

# Propriedades de um acelerômetro eletrônico e possibilidades de uso no ensino de mecânica



Fábio Saraiva da Rocha<sup>1</sup>, Guilherme Frederico Marranghello<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Pelotas, Centro de Integração do Mercosul,  
CEP 96010-900 Pelotas, RS, Brasil.

<sup>2</sup>Universidade Federal do Pampa, Campus Bagé, CEP 96413-170 Bagé, RS, Brasil.

E-mail: fabio.saraiva.rocha@gmail.com

(Recebido 25 Outubro 2012, aceito 18 Fevereiro 2013)

## Resumo

Apresentamos as propriedades básicas de um sensor eletrônico de aceleração e algumas possibilidades de uso em práticas de ensino de mecânica, propostas para um laboratório didático de física experimental. Um acelerômetro, quando acoplado a um corpo, permite a leitura da aceleração imprimida ao conjunto. A partir da aceleração é possível obter informações sobre diversas grandezas físicas da cinemática e da dinâmica, como velocidade, aceleração, força ou mesmo o tempo de resposta durante um evento. Apresentamos as características físicas e operacionais do acelerômetro, o circuito eletrônico de medição e o tratamento do sinal elétrico obtido como saída do dispositivo. Também apresentamos resultados de medidas feitas em práticas sobre Queda dos Corpos e Movimento Harmônico Amortecido. Tais práticas podem ser facilmente reproduzidas num laboratório didático. De forma complementar, apresentamos medidas utilizando um sensor sonar servindo como parâmetro de comparação e desempenho do acelerômetro no caso do Movimento Harmônico Amortecido. O uso do dispositivo em questão se mostra promissor para ser utilizado em diversas práticas em ensino de física, seja objetivando a inovação importante no laboratório didático, pela possibilidade de utilizar o recurso da Física em Tempo Real com uma classe demonstrativa, ou pelo envolvimento de alunos em projetos interdisciplinares.

**Palavras-chave:** Instrumentação, Acelerômetro, Educação mediada por tecnologias.

## Abstract

We present the basic properties of an electronic accelerometer and some possibilities for its use in Mechanics teaching didactic practices proposals for an experimental physics lab. An accelerometer when tightly coupled to a body, allows the direct reading of the acceleration of the set. From the acceleration it is possible to obtain information on various physical quantities of the kinematics and dynamics, such as velocity, acceleration or force. We present the physical and operational characteristics of the accelerometer and the electronic circuit for measuring and processing the electrical signal obtained as the output device. We present results of measurements performed on two practices on the issues Falling Bodies and Damped Harmonic Motion. Such practices can be easily reproduced in a laboratory of experimental physics. As a complement, we present measurements made using a sonar sensor that serves as a baseline for comparison and performance of the accelerometer in the case of Damped Harmonic Motion. We believe that the use of the device in question shows to be promise for use in numerous other practices in physics teaching, it is aimed at teaching important innovation in the laboratory, the possibility of using the feature of Real-Time Physics with a class demonstration and in the point of view of involving students in interdisciplinary projects.

**Keywords:** Instrumentation, Accelerometer, Technology-mediated Education.

**PACS:** I74.60.-w, 74.80.Bj

**ISSN 1870-9095**

## I. INTRODUÇÃO

Estudos publicados na literatura [1, 2, 3, 4] apontam para um amplo questionamento das práticas tradicionais de laboratório de física que ainda vigoram nas nossas classes escolares de ensino básico e até mesmo superior. Uma re-significação do trabalho escolar experimental passa pelo fortalecimento da formação inicial e formação continuada de nossos professores, por revisar conceitos teóricos do ensino de Física e também por uma maior utilização crítica e estratégica do computador e

das tecnologias de informação em sala de aula [5]. Como afirma D'Ambrosio (pág. 61, [6]) “É claro que a tecnologia por si não implica uma boa educação. Mas sem dúvida, é quase impossível conseguir uma boa educação sem tecnologia”.

O ensino de laboratório, em sua maioria, não tem favorecido, de forma significativa, a aprendizagem dos alunos. Este ensino tem sido burocratizado e subutilizado e desta forma pode apresentar as seguintes limitações [7]:

i) não relaciona as atividades práticas com os conceitos físicos;

ii) as operações de montagem dos equipamentos e as atividades de coletas de dados consomem muito tempo ou todo tempo disponível;

iii) não proporciona uma apreciação sobre a natureza da ciência e da investigação científica.

Existem inúmeros recursos tecnológicos que vem se tornando acessíveis ao público em geral e que podem ser fortes aliados na construção de um novo cenário para o trabalho experimental no ensino de física, principalmente pela inserção do computador e de sensores eletrônicos em práticas escolares. Atualmente, temos visto um amplo desenvolvimento da indústria de sensores. Existem sensores de variados tipos que atendem aos mais diversos propósitos, desde sistemas de controle de máquinas industriais, controle automotivo até equipamentos médicos e de segurança. Os sensores, quanto ao princípio de funcionamento, podem ser mecânicos, térmicos, de imagem, fotoelétricos, capacitivos, ultra-sônicos, entre muitos outros. De um modo geral, os sensores operam amparados em circuitos eletrônicos auxiliares que servem para energizar o dispositivo e condicionar os seus sinais de saída. Atualmente, os sensores chegam até o mercado (local ou pela internet) podendo ser adquiridos através de um modesto investimento financeiro.

Algumas empresas de equipamentos eletrônicos e tecnologia têm apresentado produtos para fins educacionais contendo diversos sensores e que são direcionados ao ensino de física experimental ([www.vernier.com](http://www.vernier.com) e [www.cidepe.com.br](http://www.cidepe.com.br)). Seja no mercado nacional ou internacional vemos uma grande oferta de sensores que operam desde o monitoramento de pressão gasosa, temperatura e aceleração, até a medição de campo magnético e força, incluindo sensores que utilizam comunicação sem fio (wireless). Todos estes equipamentos apresentam interface com microcomputadores sendo a maioria deles através da porta USB. Os programas computacionais que são comercializados junto a estes dispositivos permitem a leitura e monitoramento de uma grandeza física em tempo real, enquanto a experiência transcorre. A simultaneidade de leitura e apresentação dos dados medidos, Física em Tempo Real, oferece ao professor uma importante vantagem, principalmente no sentido de trabalhar com classes demonstrativas estimulando o poder de predição, investigação e comparação pelos alunos (<http://bcs.wiley.com/he-bcs/Books?action=index&itemId=0471129658&itemTypeId=BKS&bcsId=1475>).

Para a grande maioria dos estabelecimentos educacionais de países em desenvolvimento, o custo financeiro destes sensores e conjuntamente seus programas computacionais são elevados proibindo sua popularização. Sendo assim, o uso de tais recursos eletrônicos no ensino de física experimental tem ficado restrito basicamente ao ensino universitário e em poucos estabelecimentos educacionais. Alguns trabalhos apresentados na literatura oferecem projetos de instrumentação para laboratório didático de física experimental que visam suprir esta carência de sensores eletrônicos que podem ser controlados por microcomputadores sendo potencialmente úteis no ambiente escolar. Estes projetos [8, 9, 10], em geral, procuram

minimizar custos financeiros e incentivar professores e seus alunos na replicação do produto.

