

OS CRONÔMETROS DIGITAIS E SEUS DÍGITOS “PREFERIDOS”

Zwinglio O. Guimarães-Filho^a [zwinglio@if.usp.br]
Ruy M. Castro^{a,b,c} [rmcastro@ieav.cta.br]
Lighia B. Horodynski-Matsushigue^a [lighia@if.usp.br]
Paulo R. Pascholati^a [pascholati@if.usp.br]
Fabio de Oliveira Jorge^a [fjorge@if.usp.br]

^a Instituto de Física da Universidade de São Paulo

^b Departamento de Física e Matemática da Universidade de Taubaté

^c Instituto de Estudos Avançados – ESR/IEAv/CTA

RESUMO

Uma investigação sobre o registro não equiprovável de dígitos por alguns modelos de cronômetros digitais revelou a existência de seqüências que se repetiam a cada 25 centésimos de segundo, compostas de oito ciclos de dígitos “preferenciais/proibidos”. O interesse neste estudo fora despertado pela observação, por parte de alunos e professores, de resultados que não obedeciam a critérios estatísticos. São apresentadas as várias etapas desta investigação e uma possível modelagem do efeito, relacionando as observações com características de atualização de dados, típicas de instrumentos digitais.

INTRODUÇÃO

Na atualidade, a apropriação de um conjunto de critérios que facilitem uma tomada de decisão, em situação de interesse, é possivelmente a contribuição mais significativa do processo educacional para o estudante. De fato, desde cedo a criança aprende a ajustar seu comportamento aplicando critérios de semelhança a situações vivenciadas; espera-se que, ao longo da vida, os critérios se sofisticem e adquiram embasamento científico. O laboratório didático é, em princípio, um espaço privilegiado para a aquisição e ampliação de comportamentos criteriosos. Em situações, muito comuns, que envolvem medições condicionadas por flutuações, o conhecimento, e a aplicação, de expectativas estatísticas como critério representa uma ferramenta importante para a tomada de decisão. Na verdade, tais critérios podem ser úteis também em muitas situações do cotidiano.

Os responsáveis pelas disciplinas de Física Experimental 1 e 2 do Instituto de Física da USP vêm se preocupando, já há alguns anos, com o ferramental didático adequado para a construção dos conceitos subjacentes a estes critérios estatísticos^[1, 2, 3, 4]. Neste sentido, uma das primeiras atividades que foram desenvolvidas para os alunos ingressantes dos bacharelados em Física, Geofísica e Meteorologia^[3] é uma seqüência de cronometragens dos períodos de sistemas oscilatórios simples (como pêndulos ou sistemas massa-mola) com os objetivos de: (a) mostrar que dados experimentais tomados em condições semelhantes geralmente fornecem resultados distintos uns dos outros, e que esta flutuação é uma característica inerente a qualquer processo experimental¹; e (b) introduzir a distribuição gaussiana.

Estas cronometragens foram, durante alguns anos, feitas com cronômetros mecânicos com menor divisão de 0,1 s. Estes foram substituídos por cronômetros digitais de quartzo que mostram,

¹ Condição verdadeira desde que não se esteja limitado pelo número de dígitos fornecidos pelos equipamentos - situação em que a repetição das observações não melhora o conhecimento da grandeza submetida à medição^[5, 6].

0,01 s, como menor divisão, sendo em princípio, muito mais adequados aos propósitos da atividade. Cronometragens manuais são afetadas pelo tempo de resposta do cronometrista, em ambas as ações: partida e parada do cronômetro. Se as duas ações são disparadas pelo mesmo observador a partir de estímulos semelhantes, ou seja, em ambas por detecção de informação visual, sonora ou tátil, o efeito deste tempo de reação sobre a média tende a se cancelar, porém a flutuação deste tempo de reação continua contribuindo para a dispersão dos resultados das cronometragens.

