

PÊNDULO DE WILBERFORCE: UMA PROPOSTA DE MONTAGEM PARA AMBIENTES EDUCATIVOS INFORMAIS E LABORATÓRIOS DIDÁTICOS⁺*

Osmar Henrique Moura da Silva

Sérgio de Mello Arruda

Departamento de Física e Museu de Ciência e Tecnologia – UEL

Carlos Eduardo Laburú

Departamento de Física – UEL

Eliana Aparecida Silicz Bueno

Departamento de Química e Museu de Ciência e Tecnologia – UEL

Londrina – PR

Resumo

O pêndulo de Wilberforce é um conhecido experimento para demonstrar oscilações acopladas comumente restritas aos modos longitudinal e rotacional de um sistema massa-mola, sendo interessante para o estudo do princípio de conservação da energia. Dentro dessa finalidade, há muita divulgação sobre como educacionalmente discuti-lo nos níveis básico e universitário de ensino. Aos envolvidos com os ambientes educativos informais, como Museus de Ciência e Tecnologia (MCTs), este trabalho apresenta uma proposta de montagem desse experimento, inserindo uma automação inovadora que permite aos próprios visitantes realizarem uma demonstração dentro da perspectiva lúdica que esses lugares anseiam. Laboratórios didáticos e interessados em geral podem também se beneficiar desta elaboração.

⁺ Wilberforce Pendulum: an assembly proposal for informal educational environments and teaching laboratories

^{*} *Recebido: fevereiro de 2013.
Aceito: abril de 2013.*

Palavras-chave: *Experimento. Pêndulo de Wilberforce. Museu de Ciência e Tecnologia.*

Abstract

The Wilberforce Pendulum is a well-known experiment used to demonstrate coupled oscillations commonly restricted to longitudinal and rotational modes of a mass-spring system. It is interesting for the study of the principle of conservation of energy. For this purpose, there is a lot said on how to discuss this at Basic Levels and University Education. For those involved in informal educational environments, such as Museums of Science and Technology (MCT), this paper presents a proposal for setting up this experiment by inserting an innovative automation that allows the visitors themselves to perform a demonstration from a playful perspective that these places wish for. Teaching laboratories and people interested in these topics in general can also benefit from this development.

Keywords: *Experiment. Wilberforce Pendulum. Museum of Science and Technology.*

I. Introdução

O pêndulo de Wilberforce, assim batizado após o estudo de Lionel Robert Wilberforce (WILBERFORCE, 1894), é um experimento constituído de uma massa com momento de inércia ajustável unida a uma mola helicoidal. Se obtido o ajuste para que as frequências de oscilação nos modos longitudinal e rotacional se igualem, um pequeno puxão vertical da massa, retirando-a de seu ponto de equilíbrio e soltando-a em seguida, permitirá a observação de um lento e fascinante fenômeno de transferência gradativa e alternante de energia entre esses modos oscilantes. Educacionalmente, em 1938 Sutton (apud BERG; MARSHALL, 1991, p. 32) já discutia este dispositivo como uma demonstração da transferência de energia interessante à disciplina de Física e relacionadas descrições matemáticas aprofundadas encontram-se acumuladas na literatura (WILBERFORCE, 1894; KÖPF, 1990; BERG; MARSHALL, 1991; PLAVČIĆ *et al.*, 2009) para um proveito nesse sentido.

