

Calibração de cronômetros por comparação direta de bases de tempo usando sensor capacitivo

Stopwatch calibration by direct time base comparison using capacitive pickup sensor

Désirée Souza Gonçalves^{1,2}, Luiz Vicente Gomes Tarelho¹, Antonio Carlos Baratto¹, Guilherme de Andrade Garcia¹

¹ Divisão de Metrologia em Tecnologias da Informação e Telecomunicações -Inmetro;

² Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca- CEFET/RJ

E-mail: gagarcia@inmetro.gov.br

Resumo: Descreve-se neste trabalho um procedimento de calibração de cronômetros pela comparação direta de bases de tempo. A captação da frequência do oscilador de quartzo que compõe a base de tempo do cronômetro é feita com sensor capacitivo. O sinal passa por vários estágios amplificadores, limitadores e filtros passa-banda, sendo então comparado com a referência. O aparato experimental apresenta incerteza da ordem de $5 \cdot 10^{-11}$, e a incerteza final relativa da calibração é da ordem de $4 \cdot 10^{-9}$. Esse procedimento de calibração apresenta incerteza menor que as incertezas dos métodos usuais de comparação direta (10^{-5}), ou que do método de totalização (10^{-6}).

Palavras-chave: calibração de cronômetro, base de tempo, sensor capacitivo.

Abstract: This work describes a stopwatch time base calibration procedure which gives a relative uncertainty of about $4 \cdot 10^{-9}$ for the quartz crystal oscillator frequency measurement. The experimental setup was assembled with a capacitive pickup sensor and several amplifying and bandpass filtering stages, that can attain an uncertainty of approximately $5 \cdot 10^{-11}$. This calibration procedure presents an uncertainty smaller than other methods frequently employed, such as direct comparison, which has a relative uncertainty of 10^{-5} , and the totalize method, with a relative uncertainty of 10^{-6} .

Keywords: stopwatch calibration, time base method, capacitive pickup method.

1. INTRODUÇÃO

A calibração de um instrumento é realizada pela comparação dos resultados de medições realizadas com um dispositivo de teste e com uma referência padrão de mesma natureza. No

caso da calibração de cronômetros, um intervalo de tempo medido pelo dispositivo é comparado com um intervalo fornecido por um padrão de frequência primário ou secundário.

Cronômetros são instrumentos compostos por quatro elementos construtivos distintos: uma fonte de energia, uma base de tempo, um contador, e um indicador ou mostrador. Os cronômetros digitais são compostos por osciladores de quartzo e circuitos eletrônicos, operando geralmente com uma frequência de 32.768 Hz (2^{15} Hz) [1].

O processo de calibração descrito neste artigo baseia-se na comparação da base de tempo do instrumento (padrão de frequência interno) com a base de tempo de um padrão de frequência rastreado ao BIPM. O método foi utilizado porque apresenta uma incerteza de medição duas ordens de grandeza menor que as incertezas conseguidas com os outros métodos já referidos.

Comparação direta (a partir de indicações do mostrador) é o método mais comum usado na calibração de cronômetros, e o que requer menor quantidade de equipamentos, mas, por outro lado, é o que apresenta maior incerteza de medição.

Entre suas principais vantagens está o fato de que é relativamente fácil de implementar e, se o sinal rastreado for captado por linha telefônica, não há necessidade de equipamentos adicionais para a realização do ensaio. A principal desvantagem é sua dependência do tempo de reação do operador para operar o início e a finalização de cada ensaio, e que em geral compõe a componente dominante na incerteza final. Como o tempo médio de reação humana é da ordem de 300 milisegundos [2], apenas essa componente acarretaria uma incerteza relativa de $6 \cdot 10^{-5}$, para uma medição com intervalo de 5000 s.

2. MÉTODO EXPERIMENTAL

O procedimento de calibração desenvolvido no presente trabalho compara diretamente as bases de tempo do cronômetro em calibração e da referência. Ele é conveniente por apresentar, em condições técnicas similares, uma menor incerteza de medição. Como a base de tempo do

instrumento sob ensaio é medida diretamente, o tempo de resposta do operador não é um fator limitante da calibração. A calibração da base de tempo do instrumento, um oscilador eletrônico usando cristal de quartzo, é feita pela medição da frequência de oscilação, captada por um sensor capacitivo, com o uso de um frequencímetro. O sinal do sensor de captação capacitiva precisa ser amplificado e filtrado para maximizar a relação sinal/ruído. A frequência de atualização do mostrador do cronômetro é também captada pelo sensor capacitivo [3] e por isso o sinal decorrente precisa ser filtrado, assim como é também necessário filtrar outras interferências externas. O aparato experimental usado pode ser visto na Figura 1.

