0,500007639875,                      0,500005769827,                      0,500005386058,                      0,500007316522, } PI's</p>
$PM = \frac{\sum PI}{N}$	<p>N=5 e</p>
$SL = \sqrt{\frac{\sum (PI - PM)^2}{N - 1}}$	<p>PN = 0,5s e</p>
$ERD = (PM - PN) \times \frac{8640}{PN}$	<p>PM = 0,500006525905, e</p>
$SLD = SL \times \frac{86400}{3 \cdot PN} \times \frac{t_{n,95\%}}{\sqrt{N}}$	<p>SL = 9,66567 · 10<sup>-7</sup> s</p>
<p>Um aviso de que a calibração pode ser encerrada á visualizado quando a média dos três últimos valores de SLD diverge menos de 5% de cada um deles, individualmente.</p>	<p>ERD = 6,525905 · 10<sup>-6</sup> s × <math>\frac{86400}{0,5}</math></p>
$E_{24h} = -ERD$	<p>ERD = 1,1276842 s/DIA e</p>
$E_{20h} = -ERD \times \frac{20}{24}$	<p>SLD = 9,66567 · 10<sup>-7</sup> × <math>\frac{86400}{3 \times 0,5} \times \frac{2,77}{\sqrt{5}}</math></p>
$E_{12h} = -ERD \times \frac{12}{24}$	<p>SLD = ± 0,06897 s/DIA e</p>
$E_{10h} = -ERD \times \frac{10}{24}$	<p style="text-align: center;">}</p>
$E_{1h} = -ERD \times \frac{1}{24}$	
$E_{30min} = -ERD \times \frac{1}{2 \times 24}$	
$E_{15min} = -ERD \times \frac{1}{4 \times 24}$	
$E_{10min} = -ERD \times \frac{1}{6 \times 24}$	

<p> <math>E5 \text{ min} = -ERD \times \frac{1}{12 \times 24}</math>  <math>E1 \text{ min} = -ERD \times \frac{1}{60 \times 24}</math>  <math>U24h = SLD</math>  <math>U20h = SLD \times \frac{20}{24}</math>  <math>U12h = SLD \times \frac{12}{24}</math>  <math>U10h = SLD \times \frac{10}{24}</math>  <math>U1h = SLD \times \frac{1}{24}</math>  <math>U30 \text{ min} = SLD \times \frac{1}{2 \times 24}</math>  <math>U15 \text{ min} = SLD \times \frac{1}{4 \times 24}</math>  <math>U10 \text{ min} = SLD \times \frac{1}{6 \times 24}</math>  <math>U5 \text{ min} = SLD \times \frac{1}{6 \times 24}</math>  <math>U1 \text{ min} = SLD \times \frac{1}{6 \times 24}</math> </p> <p>Se ERD é negativo então o programa informa que o cronômetro está adiantando. Se ERD é positivo o programa informa que o cronômetro está atrasando.</p> <p>O erro específico é calculado como...</p> <p> <math>\frac{ ERD }{86400} \times 10^9 \text{ ns/s}</math>                  sendo apresentado, por truncagem, apenas sua parte inteira.             </p> <p>A incerteza específica expandida sobre o valor do erro é calculada como...</p> <p> <math>\pm \frac{SLD}{86400} \times 10^9 \text{ ns/s}</math>                  sendo aplicável este valor apenas para extrapolações a partir de períodos superiores ao tempo amostral de 500 segundos.             </p>	 <p>                 ATRASANDO ERD + e             </p> <p> <math>\frac{1,1276842}{86400} \times 10^9 = 13051 \frac{\text{ms}}{\text{s}}</math> e             </p> <p> <math>\pm \frac{0,06897}{86400} \times 10^9 = 798 \frac{\text{ms}}{\text{s}}</math> ef             </p>
--	--

## **Anexo 4**

### **Certificado de calibração do padrão de frequência utilizado**



CNPq  
CONSELHO NACIONAL  
DE DESENVOLVIMENTO  
CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO



OBSERVATÓRIO  
NACIONAL

Depto. SERVIÇO DA HORA

LABORATÓRIO NACIONAL DE METROLOGIA - LNM

LABORATÓRIO COM DELEGAÇÃO DO INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL  
INMETRO

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº 065/96

NOME DO LABORATÓRIO: OBSERVATÓRIO NACIONAL DEPARTAMENTO SERVIÇO DA HORA Laboratório Primário de Tempo e Frequência	Nº DO CREDENCIAMENTO: 002 27 / 03 / 1984	FOLHA: 1 de 4
OBJETO: PADRÃO DE FREQUÊNCIA DE RUBÍDIO XRM 238.4011 (T86).		
FABRICANTE: ROHDE & SCHWARZ	Nº DE FABRICAÇÃO: 894680/010	
REQUERENTE: Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul - LABELO	MARCA DE AUTENTICAÇÃO:	PRÓX CALIBRAÇÃO: NOV 98

**CARACTERÍSTICAS DO OBJETO:**

Padrão de Frequência de Rubídio, marca ROHDE & SCHWARZ, modelo XSRM 238.4011-02 com relógio digital CADM 299.6014.02.

**PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO:**

Houve calibração direta entre o Padrão de Rubídio da PUC-RS (T86) e o Padrão Primário de Césio do Depto. Serviço da Hora (T65), transportado até o local, através da comparação de fase das saídas de 5 MHz dos Padrões e por medida direta de intervalo de tempo entre os respectivos pps (ver diagramas 1, 2 e 3).

