

DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO DE MEDIÇÃO DE TEMPO DE QUEDA LIVRE UTILIZANDO BOBINAS E ESFERAS DE NEODÍMIO

Maria Fernanda Armelin, Marcos Vinícius Rodrigues, Laos Alexandre Hirano

*Laboratório de Prototipagem de Sistemas Embarcados - LAPSE
Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, Brasil
mariafernanda.armelin@sou.unifal-mg.edu.br*

Resumo: Apresenta-se um sistema para medir o tempo de queda livre de uma esfera de Nd baseada em duas bobinas de indução, conversor ADS1115 (16 bits, I2C), microcontrolador Arduino Uno e display LCD I2C. Cinco medições do tempo de trânsito entre as bobinas ($h = 49$ cm) resultaram em média de $181 \text{ ms} \pm 6 \text{ ms}$, com erro de -2,76% frente ao valor teórico de 186,3 ms e coeficiente de variação de 3,58%, validando o sistema de detecção sem contato proposto.

Palavras-chave: Indução de Faraday; Arduino; ADS1115; Queda livre; Cronometragem eletrônica.

INTRODUÇÃO

A cronometragem precisa de eventos cinemáticos breves é um desafio recorrente em experimentos de física e engenharia que exigem a determinação de velocidades e acelerações a partir de intervalos de tempo da ordem de centenas de milissegundos. Métodos manuais introduzem erros sistemáticos expressivos - tipicamente de 150 a 300 ms - decorrentes do tempo de reação do operador e da imprecisão visual na identificação dos instantes de referência (Halliday et al., 2016).

A automação da cronometragem por sensores eletrônicos é uma solução consolidada para contornar limitações manuais. Dentre as técnicas disponíveis, a detecção óptica via sensores a laser é amplamente utilizada; contudo, apresenta altos custos, calibração complexa e suscetibilidade a interferências luminosas externas. Como uma alternativa inovadora a esses problemas, este trabalho propõe o uso da detecção eletromagnética para registrar a passagem de esferas de neodímio. Esse método destaca-se pela ausência de contato físico com o objeto em movimento, pela total independência de condições de iluminação e pela excelente compatibilidade com projéteis magnéticos de geometria simples. O princípio é descrito pela Lei de Faraday-Lenz: a variação temporal do fluxo magnético produzido pela esfera ao atravessar as espiras de uma bobina induz uma força eletromotriz (Equação 1), gerando um pulso de tensão detectável eletronicamente:

$$\varepsilon = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad (1)$$

gerando um pulso de tensão detectável eletronicamente (Halliday et al., 2016).

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a validação experimental de um sistema de cronometragem eletromagnética para queda livre, composto por duas bobinas de indução integradas a um conversor analógico-digital ADS1115 de 16 bits, um microcontrolador Arduino Uno e um display LCD I2C para exibição automática dos resultados. O objetivo é avaliar a precisão e a repetibilidade do sistema por meio da comparação entre os tempos de trânsito medidos experimentalmente e o valor teórico calculado analiticamente.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em tubo vertical, com esfera liberada do topo. A Bobina 1 (B1) está posicionada 15 cm abaixo do ponto de liberação e a Bobina 2 (B2) está 49 cm abaixo de B1. O cronômetro é acionado pela detecção em B1 e encerrado pela detecção em B2, medindo exclusivamente o tempo de trânsito no trecho de 49 cm entre os sensores, conforme ilustrado na montagem principal (**Figura 1A**). O detalhe construtivo do sensor, composto pelo carretel impresso em 3D e o enrolamento da bobina de indução, é apresentado na **Figura 1B**.

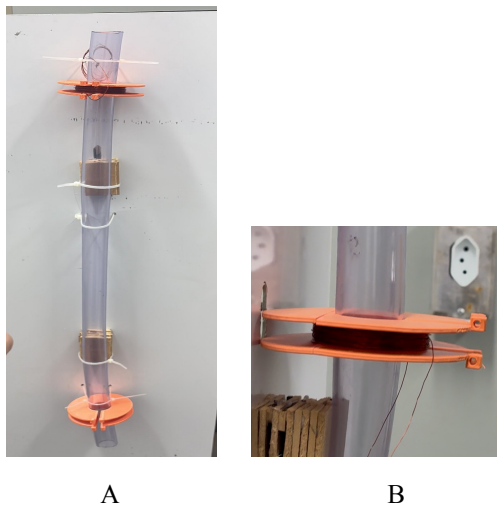


Figura 1. Detalhes da montagem experimental. Em (A), visão geral destacando o posicionamento e distanciamento de 49 cm entre as bobinas (B1 e B2) para a medição de queda livre. Em (B), detalhe em aproximação do carretel impresso em 3D utilizando como suporte para o enrolamento da bobina de indução.

As bobinas possuem 500 espiras de fio de cobre esmaltado 30 AWG, enroladas em carretéis impressos em 3D com comprimento de 1 cm. Esta geometria compacta foi adotada após a comparação com bobinas de 5 cm: as bobinas longas produzem pulsos temporais de 80 a 120 ms e menor amplitude de pico, dificultando a determinação precisa do instante de passagem da esfera.