Os resultados mostram, então, basicamente as flutuações em tempo do próprio fenômeno observado, superpostas com as flutuações do tempo de reação do observador. Pêndulos, em especial, são sistemas temporalmente muito estáveis, permitindo evidenciar a flutuação da ação dos cronometristas. A flutuação do tempo de reação é tipicamente fruto de uma infinidade de pequenos efeitos (vários deles complexas reações biológicas) sendo, portanto, ideal para satisfazer a expectativa estatística que fundamenta a distribuição gaussiana.

EFEITOS PERCEBIDOS EM ALGUNS CRONÔMETROS DIGITAIS E SUA CARACTERIZAÇÃO

Embora em resultados de cronometragens com cerca de meia centena de eventos, todas as distribuições de tempo se assemelhassem, *grosso modo*, a distribuições gaussianas, havia, em alguns cronômetros digitais, claramente dígitos preferenciais nos valores dos centésimos distribuídos aproximadamente de 3 em 3 centésimos de segundos. Este fato foi percebido como estatisticamente não razoável por parte dos alunos de Física Experimental 1, apesar do número relativamente baixo de eventos observados. A Figura 1 ilustra um caso especialmente marcante, obtido por um aluno na cronometragem de 10 oscilações completas de um pêndulo. Percebe-se claramente que houve preferência pelos seguintes centésimos: 66, 69, 72, 75 e 81.

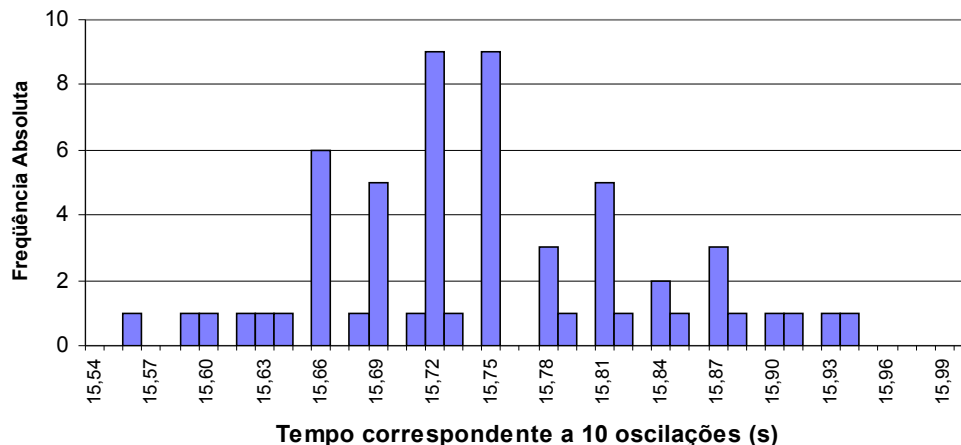


Figura 1 – Cronometragens dos períodos de um pêndulo, obtidas por um aluno.

Ao serem agrupados todos os resultados da classe, obtidos de cronometragens de eventos em sistemas basicamente iguais (pêndulos com comprimentos de ~62 cm), resultou a distribuição mostrada na Figura 2. A conformação geral a uma distribuição gaussiana é evidente, assim como é notável, também, a preferência por certos dígitos, enquanto outros estão sub-representados. Barras de incerteza, que representam a flutuação estatística esperada, foram apresentadas para os canais correspondentes aos dígitos preferenciais e ao menor de seus vizinhos. Ficou evidenciado que alguns dos cronômetros não apresentam uma distribuição equiprovável dos centésimos de segundo, sendo que cerca de 40% dos valores não são obtidos regularmente.