Estudos como o de Freier e Anderson (1981) destacaram a possibilidade de se obter um terceiro modo oscilante no dispositivo, o pendular, que apesar do difícil alcance na prática, divulgaram uma análise do fenômeno ressonante deste modo com uma frequência na metade da dos demais. Pouco depois, Williams e Keil (1983) explicaram como um pêndulo de Wilberforce pode ser fabricado a partir de um simples arame de mola e apresentaram algumas observações a respeito daquele que eles próprios construíram. Nesse sentido, Ehrlich (1990) chegou a propor o uso de argila para ajustar o momento de inércia da massa do pêndulo e obter a demonstração desejada. Esses trabalhos contribuíram para que o experimento em foco pudesse ser confeccionado a partir de certas ferramentas e materiais alternativos, com a intenção de proporcionar ao professor interessado demonstrá-lo em classe. Entretanto, segundo Galiazzi *et al.* (2001, p. 250), apesar do reconhecimento entre profissionais da educação científica quanto a relevância das atividades práticas de laboratório e seu longo histórico centenário de esforço de implantação nas escolas, a vivência escolar brasileira revela que elas pouco ocorrem, a despeito da crença dos professores acerca do seu potencial de transformação do ensino de ciências. Professores justificam uma resistência nesse sentido devido ao tempo gasto na preparação da atividade experimental que, ainda se elaborada a partir de materiais de baixo custo, exige habilidades mínimas para arquitetar uma almejada demonstração que substitua as de kits comercializados, estatisticamente em 2003 avaliados em falta pelo INEP¹ nas escolas de nível básico. Museus de Ciência e Tecnologia (MCTs) procuram sanar esse problema. Aos envolvidos com a educação nesses ambientes, o presente trabalho divulga a elaboração de um pêndulo de Wilberforce que opera nos dois modos convencionais de oscilação mencionados. Esta proposta, inserida numa linha de publicações (SILVA; LABURÚ, 2009; SILVA *et al.*, 2012; SILVA *et al.*, 2013) com contribuições baseadas no desenvolvimento de equipamentos destinados a MCTs, é abaixo justificada.

Em tempos atuais, o uso de tecnologia digital (câmaras de vídeo, programas computacionais, sensores diversos, etc.) tem sido defendido como subsídio educacional no estudo mais minucioso dos fenômenos naturais e uma variedade de trabalhos (GRECZYŁO, 2001; DEBOWSKA *et al.*, 1999; GRECZYŁO; DEBOWSKA, 2002; TORZO; D'ANNA, 2003) indicam como averiguar, por esses métodos, as equações de movimento de um pêndulo de Wilberforce. Fabricantes têm aprimorado pêndulos de Wilberforce com esses recursos tecnológicos modernos que, juntamente a um manual descrevendo atividades práticas mais direciona-

¹ INEP (2003).

das a alunos de graduação², comercializam o aparato experimental a um custo considerável que dificulta sua exploração no nível básico de ensino. Em termos qualitativos, a típica saída está nas sugestões de montagem desse pêndulo encontradas na *internet*³, onde há sites que inclusive propiciam simulações da demonstração *online*⁴ ou um programa para isso⁵. Todavia, tais sugestões estão bem apropriadas àqueles previamente empenhados em demonstrá-lo (educadores, estudantes ou estagiários) e não se adequam às situações dos MCTs, nos quais os mais variados visitantes são destinados eles próprios a livremente experimentarem o que lá se encontra preparado dentro de uma perspectiva de entretenimento (CAZELLI *apud* CONSTANTIN, 2001, p. 197; VALENÇA, 2006, p. 333; CHELINI; LOPES, 2008, p. 228 e 235). Isso porque a experiência é perfeitamente alcançada efetuando-se um pequeno e limitado alongamento da mola ao se puxar verticalmente para baixo a massa de sua extremidade, que ao ser solta inicia a demonstração; neste caso, com prolongada duração do fenômeno que precisa ser apreciado. Por conseguinte, o procedimento cuidadoso unido ao respeito com o tempo após o funcionamento são detalhes que forçam uma adequação deste comum acionamento do experimento⁶ às condições educativas informais que aqui se atenta, implicando duas preocupações⁷: 1) individualmente, qualquer experimentador deve obter sucesso na demonstração; 2) o equipamento deve encontrar-se protegido de danos previsivelmente causados por manipulação indevida em função do livre acesso de visitantes no dia-a-dia⁸. Dessas preocupações, a proposta de montagem do pêndulo de Wilberforce do presente trabalho insere uma automatização inovadora, permitindo a qualquer um realizar a demonstração de forma lúdica, segura e fácil. Labo-

² Ex.: <<ftp://ftp.pasco.com/Support/Documents/English/ME/ME-8091/012-08397a.pdf>>.