No presente trabalho apresentamos as características básicas de um acelerômetro eletrônico triaxial e apontamos possibilidades de uso em práticas de física experimental. O dispositivo sensor possui saídas do sinal elétrico que podem ser lidas através da placa de som do computador, utilizando um kit de osciloscópio para microcomputador, adquirido com baixo investimento financeiro. Junto com as medidas realizadas com o acelerômetro também apresentamos medições feitas com um sensor sonar comercial que servem como parâmetros de comparação de desempenho. As práticas que apontamos podem ser reproduzidas com baixo investimento financeiro em um laboratório modesto de ensino de física ou até mesmo em uma sala de aula para fins demonstrativos.

## II. ACELERÔMETROS: ASPECTOS BÁSICOS

A aceleração é uma grandeza física cinemática que mede quão rapidamente a velocidade de um corpo varia ao longo do tempo. Acelerômetros mecânicos rústicos podem ser construídos, por exemplo, a partir de um pêndulo simples. Este, quando adequadamente acoplado ao móvel que experimenta uma aceleração, apresenta um deslocamento angular proporcional a aceleração momentânea sofrida. Também podemos construir um acelerômetro simples se observarmos o comportamento da superfície de um líquido em um recipiente acoplado adequadamente a um corpo que está sendo acelerado. Tais sistemas simples tem se mostrado úteis principalmente para demonstrações qualitativas do comportamento desta grandeza cinemática sendo bastante explorado em salas de aula demonstrativas e até mesmo feiras de ciências. Do ponto de vista prático, se objetivamos medir a aceleração instantânea e sua variação em um evento físico, os acelerômetros citados anteriormente são de difícil utilização e não são práticos para boas medidas numéricas com fins educacionais.

Com a grande oferta de sensores de aceleração eletrônicos no mercado atual e seu baixo custo financeiro, se pode pensar num maior espaço para este dispositivo dentro de um laboratório didático de física experimental. Os dispositivos atuais têm dimensão e massa reduzidas, podendo ser fácil e discretamente acoplados em corpos sujeitos a acelerações nas mais diferentes práticas de física experimental.

Existem diversos tipos de acelerômetros, cada qual contendo em suas características algumas vantagens e desvantagens. São muito comuns os capacitivos, os piezoelétricos e os piezoresistivos. Atualmente, estes dispositivos têm sido utilizados em inúmeras aplicações tecnológicas em áreas desde Biomecânica e Medicina até Sistemas de Navegação Inercial, Robótica, Jogos Eletrônicos e Telefonia Celular.

O acelerômetro capacitivo utilizado nas práticas que apontaremos em seguida foi adquirido via comércio eletrônico no mercado nacional, veja a foto do sensor na Fig 1. O módulo sensor em destaque tem dimensões 3 mm x 5 mm x 1 mm e alguns miligramas de massa. Vem montado em uma

placa que tem dimensões planares de 17 mm x 28 mm com componentes eletrônicos que são imprescindíveis para o bom funcionamento do dispositivo. Estes circuitos eletrônicos atuam no condicionamento do sinal a ser lido e na adequação da tensão de alimentação. Detalhes específicos a respeito dos circuitos citados podem ser encontrados no manual do fabricante. O sensor já vem com a indicação inequívoca das direções ortogonais x, y, z, inscritas na placa de componentes.



**FIGURA 1.** Foto do sensor acelerômetro capacitivo com as principais funções indicadas. Em destaque na parte inferior da figura temos o módulo sensor *MM7361* fabricado pela empresa *Freescale*. Esta ilustração foi adaptada a partir de figura obtida no site da empresa que comercializa o sensor ([www.tato.ind.br](http://www.tato.ind.br)).

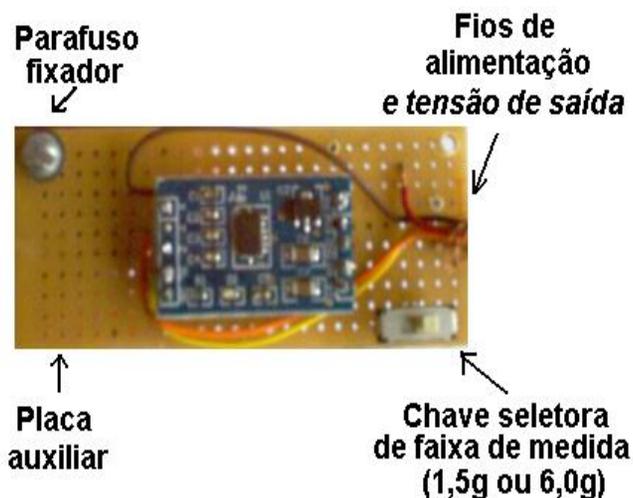
O conjunto do sensor como um todo (módulo mais componentes eletrônicos) foi soldado em uma placa auxiliar de dimensões 70 mm x 29 mm e que serve para ancorar mecanicamente os fios de alimentação e os fios de tensão elétrica de saída do dispositivo, veja a Fig. 2. Os fios de alimentação e de captação do sinal de saída do acelerômetro devem ser escolhidos de forma a minimizar a influência da inércia mecânica e o aparecimento de ruído durante as medidas.

A placa auxiliar possui um orifício em uma de suas extremidades que serve para fixar o conjunto ao corpo que se deseja monitorar a aceleração. Claro que neste ponto é importante atentar para o bom acoplamento mecânico do sensor ao corpo e a correta escolha de posicionamento espacial do sensor relativo do eixo que se vai medir a aceleração. A massa total do conjunto sensor e placa auxiliar é de 8 gramas. As medidas que serão apresentadas neste trabalho foram feitas com o acelerômetro firmemente acoplado ao corpo em estudo (uma bola de bilhar) através de um parafuso.

O módulo sensor, destacado na Fig. 1, é o coração do sensor, e pode ser alimentado por uma fonte d. c. que trabalhe na faixa de 2,2 até 3,6 V. O valor típico informado pelo fabricante é de 3,3 V. O modelo *MMA 7361L* é triaxial, ou seja, permite leitura simultânea de aceleração em três eixos ortogonais e proporciona sinal analógico de saída em modo contínuo, porém variável no tempo. Sua fabricação utiliza a

tecnologia *MEMS* (*Micro-Electro-Mechanical Systems – Sistemas Micro-Eleto-Mecânicos*), que possibilita a montagem de estruturas mecânicas e eletrônicas em circuitos integrados de grande desempenho. Essas estruturas incluem capacitores internos ao módulo que contém partes móveis que impõem inércia ao movimento. Nesses modelos, são montadas três placas, que constituem dois capacitores com uma placa central móvel, veja a Fig. 3. Conforme se estabelece o movimento acelerado na direção considerada, a distância entre as placas se altera e a capacitância dos dois capacitores varia. Ao monitorar a variação da capacitância em função da rapidez de movimentação relativa da placa móvel, o dispositivo irá medir a aceleração em função do tempo. Um processador eletrônico monitora essas variações de capacitância e obtém a aceleração.