O sinal analógico das bobinas é condicionado por resistores pull-down de 10 k Ω e adquirido pelo módulo ADS1115 (ganho GAIN_ONE, $\pm 4,096$ V, resolução de 0,125 mV/LSB, I2C no endereço 0x48). O Arduino Uno lê continuamente os dois canais e registra o instante de cruzamento do limiar de tensão, calculando o intervalo de tempo com resolução de 4 μ s via função micros(). O resultado é exibido no display LCD 16x2 (endereço I2C 0x27) sem intervenção do operador, conforme ilustrado na figura 2:



Figura 2. Exibição automatizada do tempo de queda livre da esfera no display LCD 16x2 após o processamento dos sinais das bobinas.

O firmware implementa limiar de detecção calculando automaticamente a cada inicialização a partir de 200 amostras do ruído de fundo de cada canal (definido como quatro vezes o pico máximo do ruído acrescido de 10 mV de margem de segurança) e debounce de 2 ms por canal para supressão do pico negativo do sinal bipolar gerado pela passagem da esfera.

O tempo teórico de referência foi calculado considerando que a esfera chega a B1 com velocidade inicial (equacionada abaixo):

$$v_1 = \sqrt{2gh_1} \quad (2)$$

adquirida durante os 15 cm de queda livre anteriores ($h_1 = 0,15$ cm; $g = 9,81$ m/s²). O tempo para percorrer os 49 cm subsequentes é obtido pela solução:

$$h_2 = v_1 t + \frac{1}{2}gt^2 \quad (3)$$

resultando em $t_{teórico} = 186,3$ ms. Foram realizadas cinco quedas consecutivas da mesma esfera para avaliação da repetibilidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta os cinco tempos de trânsito medidos, o erro relativo de cada medição e as estatísticas descritivas do conjunto.

Tabela 1. Tempos de trânsito medidos entre B1 e B2 - $h_2 = 49$ cm.

Medição	Tempo medido (ms)	Erro relativo (%)	Desvio (ms)
Queda 1	189	+1,43	+2,66
Queda 2	173	-7,16	-13,3
Queda 3	181	-2,87	-5,34
Queda 4	186	-0,18	-0,34
Queda 5	177	-5,01	-9,34
Média $\pm$ DP	181 $\pm$ 6ms	-2,76%	CV = 3,58%

A média das cinco medições (181 ms) apresentou erro de -2,76% em relação ao valor teórico, indicando que o sistema tende a subestimar levemente o tempo real - resultado consistente com a hipótese de que o limiar de tensão é cruzado antes do centro geométrico da bobina, antecipando o instante de detecção. O coeficiente de variação de 3,58% - desvio padrão de 6 ms - reflete dispersão moderada entre as repetições, aceitável para uma etapa inicial de validação.



A Queda 4 apresentou o menor erro relativo (-0,18%), enquanto a Queda 2 registrou o maior desvio (-7,16%). Essa assimetria sugere que a variabilidade entre repetições é influenciada principalmente pela imprecisão no ponto de liberação da esfera: pequenas diferenças na posição inicial alteram a velocidade de chegada em B1 e, consequentemente, o tempo de trânsito medido. A amplitude total entre a medição mínima e máxima foi de 16 ms, intervalo compatível com a variabilidade esperada para um sistema sem mecanismo de liberação padronizado.

Os resultados confirmam que o princípio de detecção eletromagnética por bobinas de indução é tecnicamente viável para a cronometragem automática de queda livre: o sistema captou, sem contato físico, os dois eventos de passagem da esfera, calculou o intervalo temporal e exibiu o resultado no display LCD em tempo real (Arduino, 2026; Adafruit Industries, 2026).

CONCLUSÃO

O sistema de cronometragem eletromagnética desenvolvido mediu o tempo de trânsito de uma esfera em queda livre de 3,58% entre cinco repetições. Esses resultados validam a arquitetura proposta - bobinas de indução de 1 cm com 500 espiras, conversor ADS1115 de 16 bits e microcontrolador Arduino Uno - como solução funcional para cronometragem automática de queda livre sem contato físico.

A principal fonte de variabilidade identificada foi a imprecisão no ponto de liberação da esfera. As próximas etapas preveem a adoção de mecanismo de liberação padronizado e aumento do número de repetições ($n > 20$), visando reduzir o coeficiente de variação abaixo de 2% e consolidar a confiabilidade metrológica do sistema.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece à Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG) pela infraestrutura laboratorial cedida e à Pró-Reitoria de Extensão (PROEX/UNIFAL-MG) pelo apoio financeiro concedido por meio do projeto PREAE 8420. Expresso minha profunda gratidão ao orientador Prof. Laos Alexandre Hirano e ao coorientador Prof. Marcos Vinicius Rodrigues pelo indispensável suporte técnico e científico ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

Adafruit Industries. ADS1115 16-Bit ADC - 4 Channel with Programmable Gain Amplifier. Disponível em: www.adafruit.com/product/1085. Acesso em: jun. 2026.

Arduino. Arduino Uno Rev3 - Technical Specifications. Disponível em:

docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3. Acesso em: jun. 2026.

Halliday, D., Resnick, R., Walker, J. Fundamentos de Física: Mecânica e Eletromagnetismo. LTC, Rio de Janeiro, 2016.