**RESULTADOS OBTIDOS:**

**FUNÇÕES E CARACTERÍSTICAS MEDIDAS**

**1- Frequência**

Foi medida verificando-se para o intervalo final um erro relativo de:

$$\Delta f/f = (-1,6 \pm 0,6) \times 10^{-12} \text{ em } 1996, \text{ novembro, } 25\text{d}23\text{h}55\text{m TUC.}$$

Em valor absoluto, isto significa:

Para:

$$5 \text{ MHz} \rightarrow \Delta f = 5,0 \times 10^6 \times (-1,6 \times 10^{-12}) = -8,0 \text{ } \mu\text{Hz}$$

$$1 \text{ MHz} \rightarrow \Delta f = 1,0 \times 10^6 \times (-1,6 \times 10^{-12}) = -1,6 \text{ } \mu\text{Hz}$$

$$0,1 \text{ MHz} \rightarrow \Delta f = 0,1 \times 10^6 \times (-1,6 \times 10^{-12}) = -0,16 \text{ } \mu\text{Hz}$$

Sendo:

$$\Delta f = (f_{86} \text{ (PUC-RS)} - f_{TUC})$$

Estes são os valores de frequência inicial  $f_0$ , para qualquer extrapolação futura.

ASSINATURA AUTORIZADA:  PAULO MOURILHESILVA	 IVAN MOURILHESILVA	DATA: 030/12/96
---	------------------------	--------------------

OBS: ESTE CERTIFICADO NÃO TEM VALOR PARA FINS DE METROLOGIA LEGAL E SE LIMITA AO OBJETO CALIBRADO.  
A SUA REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DEPENDERÁ DE PRÉVIA AUTORIZAÇÃO DO LNM.

Rua General José Cristinino nº 77 - Rua General Bruce nº 586 - São Cristóvão - Rio de Janeiro - RJ  
Tel: (021) 585-3215 - Telex (021) 39159 - Fax (021) 580-6071 - Cx. Postal 23002 - CEP 20921-030

## **Anexo 5**

### **Certificado de calibração do contador digital utilizado**

LABELO/PUCRS

Página 2 de 4

<b>Certificado de Calibração</b>	<b>Nº F0111/98</b> Continuação
----------------------------------	-----------------------------------

FREQÜENCÍMETRO DIGITAL - STANFORD - SR620 - 1746 - TAG: F048f

27/03/98

**Resultado(s) da Calibração:**

*Freqüência*

Escala:		
Canal A - EXT		
VR UMP (Hz)	MM UST (Hz)	± IM (Hz)
100.000,000000	100.000,000001	0,00010
1.000.000,000000	999.999,999971	0,00100
5.000.000,000000	4.999.999,999869	0,0050
10.000.000,000000	9.999.999,999720	0,0100

Escala:		
Canal B - EXT		
VR UMP (Hz)	MM UST (Hz)	± IM (Hz)
100.000,000000	100.000,000009	0,00010
1.000.000,000000	999.999,999964	0,012758
5.000.000,000000	4.999.999,999858	0,0050
10.000.000,000000	9.999.999,999782	0,144338

Escala:		
Canal A - INT		
VR UMP (Hz)	MM UST (Hz)	± IM (Hz)
100.000,000	100.000,015	0,001
1.000.000,00	1.000.000,15	0,01
5.000.000,0	5.000.000,8	0,1
10.000.000,0	10.000.001,5	0,1

Escala:		
Canal B - INT		
VR UMP (Hz)	MM UST (Hz)	± IM (Hz)
100.000,00	100.001,15	0,76
1.000.000,0	1.000.000,6	0,1
5.000.000,0	5.000.000,7	0,1
10.000.000,0	10.000.001,5	0,1

## **Anexo 6**

### **Certificado de calibração do divisor utilizado**

LABELO/PUCRS

Página 2 de 2



Divisor de Freqüência — LABELO — 10N — Nº Série NI 134 — TAG F037f

28/07/97

**Resultado(s) da Calibração:**

Divisor	Relação	
	Por 1MHz	Por 9MHz
10 <sup>0</sup>	1,0000000 : 1	1,000000000 : 1
10 <sup>1</sup>	10,000000 : 1	10,00000000 : 1
10 <sup>2</sup>	100,00000 : 1	100,0000000 : 1
10 <sup>3</sup>	1000,0000 : 1	1000,000000 : 1
10 <sup>4</sup>	10.000,0000 : 1	10.000,00000 : 1
10 <sup>5</sup>	100.000 : 1	100.000 : 1
10 <sup>6</sup>	1000.000 : 1	1000.000 : 1
10 <sup>7</sup>	10.000.000 : 1	10.000.000 : 1

**Condições Ambientais:**

Temperatura: 23° C ± 3° C

Umidade Relativa: 55% ± 5%

- Este Certificado de Calibração é válido exclusivamente para o objeto calibrado, não sendo extensivo a quaisquer lotes, mesmo que similares.
- O Certificado de Calibração não deve ser parcialmente reproduzido sem prévia autorização.

*Alvaro Medeiros de Farias Theisen*  
**Engº Álvaro Medeiros de Farias Theisen**  
 Coord. Lab. Metrologia Elétrica da PUCRS

*Egon Carlds Seitz*  
**Engº Egon Carlds Seitz**  
 Diretor do LABELO/PUCRS

## **Anexo 7**

### **Certificado de calibração do gerador utilizado**

LABELO/PUCRS

Página 2 de 4

**Certificado de Calibração****Nº R0068/98**

Continuação

GERADOR de SINAL - FLUKE - 6061A - 5355304 - TAG: F054 - 02/03/98

**Resultado(s) da Calibração:**

## 1. Frequência gerada com base de tempo externa (XSRM):

VR - UST (MHz)	MM - UMP (MHz)	± IM (Hz)
0,1	0,10000	10
1	1,00000	10
5	5,00000	10
10	10,00000	10
100	100,00000	10
500	500,00000	10
1000	1000,00000	10

## 2. Frequência gerada com base de tempo interna:

VR - UST (MHz)	MM - UMP (MHz)	± IM (Hz)
0,1	0,100 00	10
1	1,000 00	10
5	4,999 99	10
10	9,999 99	10
100	99,999 89	10
500	499,999 52	10
1000	999,999 09	10

## 3. Nível de saída a 0dBm em função da frequência:

frequência (MHz)	VR - UMP (dBm)	MM - UST (dBm)	± IM (dB)
1	0,0	-0,2	0,4
10		-0,2	0,4
100		-0,1	0,4
200		-0,1	0,4
300		0,0	0,4
500		-0,1	0,4
1000		+0,1	0,4

## **Anexo 8**

### **Cálculos da calibração do gerador**

## Teste do Gerador 6061A

Condições :

Contra SR620 em Gate Scale 500 s e Sample Size  $1 \times 10^1$ .  
SR620 e 6061A conectados à base-de-tempo externa XSRM.