³ Ex.: <http://www.feiradeciencias.com.br/sala05/05_52.asp>

⁴ Ex.: <<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/oscilaciones/wilberforce/wilberforce.htm>>.

⁵ Ex.: <<http://www.compadre.org/OSP/items/detail.cfm?ID=7569>>.

⁶ Que mais se adapta a um demonstrador.

⁷ Além de uma terceira mais geral que é a preocupação com acidentes, relacionada à completa segurança de um visitante ao experimentar determinado equipamento.

⁸ Como exemplo de possíveis danos causados por manipulações indevidas podemos citar, entre outros, a deformação da mola helicoidal (quando esticada em excesso) e a alteração da frequência rotacional nos “braços” laterais da massa.

ratórios didáticos e interessados em geral também podem se beneficiar desta elaboração.

II. Materiais utilizados e construção

De acordo com o objetivo do trabalho, esta seção encarrega-se da elaboração do referido pêndulo de Wilberforce. Considerando a variedade dos itens sugeridos e dos detalhes procedimentais, busca-se facilitar o esclarecimento nesse sentido com separadas subseções assim especificadas: O pêndulo de Wilberforce; O eletroímã; O circuito de controle automático; A montagem final. Pela importância de o equipamento estar acompanhado de instruções e informações (as mais amigáveis e precisas possíveis ao público leigo), nesta última subseção também se fornecem algumas orientações de como acionar o equipamento, do que observar, e de conceitos físicos envolvidos, servindo estas de guia aos interessados na elaboração de um texto explicativo que se pode vincular no equipamento.

II. 1 O pêndulo de Wilberforce

Pêndulos de Wilberforce podem diferenciar-se mais no formato adotado da massa, fixada na extremidade inferior de uma mola, e na quantidade (e/ou posição) de hastes laterais, por onde se movimentam pequenas massas ao necessário ajuste de seu momento de inércia. Direciona-se aqui a montagem de um pêndulo cuja massa é de ferro, cilíndrica e com duas hastes. Para isso, os materiais necessários são: 1 mola helicoidal de aço com cerca de 70 espiras de diâmetro iguais a 3cm; 1 cilindro maciço de ferro de 3cm de comprimento e 2,5cm de diâmetro; 2 discos de alumínio com 6cm de diâmetro e 2,5mm de espessura; 1 parafuso de rosca sem fim de latão com cerca de 10cm e 4mm de diâmetro; 1 pedaço de arame de 1,5mm de diâmetro (pode-se usar clips); 1 pequeno cilindro de PVC (ou acrílico) de 1cm de comprimento e 5mm de diâmetro.

Inicialmente realiza-se um furo de 1cm centralizado ao longo do eixo do cilindro de ferro para encaixe do arame (ver ampliação na Fig. 1), fixado ali com cola líquida instantânea. Uma parte que sobrou deste arame é enrolada de forma justa na metade do parafuso em posição perpendicular ao cilindro (isto é, estando o parafuso em posição horizontal relativa ao observador), em que a extremidade restante deste arame é então afixada no pequeno cilindro de PVC, seguindo o esquema da Fig. 1.