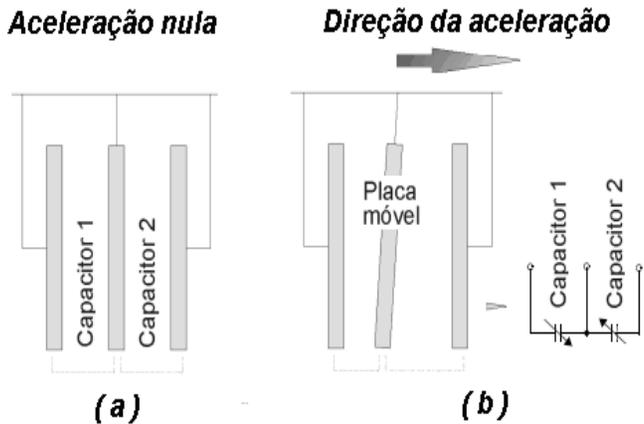
Nosso dispositivo foi calibrado na origem da fabricação o que garante o desempenho apontado pelo fabricante dentro dos limites de uso preconizados. Em casos de exposição a choques mecânicos excessivos, altas temperaturas ou outro fator que provoque alterações físicas no elemento sensor, uma nova calibração deve ser feita. Claro que dependendo do estrago causado ao dispositivo o dano poderá ser irreparável, portanto o cuidado no manuseio do acelerômetro é fundamental.



**FIGURA 2.** Foto do sensor acelerômetro e a placa auxiliar montada especificamente para as práticas propostas neste trabalho.

O acelerômetro pode medir aceleração no modo dinâmico e até a intensidade do campo gravitacional no modo estático, ou seja, registrando a presença da gravidade, ou sua componente em função da inclinação do eixo de leitura. Estas medidas podem ser feitas mesmo com o dispositivo em inércia de repouso em relação ao sistema de referência do laboratório. A Fig. 4 apresenta os valores de tensão d. c. apontados pelo fabricante do módulo sensor para as saídas do acelerômetro em cada eixo coordenado (x, y ou z). O que muda, caso a caso, é apenas a direção do campo gravitacional em relação a cada eixo. O recurso destas medidas estáticas abre a possibilidade de medir deslocamentos angulares e até mesmo

Fábio Saraiva da Rocha, Guilherme Frederico Marranghello  
 velocidades angulares com o acelerômetro trabalhando como um inclinômetro (www.freescall.com/files/sensors/doc/app\_note/AN3461.pdf). Se o corpo estiver em estática, a inclinação é facilmente encontrada lendo o sinal elétrico de saída do dispositivo. Caso contrário, o problema altera-se, devido essencialmente à mistura entre a componente gravítica (estática) e de aceleração (dinâmica) presentes no sinal.



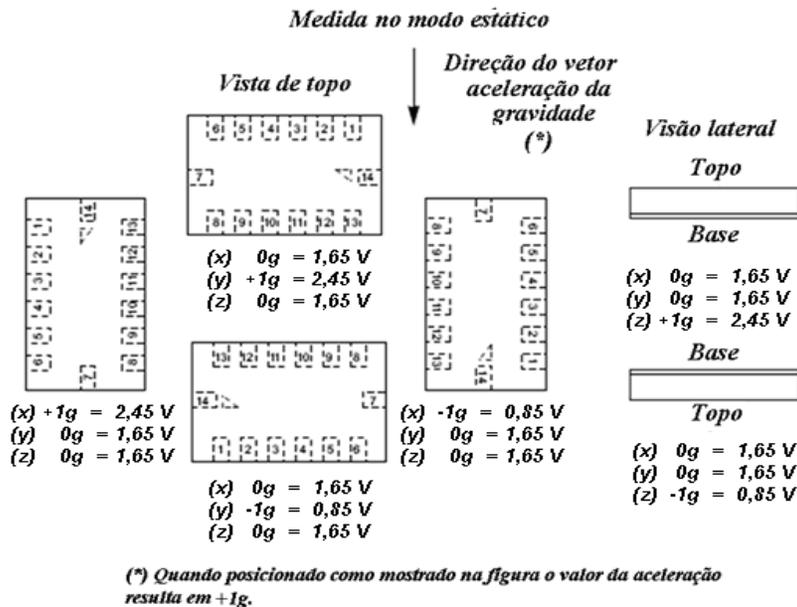
**FIGURA 3.** Princípio de funcionamento do módulo de aceleração baseado no efeito de variação da capacitância a partir do movimento relativo entre placas. Em (a) temos aceleração nula e as capacitâncias não variam no tempo e em (b) a placa móvel dos capacitores se desloca em relação as demais, alterando assim a capacitância dos capacitores 1 e 2. Figura adaptada de “Aplicações, Funcionamento e Utilização de Sensores”, (www.maxwellbohr.com.br/downloads/robotica/mec1000\_kdr5000/tutorial\_eletronica\_-\_aplicacoes\_e\_funcionamento\_de\_sensores.pdf).

O dispositivo pode atuar em duas faixas de medida, uma até  $\pm 1,5$  g e outra até  $\pm 6,0$  g. A sensibilidade informada pelo fabricante se apresenta numa banda de valores cujo valor típico é de 800 mV/g para a primeira faixa de medida e 206 mV/g para a segunda faixa. O valor típico só poderá ser usado se a alimentação do dispositivo também for a típica informada pelo fabricante, ou seja, 3,3 V. Saindo deste valor de alimentação, a sensibilidade (mV/g) e também a tensão de “offset” varia crescendo ou decrescendo linearmente. A sensibilidade do acelerômetro aponta a taxa de variação do sinal de saída de acordo com a aceleração sofrida. Quanto mais sensível o dispositivo, variações menores do sinal elétrico podem ser percebidas mais facilmente tornando mais precisa a medição.

A tensão de “offset” estará constantemente presente na saída *d. c.* do acelerômetro quando o eixo considerado ficar alinhado com a direção do campo gravitacional mesmo em inércia de repouso em relação ao chão do laboratório. Este valor de tensão deve ser levado em conta na hora do tratamento numérico dos dados.

A taxa interna de amostragem é de 11 kHz. Este valor aponta a frequência com a qual o dispositivo medirá a aceleração e atualizará o sinal de saída. A máxima aceleração que o módulo pode suportar sem danos ao dispositivo é  $\pm 5000$  g em qualquer eixo. Deve-se ter cuidado ao manusear o módulo sensor, pois este é sensível a descargas elétricas que podem aparecer no contato direto com o corpo humano.

Sobre o dispositivo existem outras informações e funções interessantes e bastante úteis para desenvolvedores de projetos na área. Podem ser vistas diretamente no manual do fabricante do módulo sensor.



**FIGURA 4.** Quadro com as tensões *d. c.* de saída apontadas pelo fabricante do módulo sensor para as direções especificadas. Os valores apresentados servem para um bom teste de funcionamento do dispositivo antes do uso. Qualquer orientação intermediária do módulo em relação à direção do vetor aceleração da gravidade irá apresentar valores intermediários de tensão *d. c.* representando a presença das componentes da aceleração nas respectivas direções do espaço. Figura adaptada do manual do fabricante do módulo de aceleração.