Erros Encontrados:

10 MHz

- 31  $\mu\text{Hz}$   
-272  $\mu\text{Hz}$   
+200  $\mu\text{Hz}$   
+110  $\mu\text{Hz}$   
-191  $\mu\text{Hz}$   
+510  $\mu\text{Hz}$   
-281  $\mu\text{Hz}$   
+370  $\mu\text{Hz}$   
+200  $\mu\text{Hz}$

9,999 MHz

- 30  $\mu\text{Hz}$   
-546  $\mu\text{Hz}$   
-119  $\mu\text{Hz}$   
+ 58  $\mu\text{Hz}$   
-107  $\mu\text{Hz}$

10,001 MHz

-220  $\mu\text{Hz}$   
-110  $\mu\text{Hz}$   
- 70  $\mu\text{Hz}$   
-410  $\mu\text{Hz}$   
-260  $\mu\text{Hz}$   
+ 30  $\mu\text{Hz}$

Média dos erros : - 18,1  $\mu\text{Hz}$

Desvio padrão dos erros : 254  $\mu\text{Hz}$

Incerteza padrão da média :

$$254 \mu\text{Hz} / \sqrt{20} = 57 \mu\text{Hz}$$

Incerteza expandida para 95% de nível de confiança :

$$57 \mu\text{Hz} \times 2,13 = 121 \mu\text{Hz}$$

## **Anexo 9**

### **Procedimento de calibração de cronômetros via SISLOC**

---

## Procedimento de calibração de cronômetros via SISLOC

### 1 - Aplicabilidade

Este procedimento operacional de calibração se refere a cronômetros de mão com mostrador de cristal líquido e mecânicos. Os mecânicos devem obrigatoriamente dispor de um ponteiro de indicação de segundos, ou centésimos de minuto, ou um que possua período de rotação não superior a 600 segundos. Não há nenhuma restrição genérica para os digitais.

### 2 - Instrumentos necessários

Um sistema SISLOC - Sistema de Leitura Óptica de Cronômetros - composto por estereoscópio, emissor LASER, receptor-formatador de sinal, padrão de frequência, contador digital, microcomputador interligado ao contador e programa gerenciador.

### 3 - Incerteza da medição

Como o sistema é totalmente independente da contribuição humana e o método utilizado é de leitura direta com acoplamento ao padrão de rubídio, as parcelas do cálculo da incerteza do processo de medição se resumem então às incertezas da base-de-tempo padrão, do contador SR620 e do sintetizador 6061A, utilizado na calibração do sistema. A incerteza global associada ao sistema de medição automatizada de uma calibração de cronômetros é menor que 1 ms/24h, para cronômetros com erros compreendidos entre +10 e -10 segundos por dia. O programa gerenciador, porém, faz uma série de medições de período de pulsação do segmento escolhido para captura do sinal, calculando uma incerteza relativa ao período medido. A partir do valor e da estabilidade do período destas pulsações o programa gerenciador calcula o erro e incerteza associada a esta medição. A incerteza apresentada no relatório emitido ao final da calibração, portanto, se refere à estabilidade apenas do cronômetro, já que as duas casas decimais explicitadas são insuficientes para a visualização da contribuição do sistema.

Nenhum resultado de calibração pode ser expresso sem conter a indicação da incerteza associada e esta deve ser compatível com o credenciamento que rege o funcionamento do laboratório. Foi definido conjuntamente com o Observatório Nacional, órgão responsável pela padronização das medições de tempo e frequência no Brasil, que a menor incerteza associada ao procedimento em questão seria de **0,0001 segundos** (ver correspondência DSH 011/96-CE B-1904 de 10/10/1996,

reproduzida no anexo 10). A incerteza apresentada em qualquer certificado de calibração emitido para um cronômetro calibrado pelo sistema automatizado, portanto, será 0,0001 segundo ou o valor indicado no relatório emitido automaticamente ao final da calibração, sempre o maior deles.

Como os cronômetros apresentam erros que podem ser considerados proporcionais ao desvio de frequência de sua base interna de tempo, o erro e a incerteza da medição fornecidos nos certificados são apresentados como valores relativos, possibilitando desta forma que o usuário possa determinar qual o erro e a incerteza específicos para o período que deseja medir, independentemente dos intervalos calibrados no laboratório.

A incerteza assinalada no certificado está vinculada à dispersão dos períodos de pulsação do segmento escolhido para captura e, portanto, cada calibração será caracterizada por uma incerteza que é função básica da estabilidade do cronômetro. Em menor grau, e até certo ponto, a incerteza também é função do período de tempo no qual o cronômetro é deixado sob monitoramento do sistema automatizado porque este tempo define o número de leituras que são feitas, afetando o resultado da estatística associada. Para evitar resultados controversos envolvendo a incerteza indicada para a calibração de um dado cronômetro, o sistema avisa quando o nível de confiança associado à determinação da incerteza é de 95%. O valor da incerteza de cada calibração específica, portanto, é fornecida pelo próprio programa gerenciador, considerando características intrínsecas do cronômetro e das condições de captura. Uma calibração é considerada concluída, e o programa avisa o operador ao ocorrer este evento, quando a flutuação da média das medições em relação às três últimas leituras cai abaixo de 5%.

#### **4 - Método de medição empregado**

Genericamente o processo de calibração automatizada consiste na medição do período de pulsação de um determinado segmento do mostrador de cronômetros digitais ou de rotações de um ponteiro, como o de segundos, ou centésimos de minuto, em cronômetros mecânicos. Este método está baseado na proporcionalidade que existe entre os períodos de pulsação ou rotação referidos e a frequência real da base de tempo interna do cronômetro (elétrica ou mecânica), e desta com a indicação do instrumento.