A montagem experimental é composta por um pré-amplificador de sinais de baixo ruído (OP27) atuando como filtro passa-faixa, um limitador de amplitude ajustável, um filtro passa-faixa com $Q = 100$ (que amortece/retira o sinal de atualização do mostrador do cronômetro e demais frequências espúrias), um micro computador, e duas placas captadoras independentes. Estas placas, e o cronômetro a ser calibrado, são colocados no interior de uma caixa metálica blindada para minimizar a captação de ruídos externos. São usados um gerador de função e um frequencímetro, ambos disciplinados por um padrão de frequência de Césio calibrado, o que garante a rastreabilidade ao Sistema Internacional de Unidades (SI).

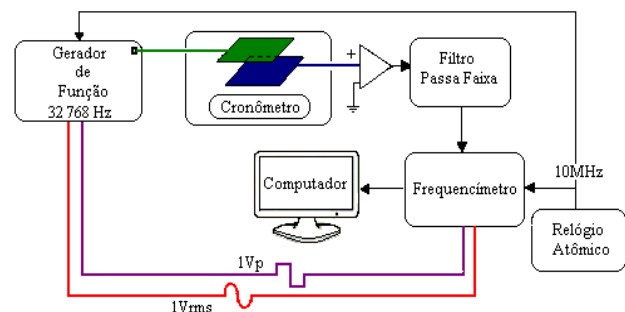


Figura 1 – Aparato experimental usado na calibração.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O processo de medição, em duas partes, consiste na medição do sinal real de um cronômetro e medições com sinais simulados para testar os limites da sensibilidade do sistema. Os valores obtidos para esta calibração são referentes ao pequeno sinal gerado pela indução elétrica da frequência da base de tempo do cronômetro no sensor de captação capacitivo.

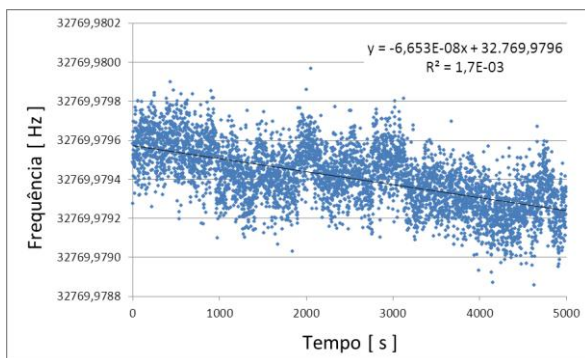


Figura 2 – Ajuste de offset e deriva das medições de frequência do cronometro.

As medições realizadas são mostradas na Figura 2, onde se pode perceber deriva em frequência e o desvio nominal (offset) do valor da frequência nominal do cronômetro sob teste. Os valores obtidos foram uma deriva de 330 μHz em 5.000 segundos e um deslocamento linear (offset) de 1,979406 Hz.

Para melhor visualização do histograma resultante foram subtraídos, dos valores medidos, o deslocamento linear (offset) da frequência nominal e a deriva, resultando na curva verde da Figura 3.

Com o uso da curva verde, após a remoção da deriva, pode-se estimar a incerteza relativa da medição da base de tempo do cronometro usando o desvio padrão $\sigma = 125 \mu\text{Hz}$ e o valor médio $f_0 = 32.768 \text{ Hz}$, obtendo o valor de $3,8 \cdot 10^{-9}$ para a incerteza relativa.

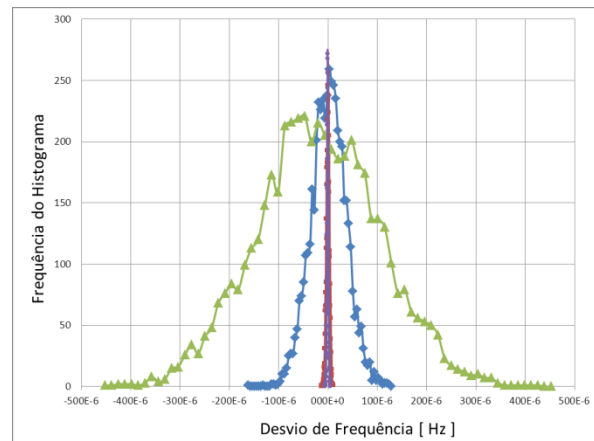


Figura 3 – Histograma resultante das calibrações efetuadas (5.000 pontos de medição).