O módulo sensor em questão, ou outros similares, ocasionalmente são disponibilizados pelo fabricante como amostra, sem nenhum custo financeiro. É apenas cobrado o custo do transporte da mercadoria, o que representa, normalmente, poucos dólares americanos. Esta sugestão é válida se o leitor tem boa habilidade para soldagens de precisão, pois o encapsulamento do tipo *LGA (Lan Grid Array)* e as dimensões reduzidas do módulo sensor representam um desafio para soldadores inexperientes.

O site do fabricante do módulo sensor disponibiliza ao leitor algumas notas de aplicação que podem servir de inspiração para uso do dispositivo. Fabricantes de acelerômetros específicos pra fins educacionais também apresentam materiais instrucionais que podem ser úteis no planejamento de práticas educacionais utilizando acelerômetros, veja em [www.vernier.com/products/sensors/accelerometers](http://www.vernier.com/products/sensors/accelerometers).

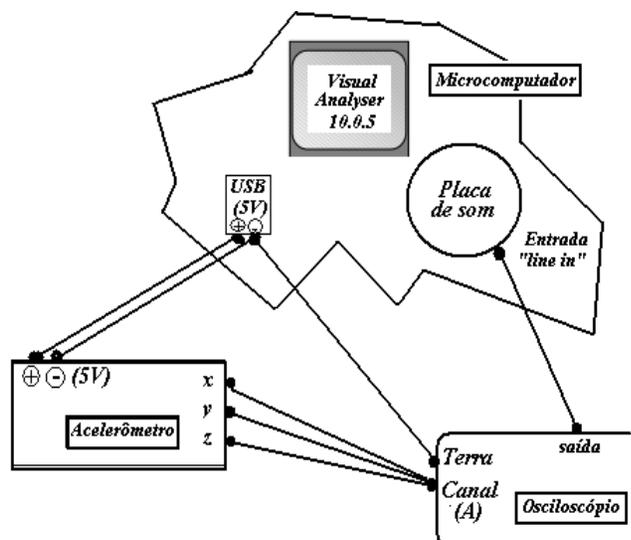
### III. O SISTEMA ELETRÔNICO PROPOSTO PARA AS MEDIDAS COM O ACELERÔMETRO

O sinal de saída analógica de tensão variável *d.c.* do acelerômetro pode ser convenientemente lido através de um osciloscópio para microcomputador (veja a Fig. 5) disponível em (<http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-205123145-pc-osciloscopio-dc-ac-voltmetro-multimetro-voltmetro-JM>) que utiliza a placa de som e o software livre *Visual Analyser*, versão 10.0.5 para captura dos dados e posterior medição e análise. O osciloscópio possui uma interface que consiste em um circuito eletrônico que prepara o sinal a ser lido, via placa de som, na entrada "line in". Normalmente as placas de som dos microcomputadores não devem receber tensões de entrada acima de 5 V *r.m.s.* (*root-mean-square*) sob pena de dano irreparável ao circuito. O osciloscópio utilizado neste trabalho tem custo de cerca de 30 dólares americanos e pode ser utilizado em modo *a.c.* ou modo *d.c.* No modo *d.c.* pode medir até 130 V (*r.m.s.*) e no modo *a.c.* alcança até 400 V (*r.m.s.*). O limite máximo de frequência do sinal elétrico que pode ser lido é de 20 kHz. No caso *a.c.* podemos medir até dois sinais dinamicamente se usarmos os dois canais disponíveis no programa. A medida no modo *d.c.* só pode ser feita através de um canal do osciloscópio, sendo esta uma limitação que acaba não permitindo a medida simultânea da aceleração nos 3 eixos ortogonais. Com este equipamento temos que escolher um eixo para leitura de cada vez. Sendo possível adquirir um osciloscópio com maiores recursos este problema fica resolvido. O próprio osciloscópio apresenta a possibilidade de autocalibração que deve ser feita antes da medida. A placa de som do microcomputador se revelou aqui uma via conveniente de conversão analógico/digital.



**FIGURA 5.** Foto do kit osciloscópio composto de: (interface condicionadora do sinal elétrico a ser transferido para a placa de som do microcomputador, disco de instalação do programa computacional de análise, bateria 12 V para alimentação da interface e cabos de ligação ao microcomputador. O equipamento utiliza a placa de som do microcomputador para leitura dos dados de saída do acelerômetro, converte o sinal analógico em digital (A/D) e armazena os dados numéricos para posterior análise matemática.

A Fig. 6 apresenta o diagrama de blocos representativo dos três elementos do circuito de medida: acelerômetro, interface do osciloscópio e microcomputador. Pode-se notar que o sensor está sendo alimentado através da porta *USB* do próprio microcomputador que pode fornecer uma tensão de 5 V *d.c.* e até 500 mA. O sensor adquirido, já possuía um circuito condicionador de tensão que rebaixa dos 5 V para o nível típico de 3,3 V, ainda no modo contínuo (valor abaixo do limite máximo para alimentação do módulo sensor).



**FIGURA 6** – Diagrama representativo dos elementos do circuito de medida. O sinal elétrico de saída do acelerômetro chega ao microcomputador através da entrada "line in" ainda como sinal analógico.

#### IV. APLICAÇÕES PRÁTICAS PARA ENSINO DE MECÂNICA

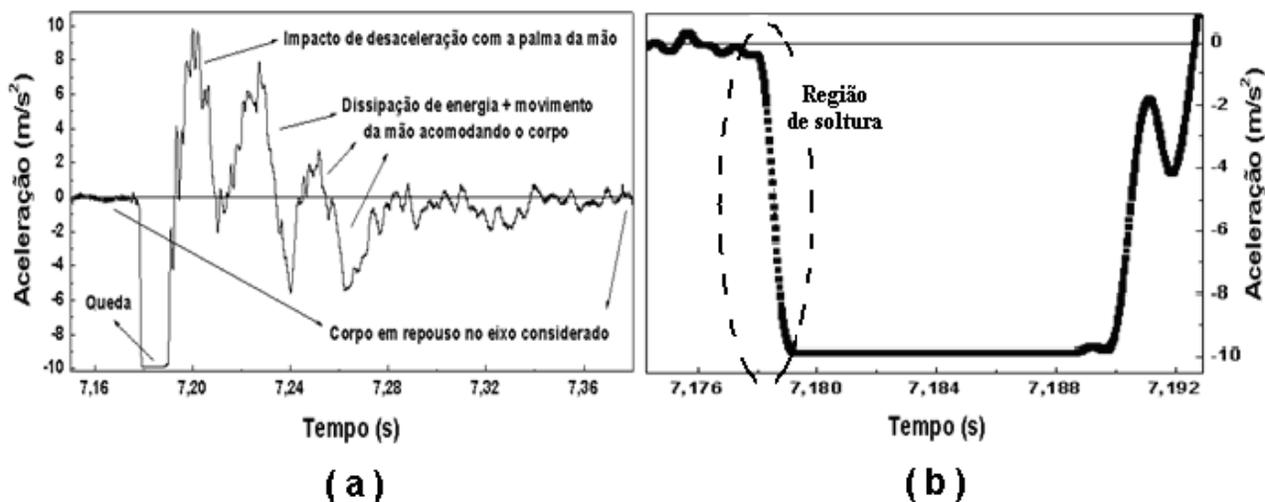
##### A. Queda dos corpos

A aplicação mais simples para uso de um acelerômetro eletrônico que mostraremos no presente trabalho é o monitoramento da queda de um corpo sujeito a força de viscosidade do ar e ao campo gravitacional terrestre. Este movimento é retilíneo e acelerado desde a soltura do corpo em velocidade nula (em relação ao chão do laboratório) até o ponto em que a força de viscosidade do ar equilibra a força gravitacional. A força de viscosidade é contrária ao movimento e tende a crescer conforme o corpo em queda aumenta a sua velocidade podendo chegar ao ponto de aceleração vertical resultante nula se houver tempo suficiente para isso durante a queda.