O período colhido desta forma pode, então, ser matematicamente projetado para períodos maiores, o que é feito automaticamente pelo sistema, dentro dos limites estatísticos previstos no programa gerenciador. A intervenção humana inerente ao método se resume à escolha adequada do

---

segmento pulsante, que deve ter cadência regular, como o segmento C de qualquer dígito abaixo das dezenas de minutos, ou pontos pulsantes de caráter indicativo, quase sempre disponíveis. Nos mecânicos deve-se evitar reflexões espúrias para que não ocorram múltiplas capturas num único pulso. A captura óptica se dá pela reflexão de um feixe LASER no segmento pulsante escolhido ou num ponto estratégico no mostrador dos cronômetros mecânicos, de forma que o ponteiro escolhido interrompa a reflexão do feixe uma vez a cada rotação completa.

## **5 - O processo de calibração**

### **5.1 - Identificação do cronômetro**

Consiste em identificar corretamente o tipo de cronômetro que será calibrado, se mecânico ou digital, além de seus dados de identificação gerais do laboratório e modos de operação.

### **5.2 - Escolha dos possíveis pontos de captura**

O operador deve observar visualmente a existência de segmentos pulsantes de período constante no mostrador, freqüentemente associados a uma ou mais funções específicas do cronômetro, mas nem sempre visíveis em funções básicas, como *relógio*. Na maioria dos instrumentos estes pontos, colocados ali apenas para dar uma indicação visual da operação do cronômetro, se prestam bem para a captura pois têm períodos constantes e são geralmente maiores que os associados aos dígitos. Na ausência destes pontos, caso se mostrem mal localizados ou demasiadamente pequenos, o segmento C do dígito dos décimos de segundo, dos segundos, dos centésimos de minuto ou, até mesmo, dos minutos e dezenas de minutos pode ser utilizado. Escolhas de períodos maiores sempre resultam em calibração mais demorada, embora a incerteza tenda a se manter em níveis menores.

Em cronômetros mecânicos qualquer ponto próximo às bordas do mostrador pode ser utilizado, desde que haja um contraste mínimo entre a cor do fundo e a cor do ponteiro rápido que será utilizado.

### **5.3 - Posicionamento do cronômetro no sistema óptico do SISLOC**

Devem ser ligados à rede elétrica e acionados: o estereoscópio, a interface óptico-elétrica, o contador digital e o computador, sendo que o contador deve ainda estar conectado ao computador via porta de comunicação serial 2 e à saída de 10 MHz padrão da base-de-tempo utilizada. Todo o sistema deve estar interligado adequadamente conforme a figura 1.

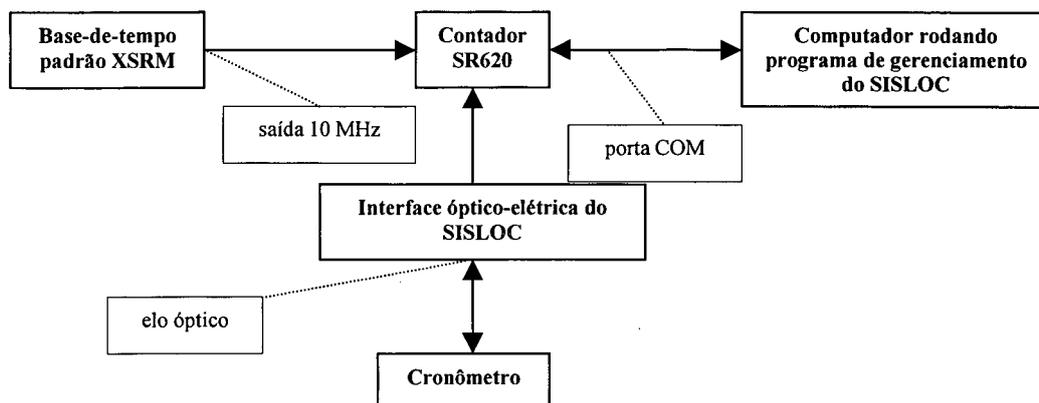


Figura 1 – Diagrama de conexões dos elementos do SISLOC

### 5.3.1 - Cronômetros digitais

- Alimentado o dispositivo de captura e formatação, o feixe LASER é dirigido para o centro do campo visual do estereoscópio, onde deve estar também o cronômetro.
- Com ampliação (*zoom*) atuada para ampliação máxima, e ajustando a altura da objetiva através do parafuso disponível na lateral do estereoscópio, o operador deve procurar minimizar o diâmetro do ponto luminoso, focando-o numa parte do mostrador que não corresponda a nenhum segmento (fundo cinza-claro). Neste momento o LED vermelho e o *buzzer* que indica a captura podem sinalizar.
- Cuidadosamente o operador deve girar o cronômetro no plano horizontal até que a maior intensidade de reflexão do feixe LASER seja observada. Neste ponto as direções de polarização do LASER e da lâmina polaróide do mostrador são paralelas.
- Sem girar mais o cronômetro, apenas movendo-o no plano horizontal, o operador deve posicionar o segmento escolhido para a captura exatamente sob o feixe LASER.
- O LED vermelho e o *buzzer* devem, neste ponto, estar pulsando sincronizadamente com o segmento. Caso isto não ocorra basta modificar levemente a inclinação da mesa em relação ao plano horizontal. As reflexões espúrias do LASER na lâmina transparente de proteção do mostrador podem ser assim eliminadas.

### 5.3.2 - Cronômetros mecânicos

Neste caso, como não há rede polarizadora, como nos cronômetros digitais, o posicionamento do cronômetro é menos crítico. Como procedimento básico o ponto definido conforme o item 5.2 deve ser posicionado segundo o item 5.3.1, apenas considerando que não há *segmento escolhido*, mas sim um ponto qualquer, próximo à borda do mostrador do cronômetro, cuja passagem do ponteiro rápido interrompa o feixe LASER, evitando a dupla interrupção que pode ocorrer, uma no feixe incidente e outra no refletido, que usualmente não são coincidentes. A cada passagem do ponteiro, então, uma interrupção do feixe deve gerar um sinal sonoro e luminoso, como nos cronômetros digitais.