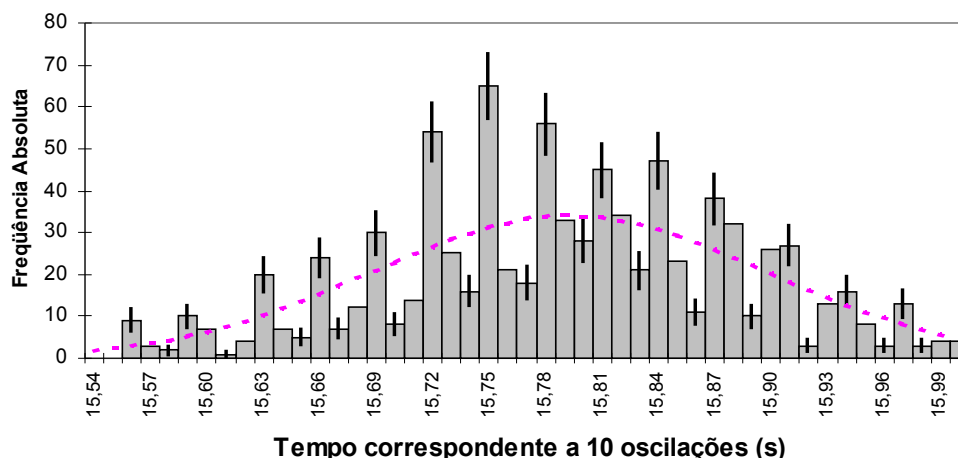


Figura 2 – Cronometragens dos períodos de pêndulos semelhantes, obtidas em uma classe.

A identificação do efeito responsável por este tipo de distribuição de resultados, sua caracterização e modelamento são apresentadas a seguir com o detalhamento necessário para que possam ser utilizadas por professores de Física como uma forma de instigar os alunos. Vale a pena lembrar que os métodos e procedimentos utilizados em Física constituem um importante conteúdo a ser trabalhado em todos os níveis de ensino.

Diversos professores da disciplina, investigando dados colhidos pelos alunos, perceberam uma repetição estatisticamente pouco provável dos valores obtidos, chamando a atenção a elevada taxa de obtenção de resultados com os seguintes centésimos: 00, 25, 50, e 75, ou seja, com centésimos de segundo múltiplos de 25. Uma avaliação mais cuidadosa das folhas de dados de cronômetros com estas características mostrou ainda que os resultados com os centésimos 01, 02, 23, 24, 26, 27, 48, 49, 51, 52, 73, 74, 76, 77, 98 e 99 praticamente não ocorriam.

Posteriormente, tentando obter uma distribuição aleatória de eventos, foi desenvolvido um programa de computador que disparava uma seqüência de alertas sonoros para serem utilizados como referência para a partida e parada da cronometragem. A Figura 3 apresenta parte dos resultados destes estudos, onde se percebe que, além de dígitos “preferenciais”, existem dígitos “proibidos”, com zero ocorrências.

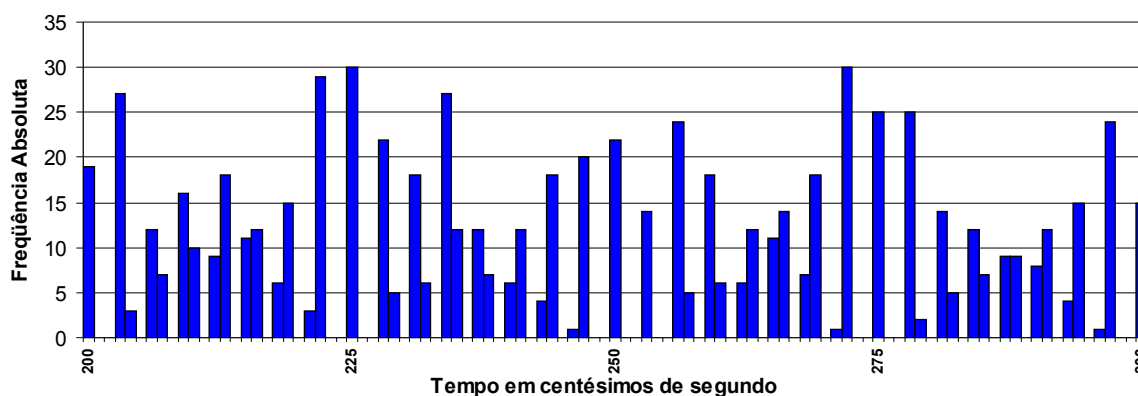


Figura 3 – Distribuição de ocorrências dos resultados de cronometragens, em testes.