Atualmente, quando o experimento de queda dos corpos é realizado nos laboratórios escolares, normalmente solta-se uma esfera a partir do repouso e monitora-se sua queda por diversos fotosensores colocados ao longo do percurso. Quase sempre o único objetivo presente nesta experiência clássica é medir a aceleração de queda do corpo estimando o valor da aceleração da gravidade local. Rocha e colaboradores [11] propõem estudar a queda simultânea de dois corpos com mesma massa e formas geométricas diferentes através de um sensor sonar e da técnica de vídeo-análise, comparando-as e medindo a velocidade limite alcançada durante a queda quando a força vertical resultante sobre o corpo é nula. Neste trabalho, além de medir a aceleração de queda do corpo, nós

propomos também observar o que ocorre antes, durante e após a colisão do corpo ao final do percurso previsto.

Através de um parafuso prendemos firmemente a placa auxiliar que contém o acelerômetro numa bola de bilhar de 117 gramas. A massa total do conjunto totalizou 125 gramas. Esta bola de bilhar foi solta a partir do repouso até a palma da mão do experimentador. Durante a queda o acelerômetro foi posicionado de forma que o eixo z do dispositivo ficasse paralelo à direção vertical. O osciloscópio registrou o sinal de tensão elétrica que era entregue pela saída z do dispositivo e também o tempo durante o transcorrer do evento. Os dados de tensão elétrica e tempo foram exportados do programa *Visual Analyser* para o disco rígido do computador através de um arquivo de texto em duas colunas: tensão elétrica (V) x tempo (ms). Esta informação foi importada para o programa *Origin 6.0* para a transformação dos dados de tensão *d. c.* em medida de aceleração através da relação mV/g típica informada pelo fabricante do módulo de aceleração. Como se pode ver na Fig. 4, o sinal de 2,45 V está presente na saída *d. c.* do acelerômetro quando o eixo z fica alinhado com a direção do campo gravitacional. Durante a queda do corpo, monitoramos também os outros eixos (x e y) e apenas detectamos a presença de ruído o que aponta para o desejável alinhamento do eixo z com a vertical. A Fig. 7 mostra o gráfico da aceleração em função do tempo para a queda do corpo. O monitoramento se deu desde instantes antes da queda, enquanto uma das mãos do experimentador segurava o corpo, até momentos após a colisão com a outra mão.



**FIGURA 7** – Em (a) temos o gráfico da aceleração sofrida por uma bola de bilhar durante o processo de queda e impacto do corpo com a mão do experimentador. Através do gráfico é possível acompanhar as várias etapas da experiência. Em (b) temos o detalhe ampliado da aceleração desde a soltura até breves instantes depois da colisão. Está apontada a janela aproximada de tempo referente ao processo de soltura da bola de bilhar.

Pela Fig. 7(a) vemos, por volta do instante de tempo marcado como 7,177 s, uma mudança brusca no comportamento da aceleração levando a um valor constante (patamar). Próximo a este valor, o corpo passa por um processo de soltura para logo em seguida estar em queda sujeito apenas à aceleração

da gravidade e a força de viscosidade do ar. O valor alcançado é de cerca de  $9,82 \text{ m/s}^2$ . Este valor é 0,1% desviado do valor médio para a aceleração da gravidade na superfície da Terra ( $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ). O processo de soltura da bola da mão do experimentador está circulado na Fig. 7(b). É

possível notar uma janela de tempo de alguns poucos milissegundos para todo o processo.

Após o registro do valor da aceleração da gravidade o gráfico segue mostrando as variações da aceleração depois do contato do corpo com a mão do experimentador. Vemos a aceleração trocar de sinal passando a valores positivos bem próximos do valor de  $g$ . Isso se dá, pois a mão do experimentador instintivamente se movimenta ao encontro do corpo em queda parando-o e logo imprimindo aceleração positiva a este. Após este momento segue-se um movimento correspondente a uma tentativa do experimentador de equilibrar e parar o corpo definitivamente. Nesta tentativa dissipa-se toda a energia cinética que ainda resta para a bola de bilhar. Situação semelhante ocorre em monitoramentos feitos através de acelerômetros para impactos de bolas de baseball em uma superfície de borracha ([http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/app\\_note/AN1635.pdf?WT\\_TYPE=Application%20Notes&WT\\_VENDOR=FREESCALE&WT\\_FILE\\_FORMAT=pdf&WT\\_ASSET=Documentation](http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/app_note/AN1635.pdf?WT_TYPE=Application%20Notes&WT_VENDOR=FREESCALE&WT_FILE_FORMAT=pdf&WT_ASSET=Documentation)).

Uma prática simples de queda dos corpos pode revelar ao aluno não apenas uma boa estimativa do valor numérico da aceleração da gravidade local, mas também conceitos envolvidos numa colisão inelástica e dissipação de energia mecânica em todo o final do processo monitorado. Devido ao curto espaço de tempo decorrido desde o momento que o corpo foi solto e o momento em que o corpo chocou-se com a mão do experimentador, não foi possível registrar diminuição significativa da aceleração resultante no eixo vertical em relação ao valor médio da aceleração da gravidade. O valor de decréscimo esperado para a aceleração medida é menor que a magnitude da soma das imprecisões envolvidas nesta prática. Para efetivamente notarmos a diminuição da aceleração vertical devido à ação da força de viscosidade seria necessário maior tempo de “vôo” e/ou aumentar significativamente a área de seção reta de enfrentamento do fluido pelo corpo, na direção do vetor velocidade. Deixamos ao leitor este desafio de medida.

Neste momento é importante ressaltar o papel didático de uma medida precisa e com grande quantidade de dados coletados. Conforme Veit e Teodoro discutem, em seu trabalho sobre o papel da modelagem no processo de ensino/aprendizagem de física [12]:

*“A Ciência é um processo de representação do Mundo, sempre sujeito à reformulação. A linguagem matemática desempenha um papel fundamental nesta representação, que não pode ser confundida com explicação. Na realidade, o discurso científico tem mais a ver com representações do que com explicações”.*

Esta modelagem deve ser percebida pelo estudante, não apenas enquanto modelo que serve para a descrição da realidade, mas também para avaliar o quão fidedigno é este modelo. Considerando, especificamente o movimento de queda, o que podemos discutir sobre realidade, modelagem e os resultados obtidos com o acelerômetro? Veja o esquema na Fig. 8.