#### 5.4 - Inicialização do SISLOC

- Inicie o programa gerenciador. Supondo todas as condições acima satisfeitas o operador deve acionar com um clique duplo o ícone SISLOC na tela principal do Windows. A tela de abertura do programa deve aparecer.
- Se a tecla D for pressionada o programa se direcionará para o modo DEMO e assumirá um *Gate Scale* igual a 1 no contador, partindo imediatamente para a tela de apresentação dos resultados.
- Se a tecla Q for pressionada o programa reinicializa. Se a tecla P for pressionada o programa vai para uma rotina de impressão avulsa de resultados de calibração.
- Se a tecla R ou qualquer outra tecla for pressionada o programa vai para a rotina de calibração de alta resolução, ou rotina normal, respectivamente. O programa solicita a introdução de um número de protocolo, seguido de um ENTER. Se nenhum número estiver associado à calibração basta pressionar ENTER sem introduzir nenhum número. O programa solicita, a seguir, o nome do operador e informa a data da calibração e os números do TAG dos padrões envolvidos. Após o pressionamento da tecla ENTER o programa inicia a captura.
- Após uma leitura rápida (três pulsos do cronômetro) o valor do Período Nominal PN é indicado na tela. Uma nova leitura somente ocorrerá após  $(500 + 2 \times PN)$  segundos, quando será informado o primeiro Período Instantâneo PI. Na próxima leitura é informado o resultado do primeiro cálculo de Período Médio PM, além das projeções de erro/dia e incerteza para os períodos usuais de aplicação de cronômetros.

- Após um certo número de leituras terem sido efetuadas uma mensagem de AMOSTRAGEM SUFICIENTE aparece na parte inferior da tela, indicando que a calibração pode ser encerrada. O operador pressiona então a tecla F2 e um relatório com todos os dados da calibração é impresso. Caso algum problema ocorra nesta impressão os dados desta calibração podem ser recuperados através do arquivo LEITURA.TXT, e um novo relatório impresso pode ser obtido através da opção P na tela de início do programa gerenciador.

**6 - Apresentação dos resultados**

Os resultados da calibração são atualmente apresentados da seguinte forma no certificado de calibração emitido pelo LABELO-PUCRS :

O cronômetro apresenta um erro relativo de:

$\Delta T / T =$
------------------

sendo: 1 ppm = parte por milhão = 0,0001%

Erros absolutos estimados apresentados em relação ao período indicado pelo padrão:

s em 1 minuto	s em 1 hora
s em 5 minutos	s em 10 horas
s em 10 minutos	s em 12 horas
s em 15 minutos	s em 20 horas
s em 30 minutos	s em 24 horas

**Convenção:**

Positivo (+) ⇒ O Cronômetro esta Adiantando  
 Negativo (-) ⇒ O Cronômetro esta Atrasando

**7 – Roteiro simplificado de operação do SISLOC**

Para utilização do SISLOC, após a familiarização com cada procedimento descrito anteriormente, um operador em treinamento pode seguir o roteiro simplificado exposto abaixo.

### 7.1 – Posicionamento do cronômetro.

- “Zoom ” máximo.
- Colocar o cronômetro sobre a superfície de borracha na base do estereoscópio.
- Definir o segmento que será utilizado na calibração. Pode ser o segmento C do último dígito do cronômetro, como é mostrado na figura 2, ou outro ponto pulsante do mostrador digital.

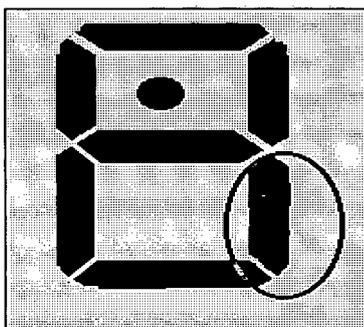


Figura 2 - Segmento “c”

- Girar horizontalmente o cronômetro até conseguir a maior reflexão LASER no fundo cinza-claro do mostrador (figura 2).
- Fazer com que o segmento receba o feixe LASER da forma mais aproximada possível da figura 3.

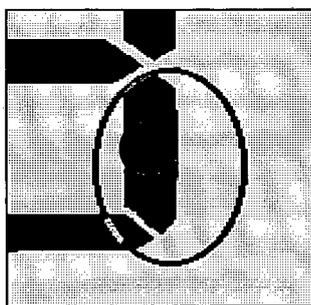
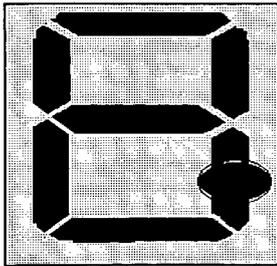
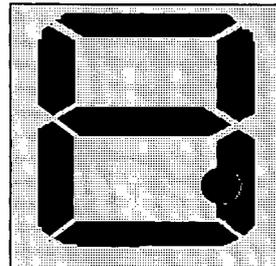


Figura 3 – Posicionamento do LASER

- As figuras 4 e 5 mostram deficiências de focalização e posicionamento, respectivamente.



**Figura 4 -  
Focalização deficiente**



**Figura 5 -  
Posicionamento deficiente**

## 7.2 - Utilização do programa de gerenciamento

- Entre no programa do SISLOC através de seu ícone no Windows.
- Escolha a opção do modo normal de calibração (apenas pressione <ENTER>).
- Digite o número do protocolo do cronômetro e em seguida pressione a tecla <ENTER>.
- Entre com o nome do operador e pressione <ENTER>.
- Confira as informações Protocolo, Operador, Data, TAG dos Padrões e pressione <ENTER>.
- A calibração inicia com a apresentação da tela de resultados parciais do SISLOC.
- Aguarde a informação de que a amostragem já é suficiente.
- Imprima o relatório da calibração pressionando a tecla <F2>.
- Retorne ao ambiente Windows pressionando a tecla <F1>.