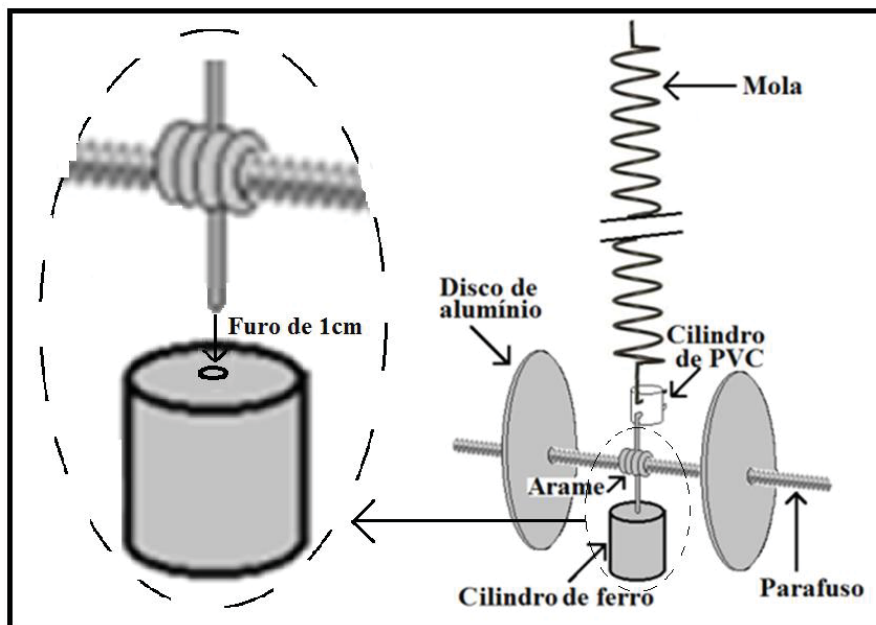


Fig. 1 – Pêndulo de Wilberforce.

Neste cilindro de PVC também se fixa uma extremidade da mola⁹. Os discos de alumínio possuem furos centrais com roscas para o parafuso que então constitui um travessão por onde eles percorrem num ajuste de suas posições para obtenção do fenômeno de batimento.

O batimento entre os modos oscilantes, longitudinal e rotacional, pode ser alcançado de uma maneira bem prática. Primeiramente, deve-se medir a frequência de oscilação longitudinal do pêndulo, pondo-o a oscilar na vertical. Depois, com uma leve torção da massa, soltando-a em seguida, medir a frequência de oscilação rotacional. Como é raro deparar-se logo no começo com uma “igualdade” das frequências (o que já finalizaria esta etapa da montagem), o valor da frequência de oscilação longitudinal é estabelecido como referência, visando equiparar a este valor o da frequência de oscilação rotacional. Para isso, girar paulatinamente os discos aproximando-os ou afastando-os com simetria ao centro na medida em que se acompanham as alterações do valor da frequência desse modo oscilante em

⁹ Pela Fig. 1, nota-se que o arame e a extremidade da mola são encaixados transversalmente no cilindro de PVC.

direção àquela do modo longitudinal. Nesse ajuste, é fácil notar que o fenômeno do batimento começa a surgir, e vai se evidenciando ainda mais, quanto mais próximas estiverem as frequências¹⁰. Conclui-se esta etapa da montagem ao testar o pêndulo com um pequeno puxão manual, pondo-o inicialmente a oscilar na vertical, e verificar a ocorrência de uma gradativa transferência de energia entre os dois modos oscilantes com um pequeno intervalo de tempo em que atua ora num modo ora noutro.

II. 2 O eletroímã

Os comentários até agora envolveram o funcionamento do experimento feito manualmente. Para substituir o puxão manual, a ideia é acrescentar um eletroímã que deve encontrar-se a uma determinada distância abaixo da massa de ferro cilíndrica do pêndulo, já aprontado para esta etapa. A distância é de poucos centímetros e é particularmente estabelecida pelo valor medido experimentalmente do restrito puxão manual que se verificou fazer à boa demonstração do fenômeno. Assim, pretende-se que o eletroímã ligado mova a massa de ferro a esse limite estabelecido.

Os materiais necessários à montagem do eletroímã são: lâminas de ferro doce de (2x7)cm (obtidas em transformadores queimados) e fio de cobre esmaltado número 22 AWG. As lâminas devem ser envernizadas e ajuntadas formando um núcleo com dimensão próxima de (2x2x7)cm. Diretamente nesse núcleo, um enrolamento com várias camadas totaliza cerca de 800 espiras do fio de cobre. A Fig. 2 ilustra esta simples montagem.

Esse eletroímã, quando alimentado com 127V, gera um campo magnético capaz de atrair a massa de ferro cilíndrica do pêndulo à posição desejada, mais bem detalhada na subseção da montagem final. Aliás, embora as especificações fornecidas de seu enrolamento o impeçam de ficar continuamente ligado nessa tensão padrão devido ao aquecimento, o eletroímã torna-se viável pela automatização discutida a seguir.

¹⁰ Quanto mais próximas estiverem as frequências desses modos, mais lenta e fascinante será a alternância entre eles.