A modelagem apresentada pelo acelerômetro deixa evidências de que o assunto discutido em uma classe de educação básica ou em primeiros níveis do ensino superior é

apenas um modelo teórico, entretanto, os resultados obtidos com o acelerômetro também mostram que a diferença dos resultados quantitativos entre a realidade e a modelagem é muito pequena. Esta relação é de extrema importância para o aluno.

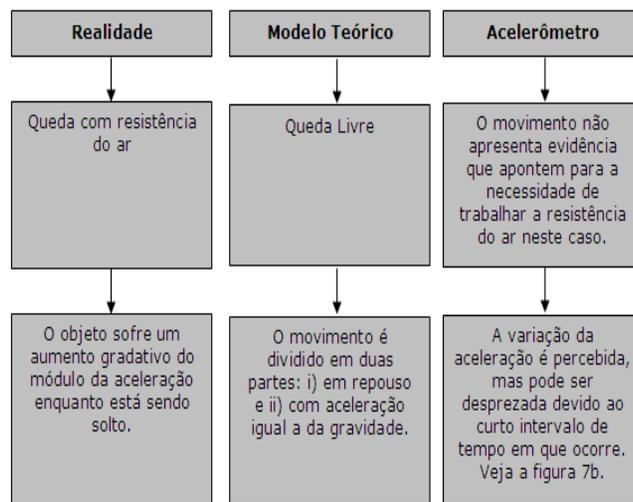


FIGURA 8. Quadro comparativo entre o movimento real de queda, o modelo teórico usualmente lecionado na educação básica e a resposta do acelerômetro.

## B. Movimento Harmônico Amortecido

A segunda aplicação para o acelerômetro que mostraremos neste trabalho foi através de um Movimento Harmônico Amortecido (*M. H. A.*) sujeito ao trabalho da força gravitacional.

O *M. H. A.* é um movimento oscilatório que admite a presença de uma força dissipativa além da(s) força(s) conservativa(s) existente(s). Neste caso, o sistema como um todo não é mais conservativo e a amplitude de oscilação tende a decrescer gradualmente enquanto a energia mecânica total do sistema se transforma predominantemente em energia térmica. Na prática todos os movimentos oscilatórios macroscópicos contêm forças dissipativas que promovem amortecimento em maior ou menor grau dependendo do coeficiente de atrito e/ou de viscosidade de um fluido.

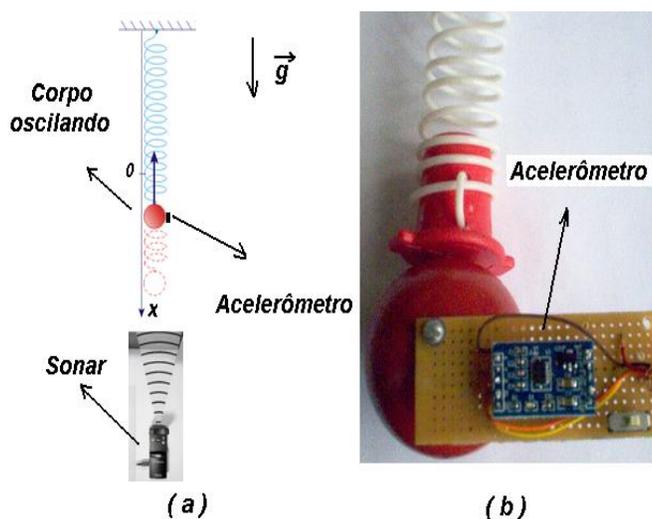
O movimento foi executado por uma bola de bilhar presa a uma mola feita de material plástico (tipo “mola espiral de caderno escolar”), com 2,8 cm de diâmetro e 21 cm de comprimento total quando posta na vertical sujeita apenas ao próprio peso. O diâmetro do fio plástico que compõe os elos da mola era de 2,5 mm e a mola inteira possuía um total de 26 elos. A constante elástica da mola foi determinada experimentalmente como  $(7,740 \pm 0,001)$  N/m e a massa do conjunto (bola de bilhar e placa com sensor) tem valor de 125 gramas.

Utilizamos nosso sensor rigidamente preso através de um parafuso ao corpo que oscilava na vertical. Todas as medições foram feitas na temperatura ambiente de 25°C. Desta vez escolhemos o eixo x do acelerômetro para posicionarmos na direção do vetor aceleração da gravidade.

Fábio Saraiva da Rocha, Guilherme Frederico Marranghello

Mais uma vez, através do monitoramento dos eixos (y e z), que estão perpendiculares à direção do movimento, constatamos apenas a presença de ruído cujas causas discutiremos em seguida. Nesta experiência, utilizamos também o sensor sonar *Go Motion*

([www.vernier.com/products/sensors/motion-detectors/go-mot](http://www.vernier.com/products/sensors/motion-detectors/go-mot)). Este sensor foi colocado na experiência justamente como parâmetro de comparação e validação para as nossas medidas. O sonar que trabalha emitindo e detectando ondas mecânicas na frequência de ultrassom de 50 kHz, mediu a posição e tempo do corpo oscilante numa taxa de leitura de 20 Hz. O sonar foi estrategicamente posicionado ao longo do eixo onde transcorre o movimento (eixo vertical). No início do monitoramento, a bola de bilhar foi solta a partir do repouso. A Fig. 9a apresenta um desenho com a disposição dos equipamentos de medida e o sistema mecânico composto pela bola de bilhar com o sensor e a mola plástica. A Fig. 9b apresenta uma foto que mostra de perto o acelerômetro fixado na bola e a bola presa na mola.

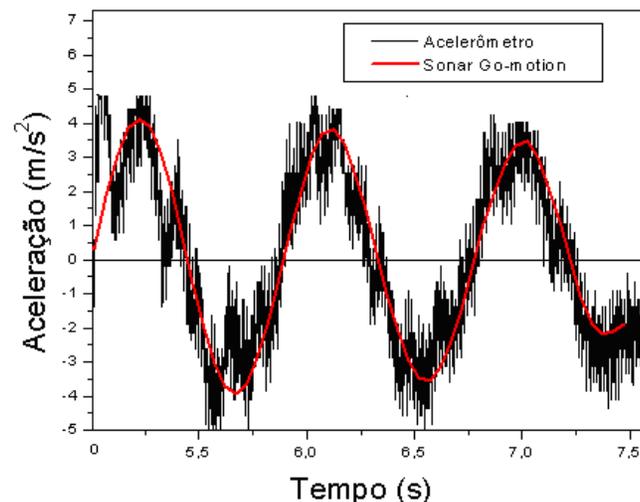


**FIGURA 9.** Em (a) conjunto composto de equipamentos de medida e o sistema mecânico que foi posto a oscilar. Em (b) vemos em detalhe a placa auxiliar presa na bola de bilhar e este conjunto preso na mola plástica.