## **Anexo 10**

**Modelo estatístico para  
caracterização de padrões  
de frequência :  
A variância Allan**

**Modelo estatístico para caracterização de padrões de frequência – a variância Allan**

A Frequency and Times Systems, uma das empresas que fornecem padrões de césio portáteis e considerados como padrões primários em aplicações que incluem satélites, alega para o seu produto *top-de-linha* estabilidade em torno de  $10^{-14}$  s/s. Estudos realizados no centro de pesquisas da Hewlett-Packard, em Santa Clara, confirmam estes limites práticos para estes padrões além de delimitar os fatores externos que afetam o desempenho.

Padrões atômicos de césio tradicionais geralmente exibem, segundo Kusters (1992), uma substancial resposta ao meio ambiente, como pressão atmosférica, umidade, temperatura e campos magnéticos. Dados que recolheu ao longo de todo o ano de 1991 em dois padrões de césio HP5061A submetidos a temperatura constante, mas sem umidade controlada, comprovam a dependência. Um gráfico que demonstra este ponto é mostrado na figura 1. O eixo vertical à esquerda mostra o erro relativo apresentado pelos dois padrões em relação ao Tempo Universal Coordenado (UTC), em traço mais forte, enquanto a umidade relativa do ar é mostrada no eixo à direita, em traço fraco interrompido, ambas referenciadas ao mesmo período temporal. Uma estreita correlação pode ser identificada.

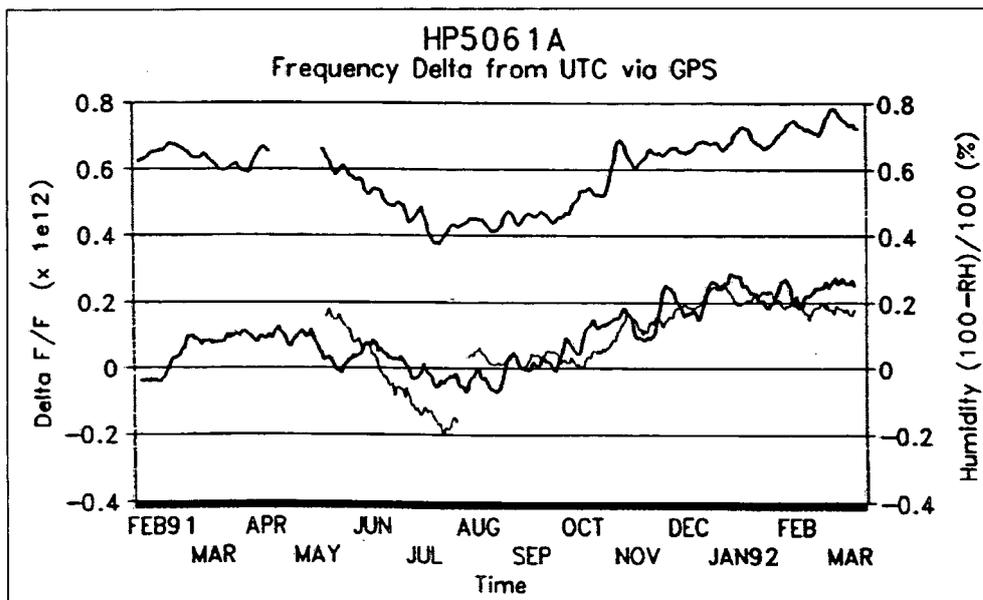


Figura 1 - Gráfico erro-umidade x tempo em padrões de césio

O próprio Kusters (1993) em outra publicação mais recente acusa que desenvolvimentos posteriores nos padrões de césio eliminaram a quase totalidade da susceptibilidade ambiental à umidade e demais fatores. O tempo de aquecimento, entretanto, atinge 24 a 36 horas após a ligação, e

é definido basicamente pela constituição física da célula de césio do padrão, termicamente muito inercial e massiva. Ela é composta por uma cavidade central de cobre de massa superior a 1 kg, rodeada de um lado por um ionizador a fio incandescente que opera em torno a 900°C, e de outro pela fonte de césio, a cerca de 100°C.

Os novos padrões foram testados numa unidade da Hewlet-Packard, em Santa Clara, em situações diversas, sempre contra um conjunto de três padrões de césio idênticos mantidos sob condições controladas ideais de operação, ligados em uma configuração ativa que garante incerteza global 1,7 vezes menor que um padrão isolado. A variância Allan calculada para a montagem padrão pode ser vista na figura 2.

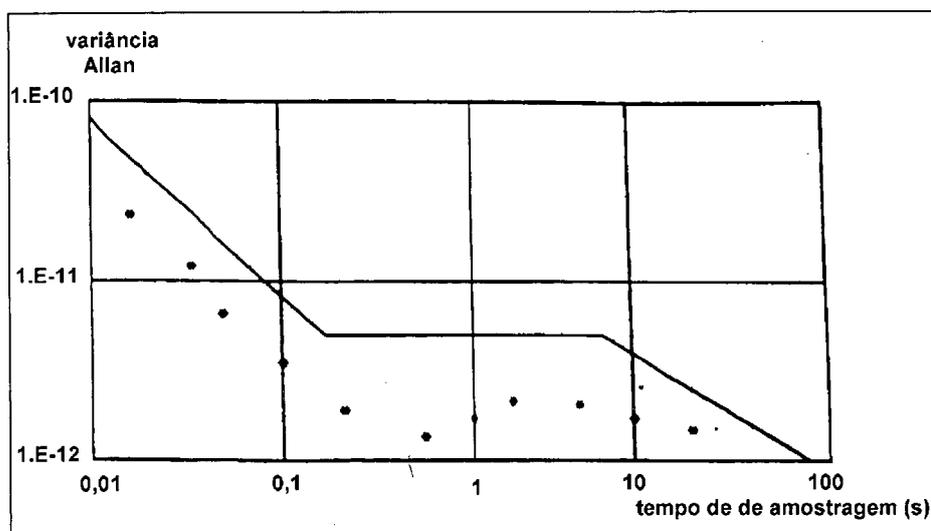


Figura 2 - Variância Allan (em s<sup>2</sup>) da montagem padrão HP

Os resultados da pesquisa de Kusters (1993) apontaram para os atuais padrões de césio :

- que em relação à temperatura, a sensibilidade das novas células atingiram  $1 \times 10^{-15}$  s/(s.°C) ;
- à umidade, entre 0 e 100%, variações em frequência menores que  $1 \times 10^{-14}$  s/s ;
- à pressão atmosférica, através de elevação desde o nível do mar até 12 km, não foi detectada flutuação na frequência (em acréscimo à influência relativística esperada pela redução no campo gravitacional) ;

d) a campos magnéticos, sob variação de  $\pm 2 \times 10^{-4}$  T em três eixos, não foi detectada flutuação de frequência .