Após a calibração e medição da frequência de operação do cronômetro foram realizadas algumas medições para caracterização do aparato experimental, usando uma segunda placa (em verde na Figura 1) posicionada no interior da caixa blindada. Através do gerador de função sintetizamos um sinal senoidal com amplitude de 20 mV_{RMS} e frequência de 32.768 Hz, que foi acoplado à segunda placa (usada como fonte emissora). A amplitude deste sinal foi escolhida para fornecer na saída um valor igual àquele fornecido pelo cronômetro. Usando o sensor capacitivo original esse sinal foi captado, amplificado e deu origem à curva azul na Figura 3, que demonstra o limite de calibração do aparato por método capacitivo. A incerteza dessa medição é da ordem de 35 μHz , ocasionando uma incerteza relativa da ordem de $1,1 \cdot 10^{-9}$.

A determinação do limite de medição da instrumentação foi realizada com o uso do gerador de função acoplado diretamente ao frequencímetro, ambos disciplinados pelo mesmo padrão de frequência de Césio. Foram investigadas duas situações, mostradas na Figura 3: na curva vermelha usou-se um sinal senoidal de 1 V_{RMS} , e na curva lilás um sinal de onda quadrada de 1 V_{pp} . Usando $f = 32.768 \text{ Hz}$, com janela de 1 segundo e 5.000 medições, obtiveram-se incertezas da ordem de 3 μHz ,

correspondendo a uma incerteza relativa da ordem de $1 \cdot 10^{-10}$.

Comparando as duas situações limite, vê-se que ainda existe um fator 80 para implementar possíveis melhorias no sistema de amplificação e tratamento do sinal. Esta característica é atribuída ao grande nível de ruído introduzido pelo circuito de atualização do mostrador de cristal líquido, que induz sinais interferentes digitais com grande densidade espectral de ruído. Como o uso de filtros passa-banda com Q muito alto tem custo proibitivo, planeja-se construir um PLL (Phase Locked Loop) que permitiria eliminar a maior parte do ruído presente no sistema, com o quê será possível atingir incertezas próximas do limite de 10^{-10} .

3.1. CÁLCULO DE INCERTEZA

A Tabela 1 mostra as principais componentes de incerteza deste sistema de calibração. Pode-se notar que o fator predominante é o ruído de medição, obtido das figuras 2 e 3.

Tabela 1 – Planilha de Incerteza

Componente de incerteza	Incerteza (1σ)
Resolução do contador	5,0E-12
Base de tempo	6,0E-14
Ruído do sistema	4,9E-11
Reação manual	---
Ruído da medição	3,8E-09
Incerteza combinada k=1	3,8E-09
Incerteza expandida k=2	7,6E-09

4. CONCLUSÕES

A calibração de um cronômetro a partir da medição da sua base de tempo é uma importante atividade dentro da área de metrologia de tempo e frequência, e o procedimento descrito nesse trabalho apresenta uma incerteza de medição com pelo menos duas ordens de grandeza menor que as incertezas conseguidas com os outros métodos

comumente usados como, por exemplo, a comparação direta a partir do mostrador e o de totalização. O procedimento descrito, usando captação capacitiva do sinal de referência do cronômetro, pode ser usado para calibração de instrumentos mais precisos que os cronômetros convencionais, pois apresenta uma capacidade de medição de frequência com incerteza relativa da ordem $4 \cdot 10^{-9}$. Os resultados obtidos a partir da caracterização do aparato experimental demonstraram ainda que o arranjo pode ser usado para medições ainda mais precisas e exatas, pois o sistema eletrônico, que pode facilmente ser incrementado, constitui, na montagem usada, um limitante para a precisão e exatidão que podem ser obtidas.

Deve-se ressaltar que, quando o cronômetro calibrado for eventualmente usado para medição, em situação normal de uso, o tempo de reação do operador deve ser levado em conta, constituindo-se certamente na componente dominante da planilha de incerteza da medição.

5. REFERÊNCIAS

- [1] NIST Special Publication 1065, Handbook of Frequency Stability Analysis, July, 2008.
- [2] Jeff C. Gust, Robert M. Graham, Michael A. Lombardi, "Stopwatch and timer calibrations – NIST Recommended Practice Guide", Washington, DC, 2009.
- [3] Leonardo Trigo, Daniel Slomovitz, "Calibración de cronómetros digitales por método de inducción", IEEE, 7º encuentro de Energía, Potencia, Instrumentación y Medidas, Montevideo-URUGUAY, 2008.
- [4] Johnny Jiménez, Harold Sánchez, "Calibracion De Cronómetros Mediante La Medición De La Frecuencia Del Oscilador De Cuarzo", 8º Seminário Internacional de Metrologia Elétrica, Brasil, 2009.