Os dados de aceleração que foram obtidos pelo uso do sonar são encontrados a partir de um cálculo numérico utilizando os dados de posição e tempo enviados pelo sonar para o Programa *Logger Pro 3.6.1.* ([www.vernier.com/products/software/lp/](http://www.vernier.com/products/software/lp/)) Os dados de aceleração medidos com o nosso acelerômetro foram coletados pelo osciloscópio numa taxa de 11 kHz. Essa taxa pode ser controlada através do programa *Visual Analyser.*

O acelerômetro é um dispositivo muito sensível a vibrações mecânicas em uma ampla faixa de frequências. A Fig. 10 mostra o resultado do sinal elétrico de saída do eixo x já transformado em aceleração e sem filtro de frequência algum. Está destacada a medida de aceleração feita concomitantemente com o sonar. É possível observar o ruído mecânico que acompanha a medida. Isso é, enquanto o corpo oscila na vertical, o acelerômetro mede a frequência de oscilação do movimento amortecido e junto mede variações

da aceleração ocorridas a partir de deslocamentos mecânicos (ruído mecânico) em frequências bem mais altas. Os sinais de vibração consistem normalmente de muitas frequências que ocorrem simultaneamente, e assim, não se pode notá-las diretamente nas respostas de amplitude do sinal com relação ao tempo, nem determinar quantos componentes de vibração existem numa simples inspeção visual. Escolhemos apresentar a medida afetada por ruído para motivar uma breve discussão a cerca deste inconveniente ingrediente que muitas vezes está marcadamente presente no processo de medição e que merece a devida atenção. Desde que tratada, a medida ruidosa pode revelar a informação que procuramos em nossas medições.

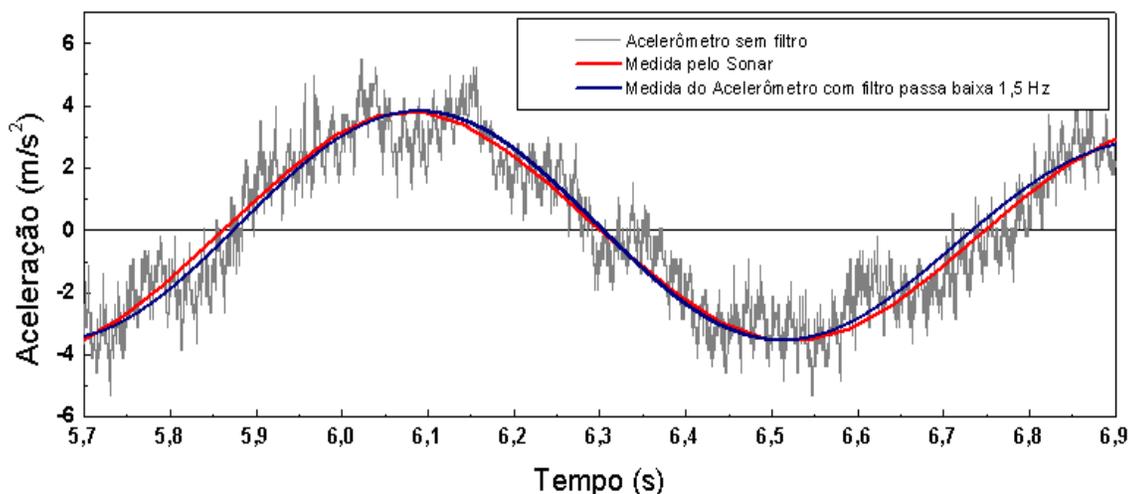


**FIGURA 10.** Gráfico de variação da aceleração ocorrida com a bola de bilhar enquanto descreve um movimento amortecido na vertical. Junto estão os dados medidos com o sensor sonar para comparação.

A Fig. 10 mostra uma janela de tempo decorrido do movimento e a amplitude de aceleração da bola de bilhar decrescendo com a evolução temporal (assinatura de um sistema mecânico dissipativo). A partir dos dados do gráfico da Fig. 10, é possível aplicar um filtro passa baixa de frequências com o limite de corte em 1,5 Hz para limpar o sinal. Este valor é ligeiramente superior ao valor estimado para a frequência de oscilação do sistema oscilatório não amortecido de 1,253 Hz. Esse filtro foi aplicado sobre o sinal com o uso do programa *Origin 6.0*, o resultado está mostrado na Fig. 11. Importante ressaltar que existem outras ferramentas de tratamento numérico como Análise de Fourier, Análise por Primeiros Vizinhos e outros que também podem ser úteis como filtros matemáticos.

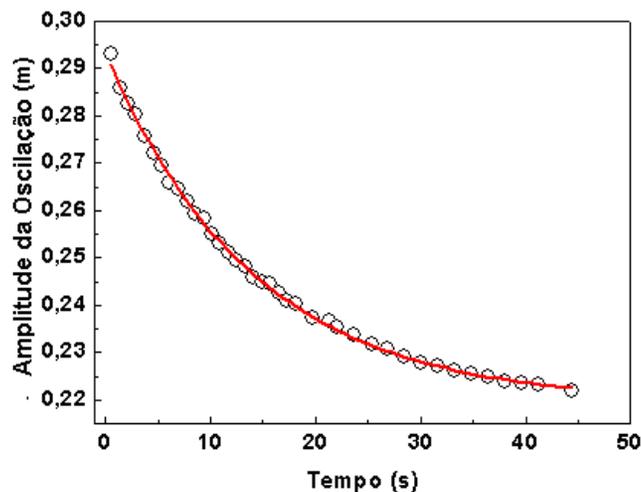
Destacamos que na internet existem programas gratuitos que são capazes de realizar esta tarefa de tratar o sinal elétrico medido experimentalmente (dado bruto) usando um filtro passa baixa.

Um dos principais usos de um acelerômetro eletrônico está na análise de frequências de vibração de máquinas em geral. Através de tal análise pode-se inferir muito sobre o estado geral de desgaste de equipamentos mecânicos.



**FIGURA 11.** Gráfico comparativo entre o dado bruto medido de saída do acelerômetro e a curva da variação da aceleração ocorrida com a bola de bilhar depois de filtradas as frequências acima de 1,5Hz. Depois de tratada numericamente restou apenas a variação decorrente do movimento amortecido. Os dados medidos através do sonar estão presentes para fins de comparação.

Pelos valores apresentados no gráfico da Fig. 11 podemos obter a frequência medida pelo sonar que foi de 1,251 Hz. O valor medido através do acelerômetro foi de 1,250 Hz. Estes valores experimentais desviam entre si em aproximadamente 0,08%, dentro da faixa de medida que foi executada. Em relação ao valor esperado teoricamente para o sistema não amortecido vemos um desvio de aproximadamente 0,2% para menos. O resultado medido já era esperado, pois na presença da força de viscosidade do ar o sistema oscilatório *subamortecido* tende a decrescer a sua frequência de oscilação.



**FIGURA 12** – Decaimento da amplitude de oscilação do movimento amortecido.

Em relação aos valores máximos de aceleração encontrados durante a prática nunca obtivemos discrepância maior que 0,5% na comparação entre os valores apresentados pelo sonar e os valores medidos pelo acelerômetro depois de devidamente filtrados.