Como conclusão, em relação à performance medida por intercomparação, os padrões de césio (da Hewlet-Packard) mantêm erro máximo em torno de  $1 \times 10^{-14}$  s/s sob quaisquer condições de uso normal. Padrões específicos para utilização em satélites não diferem em nada fundamental em relação aos padrões de uso em terra, exceto por uma camada extra de blindagem contra raios cósmicos, feixes de prótons energéticos e a correção para a queda na gravidade, e por este motivo compartilham a mesma estabilidade dos terrestres.

Os relógios de césio de alta performance, existentes nos laboratórios primários de vários países, têm um comprimento entre cavidades compreendido entre 0,8 m até 3,8 m, através dos quais circulam átomos excitados à velocidades entre 90 m/s e 200m/s, suficientemente baixas para que ocorram transições espúrias ou outros efeitos que ampliam a incerteza da medição. As principais fontes de incerteza dos padrões de césio são (Gibble, 1992) :

- a) o desconhecimento quantitativo exato do valor vetorial do campo magnético nas cavidades e fora delas, em toda a trajetória dos átomos. Erros sistemáticos de  $3 \times 10^{-10}$  e  $5 \times 10^{-11}$ , em frequência, são atribuídos a flutuações, não-homogeneidades e conhecimento impreciso no campo magnético, respectivamente no P.T.B. e no N.I.S.T.
- b) a possibilidade de ocorrência de transições hiperfinas espúrias. Estas transições indesejadas podem ser significativamente minimizadas através de uma excitação espectral ultra-aguda, difícil de ser obtida com campos magnéticos mas relativamente fácil se a energia for concentrada num feixe óptico, por exemplo. No N.I.S.T. erros sistemáticos de frequência da ordem de  $6 \times 10^{-14}$  s/s são atribuídos a transições espúrias no padrão primário de césio.
- c) os erros dimensionais nas duas cavidades de Ramsey, que causam diferença de fase no sinal de microondas gerado. Para variações lineares tão pequenas quanto 50  $\mu$ m uma diferença de fase de  $0,03^\circ$  (0,5 mrad) na radiação de microondas e uma alteração de frequência da ordem de  $4 \times 10^{-13}$  s/s são esperadas.

Os padrões de césio modernos, porém, não prescindiram de um largo tempo de maturação para atingirem os patamares de estabilidade atuais. Após o surgimento de padrões atômicos de tempo e frequência, entre as décadas de 1950 e 1960, um grande esforço intelectual e experimental foi

realizado por pesquisadores dos laboratórios da N.B.S. (N.I.S.T.), como James Barnes e, principalmente, David Allan, este no estabelecimento de métodos estatísticos adequados à avaliação de medições em alta-frequência. A contribuição teórica mais importante foi, sem sombra de dúvida, o desenvolvimento da *Variância Allan*.

David Allan, no artigo *Statistics of atomic frequency standards*, publicado em 1965, propôs um desenvolvimento teórico apresentado como o resultado do relacionamento entre o valor do desvio padrão das flutuações de frequência de um padrão atômico, obtido por um número finito qualquer de medições, e o valor do desvio padrão teórico obtido após um tempo infinito de medições. Esta relação é invariante para um mesmo padrão e serve como um indicador da qualidade do mesmo, logo ficando conhecida como *variância Allan*.

Como o desvio padrão das flutuações de frequência sempre se mostra diretamente dependente do tipo do ruído do sistema, do número de amostras colhidas e do tempo morto entre leituras, é necessário levantá-lo. O método básico para a determinação do ruído envolve usualmente a geração de um *batimento* entre as frequências de saída de dois geradores, e a partir de considerações sobre a frequência angular média, a frequência espectral e o intervalo de tempo de medição e separação, Allan conclui sobre o método de cálculo de variância adequado a padrões de tempo.

Sendo  $\sigma^2$  a variância Allan para uma seqüência de N medições de tempo em um padrão atômico, cada uma por amostragem durante um intervalo de tempo  $\tau$ ,  $s^2$  a variância tradicional dos dados colhidos e  $\mu$  é a tangente do ângulo da inclinação de uma curva log-log entre a variância tradicional  $s^2$  e o tempo  $\tau$  de medição, podendo estar entre 0 e -2...

$$\sigma^2 = \frac{(N - 1)s^2}{N(1 - N^\mu)} \quad (\text{eq. 1})$$

e  $\mu$  pode ser obtida através da tabela 1, abaixo, onde se entra com o número de amostras N e a variância tradicional  $s^2$ . Pela definição, a variância Allan pode ser reescrita como um somatório infinito de diferenças finitas de primeira ordem.

**Tabela 1 - Expoente  $\mu$  (adimensional) da equação para cálculo da variância Allan (Allan, 1965)**

$\mu$	N					
	4	16	64	256	1024	$\infty$
0,0	1,337	2,133	3,048	4,016	5,004	$\infty$
0,1	1,288	1,928	2,580	3,190	3,736	7,464
0,2	1,247	1,753	2,215	2,598	2,899	3,855
0,3	1,208	1,604	1,928	2,167	2,332	2,660
0,4	1,171	1,475	1,700	1,847	1,937	2,062
0,5	1,138	1,365	1,517	1,606	1,655	1,705
0,6	1,106	1,270	1,369	1,422	1,447	1,467
0,7	1,077	1,188	1,249	1,278	1,291	1,299
0,8	1,049	1,116	1,150	1,165	1,171	1,174
0,9	1,023	1,054	1,068	1,074	1,076	1,076
1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
1,1	0,977	0,952	0,942	0,938	0,937	0,937
1,2	0,956	0,910	0,893	0,887	0,886	0,886
1,3	0,937	0,873	0,851	0,844	0,842	0,842
1,4	0,919	0,841	0,815	0,807	0,805	0,804
1,5	0,902	0,812	0,784	0,776	0,774	0,773
1,6	0,886	0,786	0,756	0,748	0,746	0,745
1,7	0,871	0,763	0,733	0,725	0,723	0,722
1,8	0,858	0,743	0,712	0,704	0,702	0,701
1,9	0,845	0,724	0,693	0,685	0,683	0,682
2,0	0,833	0,708	0,677	0,669	0,667	0,667