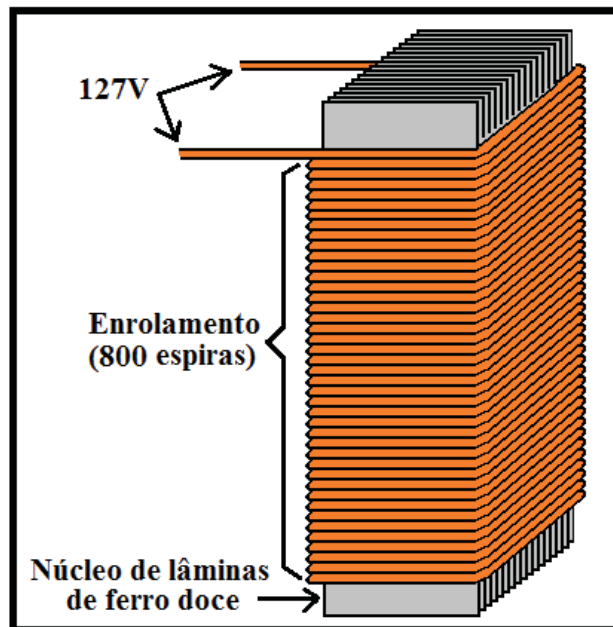


Fig. 2 – Eletroímã montado.

II. 3 O circuito de controle automático

De acordo com a finalidade do eletroímã, vale considerar que ele somente necessita ser acionado durante um curto intervalo de tempo, equivalente ao do apurado deslocamento que então realiza da massa do pêndulo para iniciar uma demonstração. Nessa subseção, um circuito eletrônico é apresentado para o controle do funcionamento desse eletroímã, na medida em que se estipula esse tempo de atração. Esta automatização aciona o eletroímã pelo simples apertado de um botão, desligando-o no tempo programado. Além disso, pensando na hipótese de um experimentador ‘indiscreto’ ficar seguidamente apertando o botão, o que prejudicaria a demonstração do fenômeno de batimento por acionamentos repentinos do eletroímã, o circuito eletrônico aqui elaborado permite um ajuste que impede um segundo acionamento enquanto a demonstração estiver ocorrendo. Desse modo, devido o tempo do eletroímã ligado ser relativamente pequeno ao tempo de espera de um novo acionamento, a automatização também evita que ele sofra um aquecimento elevado.

Os componentes necessários ao circuito de controle automático são: 1 chapa para circuito impresso de (7x12)cm; 1 botão push-button (tipo NA); 1 resistor de 100K Ω ; 1 capacitor de 10nF (16V); 1 CI 4013; 1 resistor de 330K Ω ; 1 capacitor de 2,2 μ F (16V); 2 CI 555; 1 resistor de 10K Ω ; 1 transistor BC 548; 1 resistor de 1,5M Ω ; 1 capacitor de 100 μ F (16V); 1 relé de 12V; 1 CI 7812; 1 capacitor de 1000 μ F (16V); 2 diodos IN 4007; 1 transformador 127V para 12V (0,5A); 1 chave liga-desliga; 1 fio duplo com macho para ligação na tomada. A Fig. 3 mostra o esquema elétrico para se desenhá-lo na chapa de circuito impresso com caneta apropriada.