Com o andamento da experiência, ciclo a ciclo, o

decréscimo da amplitude de aceleração e, por conseguinte, da amplitude de movimento foi notado num comportamento exponencial com o tempo, veja a Fig. 12. Utilizando a função exponencial de ajuste para a *amplitude da oscilação*,  $Y(t)$ :

$$Y(t) = Ae^{-\left(\frac{b}{2m}\right)t} \tag{1}$$

onde  $A$  é a amplitude máxima do oscilador,  $b$  é a constante de amortecimento e  $m$  é a massa total do oscilador, através do ajuste da função aos pontos experimentais é possível encontrar o valor de  $b$  como sendo 0,018 kg/s.

O conjunto de medida foi posto a oscilar com a mola plástica fixa a um suporte metálico rígido preso sobre um tripé que estava apoiado em uma mesa. Acreditamos que uma fonte de ruído mecânico presente nas medidas feitas com o acelerômetro e mostradas aqui seja decorrente de vibrações mecânicas que ocorrem em altas frequências (tipicamente de algumas centenas de Hz) presentes no suporte mecânico no momento da medida. Uma alternativa apontada para ser a fonte colaborativa na vibração mecânica é o próprio computador (disco rígido, cooler, etc...) que utilizamos nas medidas e que estava sobre a mesa da experiência durante a execução do movimento. Uma forma de contornar o problema, para as próximas experiências, será colocar o suporte rígido sobre uma base feita de areia fina para amortecer quaisquer vibrações mecânicas espúrias externas ao sistema durante a medida.

No uso dos acelerômetros o leitor também pode enfrentar problemas com os ruídos elétricos oriundos dos fios de ligação. As perturbações podem resultar de laços de terra, ruídos por movimentação do próprio fio (originados nas oscilações de capacitância elétrica e nas alterações de carga elétrica devidas a trabalho mecânico ocorrido no fio). Este problema pode ser contornado utilizando um fio de acelerômetro grafitado, prendendo-o rigidamente junto ao corpo do dispositivo. Também é importante considerar o

ruído de origem eletromagnética provocado pelo cabo do acelerômetro que pode servir como antena. Um cabo blindado ajuda na supressão deste tipo de ruído. Outros fatores como a presença de campo magnético, umidade ou radiação nuclear também podem influenciar nas medidas.

Outro problema que podemos enfrentar quando estamos medindo em frequências elevadas, é a frequência de ressonância do sistema oscilatório do próprio acelerômetro, no nosso caso tipicamente da ordem de alguns kHz. Neste caso, o resultado de medida deve ser entendido levando-se em consideração a ressonância. O mercado de eletrônica oferece uma vasta gama de diferentes dispositivos que medem aceleração e a escolha certa vai eliminar diversos inconvenientes na hora de tratar os resultados.

## V. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou características básicas de constituição física e funcionamento de um sensor de aceleração eletrônico.

Mostramos possibilidades de uso deste tipo dispositivo em práticas de ensino de mecânica pela via experimental. As práticas propostas podem ser implementadas mesmo em laboratórios modestos de ensino de física. As características do acelerômetro podem ser aproveitadas tanto com a finalidade de inovar e incrementar práticas de laboratório como quanto para incentivar alunos a trabalhar em projetos que envolvam conceitos de mais de uma área de conhecimento, neste caso, Física, Eletrônica e Computação.

Ao trabalhar em projetos desta natureza, o aluno pode avançar em seus conhecimentos de tratamento de sinais elétricos obtidos dos dispositivos sensores, no manuseio de instrumentos de bancada propostos para a leitura destes sinais e nos limites de validade da informação numérica experimental. Claro que o projeto sempre deve estar adequado ao nível de escolaridade pertinente, seja ela na educação básica, técnica ou superior.

Pode-se aproveitar os acelerômetros para medir não só acelerações, mas também inclinação, rotação, vibração, colisão e propriedades do campo gravitacional, constituindo assim um dispositivo de grande utilidade para projetos de toda a ordem.

Leitores mais interessados no tema acelerômetros vão encontrar na literatura pertinente um farto material à disposição, desde a discussão dos princípios fundamentais de funcionamento até uma vasta gama de aplicações em ciência básica experimental e tecnologia.

## REFERÊNCIAS

- [1] Hodson, D., *Hacia un enfoque más crítico del trabajo de laboratorio*. Enseñanza de las Ciencias, Barcelona **12**, 299–313 (1994).
- [2] Gil-Pérez, D., Furió, M. C. P. V., Salinas, J., Martínez-Torregrosa, J., Guisasola, J., Gonzales, E., Dumas-Carré, A., Goffard, M., Pessoa, A. M. C., *¿Tiene sentido seguir distinguiendo entre aprendizaje de conceptos, resolución de problemas de lápiz y papel y realización de prácticas de laboratorio?* Enseñanza de las Ciencias, Barcelona **12**, 311–320 (1999).
- [3] Borges, A. T., *Novos Rumos para o Laboratório Escolar de Ciências*, Caderno Brasileiro de Ensino de Física **19**, 291–313 (2002).
- [4] Gaspar, A., *Experimentação em Ciências – Abordagem Crítica e Propostas, Experiência de Ciências para o Ensino Fundamental*, 1ª edição, (Ática, Brasil, 2005), pp. 11-30.
- [5] Araujo, I. S. e Veit, E. A., *Interatividade em recursos computacionais aplicados ao ensino aprendizagem de Física*. In: Gonçalves, R. de A.; Oliveira, J. S. de; Rivas, M. A. C. (Orgs.). *A Educação na Sociedade dos Meios Virtuais*, (Centro Universitário Franciscano, Santa Maria, 2009), pp. 129–140.
- [6] D’Ambrósio, U., *Novos paradigmas de atuação e formação de docente*. In: Porto, Tânia (org.). *Redes em construção: meios de comunicação e práticas educativas*, (JM, São Paulo, 2003), pp. 55–77.
- [7] Dorneles, P. F. T., *Integração entre atividades computacionais e experimentais como recurso instrucional no ensino de eletromagnetismo em Física Geral*. 2010. 367 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, (2010).
- [8] Rocha, F. S. e Guadagnini, P. H., *Sensor Sonar de Movimento para Ensino de Física Experimental*, Latin-American Journal of Physics Education **4**, 306–315 (2010).
- [9] Guadagnini, P. H. e Barlette, V. E., *Um termômetro eletrônico de leitura direta com termistor*, Revista Brasileira de Ensino de Física **27**, 369-375 (2005).
- [10] Guadagnini, P. H.; Rocha, F. S., Barlette, V. E., *Projeto de um sensor eletrônico baseado em extensometria para medição de força*, Latin-American Journal of Physics Education **5**, 753–762 (2011).
- [11] Rocha, F. S. da, Fajardo, F., Grisolia, M., Benegas, J., Tchitnga, R., Laws, P., *Using “Student Technology” in Introductory Physics: A Comparison of Three Tools to Study Falling Objects*, The Physics Teacher **49**, 165–167 (2011).
- [12] Veit, E. A. e Teodoro, V. D., *Modelagem no Ensino/Aprendizagem de Física e os Novos Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio*, Revista Brasileira de Ensino de Física **24**, 87–96 (2002).