Nesta ocasião a equação da variância Allan foi proposta como sendo válida mesmo onde todos os tipos de ruído estejam presentes nas medições, desde que diretamente associados ao padrão atômico de frequência. Muitos anos depois de proposto o novo cálculo para a variância de medições associadas a padrões de tempo e frequência - em 1987 -, David Allan publicou novo artigo, intitulado *Should the classical variance be used as a basic measure in standards metrology ?*, no qual questiona a aplicabilidade irrestrita do método clássico para o cálculo da variância, especialmente nas medições envolvendo padrões metrológicos.

No artigo Allan expande sua contribuição para medições de tensão elétrica e dimensionais, baseando sua argumentação no fato de que, como na área de tempo e frequência, medições aparentemente distintas não o são completamente, não valem portanto os princípios da aleatoriedade e não-correlação, necessários para a aplicação indúbia da variância tradicional.

O problema é substancialmente incrementado quando o ruído sobreposto às medições tem densidade espectral proporcional a  $f^\alpha$  e quando o tempo de amostragem é elevado, o que normalmente ocorre em medições básicas ( $\alpha \in [-2,+2]$  na área de tempo e frequência). Na área de eletricidade  $\alpha$  é geralmente -1, e mesmo neste caso a variância e o desvio padrão são divergentes, o que ocorre também para  $\alpha$  igual a -2. A questão básica, segundo Allan, é determinar em qual grau a qualidade de

uma medição aumenta com a continuidade das medições e como se comporta o padrão ao longo do tempo.

Na prática, especialmente em padrões atômicos de frequência, certos tipos de ruído podem ser associados a determinados processos físicos que ocorrem no interior da célula, não sendo aleatórios no sentido exato da palavra. Se considerarmos o Teorema de Parseval, onde  $\sigma^2$  é a variância,  $S(\omega)$  é a densidade espectral simétrica bilateral de ruído presente na medição, e  $\omega = 2\pi f$ , então ...

$$\sigma^2 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} S(\omega) d\omega \quad (\text{eq. 2})$$

neste caso, para  $\alpha = -1$ , a variância clássica é infinita nos dois limites da integral, mesmo que haja limites de frequência de corte superior e inferior na medição, pois o limite de frequência de corte superior é definido geralmente pelo sistema de medição, mas o inferior é quase sempre impossível de se determinar.

Para contornar estes problemas práticos no domínio do tempo e frequência a IEEE formou um subcomitê, no final da década de 1960, que veio a publicar poucos anos depois uma série de recomendações, condensadas no artigo *Characterization of frequency stability*, de J.A. Barnes, colega de Allan. Neste artigo Barnes, em nome do subcomitê da IEEE, define a variância de uma medição em tempo ou frequência como sendo ...

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2} \langle (\Delta y)^2 \rangle \quad (\text{eq. 3})$$

onde  $\sigma^2$  é a variância sobre um tempo infinito de amostragem, calculada pelo somatório infinito  $\langle \rangle$  sobre o quadrado da primeira diferença finita entre medições fracionais adjacentes  $\Delta y$ , cada uma tomada como a média das medidas em um intervalo  $\tau$ . Esta estatística passou a ser conhecida como a variância Allan, já abordada.

Na prática, para uma série finita de medições de  $y_k$ , com  $k$  variando de 1 até  $N$ , cada uma medida efetuada em um intervalo de amostragem  $\tau_0$ , com  $y$  sendo a variação relativa entre a frequência (ou o intervalo de tempo) indicada pelo instrumento e a correspondente indicação do padrão, a variância é dada por ...

$$\sigma_y^2(\tau_0) = \frac{1}{2(N-1)} \sum_{k=1}^{N-1} (y_{k+1} - y_k)^2 \quad (\text{eq. 4})$$

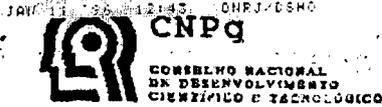
No meio tempo entre os início das pesquisas com padrões de frequência atômicos e o final da década de 1980, modificações foram sendo introduzidas à variância Allan visando sua adequação à

---

medição em intervalos precedidos de um *tempo morto*, isto é, lotes de amostragens separadas por um lapso de processamento ou acomodação. Estes estudos geraram a *variância Allan modificada*.

## **Anexo 11**

**Correspondência  
DSH 011/96-CEB-1904  
de 10/10/1996**



DSH-011/96-CE  
B-1904

Rio de Janeiro, 10 janeiro de 1996

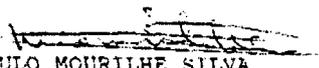
Ilmo. Eng.  
Álvaro Medeiros de Farias Theisen  
PUCRS-LABELO  
Av. Ipiranga, 6681  
Prédio 30, Bloco 3 - Sala 200  
Porto Alegre - RS.  
90619-900

Prezado Álvaro:

Com relação a incerteza nas medidas para a calibração de cronômetros, com o novo sistema SISLOC, concordo com a proposta de redução no valor atual da incerteza.

Em função dos resultados encontrados, creio que seria válido expressar a incerteza como sendo de 0,0001s, valor este que ainda será bem superior ao erro do sistema e inferior a resolução de cronômetros que meçam 1ms, totalmente independente do tempo de resposta humano.

Atenciosamente,

  
PAULO MOURILHE SILVA  
Chefe  
Depto. Serviço da Hora  
CNPq-Observatório Nacional

FMS/vmas.