Com a ampliação dos testes foi confirmada a repetição do efeito em seqüências de 25 centésimos de segundo, sendo obtida a informação sistematizada na Figura 4, que incorpora os

5 391 resultados de cronometragem efetuadas em cronômetros que apresentavam o efeito, tanto realizadas pelos alunos (1 946 dados, de 5 turmas diferentes entre os anos de 1999 a 2004), quanto aqueles dos testes sistemáticos realizados pelos professores (3 445 dados).

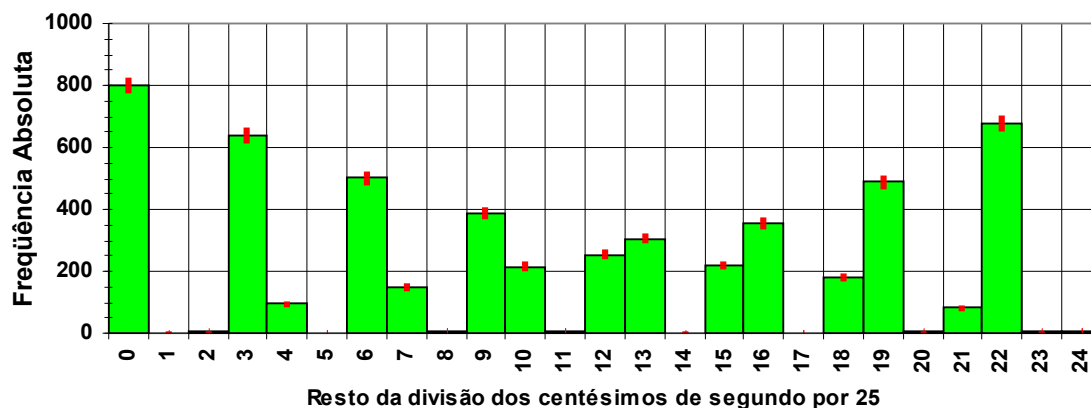


Figura 4 – Distribuição de ocorrências de 5 391 resultados de cronometragens apenas dos cronômetros que apresentam o comportamento analisado.

POSSÍVEL MODELAMENTO DO EFEITO

Analisando os resultados apresentados na Figura 4 é possível perceber que o período de repetição do “ciclo” dígitos “preferidos/proibidos” está relacionado com tempo $0,25 s \div 8 = 0,03125 s$, pois há 8 “ciclos” em cada seqüência de repetição do efeito que é de 25 centésimos de segundos. Este tempo corresponde exatamente a 1 024 vezes (2^{10}) o período nominal de oscilação dos cristais de quartzo utilizados como base de tempo de cronômetros digitais que é 32 768 Hz (2^{15} Hz).

No circuito destes cronômetros digitais deve haver um divisor binário de 16 bits (pois ele é necessário para determinar os segundos), e é bastante razoável supor que a frequência de trabalho da parte digital dos cronômetros (o “clock”) seja obtida a partir do mesmo divisor binário. Estas hipóteses permitem correlacionar a periodicidade com que as operações digitais são efetuadas durante uma cronometragem com o tempo transcorrido na mesma. As memórias dinâmicas precisam de sinais que indiquem os momentos para efetuar as operações de “leitura” e de “escrita”, e qualquer instrumento com um mostrador digital necessita de um “buffer” que, da mesma forma, precisa de um sinal que indique quando deve ser efetuada a sua atualização.

Assim, podemos criar um modelo para o funcionamento do cronômetro supondo que: (a) haja uma relação entre os tempos de atualização da memória do cronômetro e do “buffer” de tela diretamente relacionado com o tempo decorrido desde o início da contagem de tempo; (b) o “clock” da parte digital desses cronômetros seja igual ao “ciclo” dos dígitos “preferidos/proibidos” do efeito (0,03125 s); (c) a atualização das memórias tenha esta mesma periodicidade e que esta atualização só ocorra quando a cronometragem está ativa; (d) que os sinais de centésimos de segundo sejam gerados em outro divisor, não sincronizado com o início da cronometragem.

Com base neste modelo, se o tempo decorrido entre o início e o final da cronometragem for inferior a um “ciclo” do efeito (0,03125 s), o cronômetro não terá efetuado nenhuma atualização de memória e, portanto, os centésimos transcorridos não terão sido registrados na memória (embora o tenham sido no divisor binário), inviabilizando a obtenção dos centésimos 1 e 2. Lembrando que o

mesmo efeito deve ocorrer a cada 25 centésimos, quando novamente o “ciclo” é sincronizado com o “clock” da parte digital, isso explica ausência de resultados com centésimos 26, 27, 51, 52, 76 e 77.

Quando o tempo decorrido se situar entre um e dois “ciclos” do efeito o cronômetro só terá efetuado uma atualização da memória (em 0,03125 s). Se o tempo transcorrido entre o início da cronometragem e a chegada do primeiro sinal correspondente aos centésimos de segundo for superior a 0,00125 s, apenas 3 sinais de centésimos de segundo terão sido computados neste tempo, caso contrário, 4 sinais de centésimos de segundo terão sido computados e o valor registrado na memória só poderá conter os centésimos 3 ou 4, enquanto o 5 não deve ser obtido. Portanto, o centésimo 3 deve ser obtido 7 vezes mais do que o 4, o que pode ser verificado na Figura 4, onde o valor experimental para esta razão é $R_{3/4} = 6,7 \pm 0,7$, compatível com o valor previsto, 7.

Estendendo o mesmo raciocínio para o caso dos outros intervalos de tempo é possível explicar tanto os dígitos “proibidos”, quanto à relação de “preferência” entre os dígitos “vizinhos”. A comparação das previsões deste modelamento com os resultados experimentais da Figura 4 reflete a excelente qualidade da descrição, através do valor obtido em um teste de qui-quadrado: $\chi^2 = 11,5$ para 7 graus de liberdade (que apresenta probabilidade de ser excedido de ~15%).

CONCLUSÃO

Especialmente em uma situação de laboratório didático para ingressantes é importante e motivador manter uma atitude investigativa por parte do corpo docente. Tal atitude facilmente contamina a classe, favorecendo a aquisição de critérios com embasamento científico e fundamentando a confiança em resultados experimentais.

Em particular, a investigação sobre os cronômetros digitais, aqui apresentada, embora de modo geralmente não tenha conseqüências sérias para a maioria das situações de cronometragem, é um alerta sobre as características presentes nestes e em outros instrumentos digitais que podem comprometer seu uso em medições que precisariam estar dentro da resolução indicada.

Os autores agradecem os colegas Cesar Guimarães, Washington Carvalho, Eduardo Monteiro e Philippe Gouffon pelo auxílio na realização dos testes e na identificação do efeito.

REFERÊNCIAS

- 1) L.B. Horodynski-Matsushigue *et al.*, *Gambling as a teaching aid in the introductory physics laboratory*, Eur. J. Phys. **19** (1998) 337
- 2) L.B. Horodynski-Matsushigue *et al.*, *Planning an introductory laboratory for physics freshmen: ten years of growing understanding at São Paulo University*, in anais da 7^aIACPE, Porto Alegre (Canela), em CD-ROM (2000)
- 3) J. H. Vuolo *et al.*, *Apostila de Física Experimental 1*, IFUSP (2004), São Paulo
- 4) J. H. Vuolo *et al.*, *Apostila de Física Experimental 2*, IFUSP (2004), São Paulo
- 5) O. Helene *et al.*, *O que é uma medida?*, Rev. Bras. Ensino de Física **13** (1991) 12
- 6) P.H. Dionisio, *Sensibilidade do equipamento x Precisão da medida*, Rev. Bras. Ensino de Física **13** (1991) 30