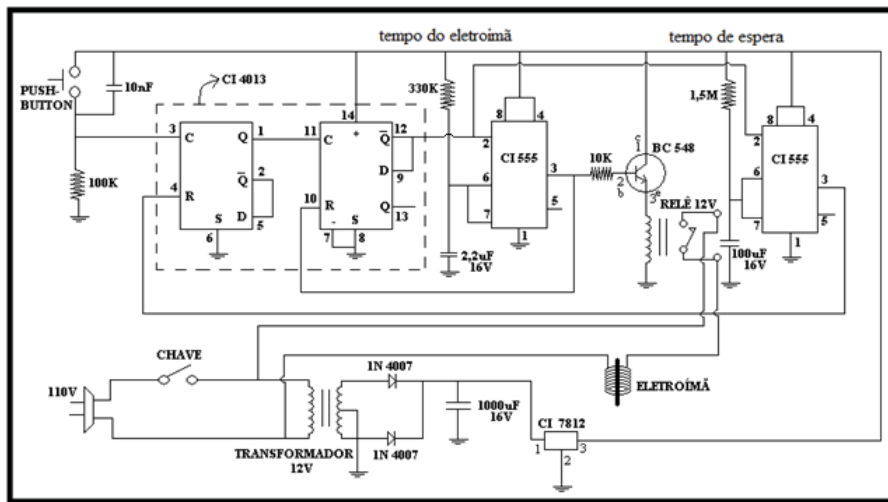


Fig. 3– Esquema elétrico do circuito de controle automático ¹¹.

Realizado esse desenho e com os devidos furos para encaixe dos componentes, mergulha-se a chapa em solução de percloroeto de ferro para remoção do cobre de sua superfície que não está marcado pela tinta da caneta (trilhas desenhadas). Depois, retira-se a tinta das trilhas desenhadas nessa superfície lixando-a com

¹¹ Desenvolvimento alcançado por ideias em Saber Eletrônica: <<http://www.sabereletronica.com.br/secoes/leitura/1595>>.

lã de aço. Encaixam-se e soldam-se os componentes nos furos das trilhas¹². Assim finalizada a montagem desse dispositivo eletrônico, as ligações dele com o eletroímã mais uma chave liga-desliga (opcional) estão mostradas na Fig. 3. O dispositivo pode ficar continuamente conectado na tomada (127V) e está destinado a ligar o eletroímã no aperto do botão, prosseguindo com um desligamento automático do mesmo.

Pelo esquema elétrico (Fig. 3), o intervalo de tempo do eletroímã pode ser determinado ao se alterar o resistor de $330\text{K}\Omega$ ¹³, trocando-o por um resistor variável (*trimpot*) em cuja escala este valor sugerido é intermediário. O mesmo procedimento pode ser feito para o tempo de espera a um novo acionamento (tempo em que ocorre a demonstração). Neste último caso, o intervalo de tempo é ajustado conforme o valor do resistor. No esquema elétrico, esse resistor é de $1,5\text{M}\Omega$ e está adequado ao tempo da demonstração dos pêndulos desenvolvidos exemplificados na Fig. 6.

II. 4 A montagem final

Uma caixa de acrílico (ou de madeira com a parte frontal de vidro) com dimensões próximas de (70x17x17)cm, chapa de 1cm de espessura, deve ser aprontada para que nela sejam interiorizados os elementos já preparados, quais sejam: o pêndulo de Wilberforce; o eletroímã; e o circuito de controle automático. Com a caixa em posição vertical, a terminação da mola do pêndulo é fixada no centro do lado superior. Assim pendurado, acrescenta-se uma divisória (chapa de acrílico de 1cm de espessura) na distância equivalente ao máximo deslocamento vertical do pêndulo quando se inicia a demonstração. No meio dessa divisória, faz-se um furo quadrado para adaptar a extremidade do núcleo do eletroímã, ali colado com adesivo epóxi. A parte da caixa abaixo da divisória pode ser pintada para esconder o eletroímã e o circuito eletrônico, sobressaindo apenas o botão de acionamento na parte frontal¹⁴. Na parte inferior da caixa ou atrás dela, realiza-se um

¹² Esse método mais tradicional pode ser substituído partindo-se de uma placa de circuito impresso perfurada (pré-furada) de 160x100 mm onde se encaixam os componentes citados, realizando as ligações com fios tipo cabinho e solda estanho.

¹³ Nessa finalidade pode-se também manter o resistor de $330\text{K}\Omega$ e trocar o capacitor de $2,2\mu\text{F}$ por um capacitor variável.

¹⁴ Isto é apenas uma sugestão. Um(a) dos(as) pareceristas deste trabalho indicou a necessidade de transparência na montagem, fugindo da ideia de caixa preta, onde a causa de deter-

furo para passagem da fiação a ser ligada na tomada de 127V. A Fig. 4 auxilia na orientação deste arranjo.

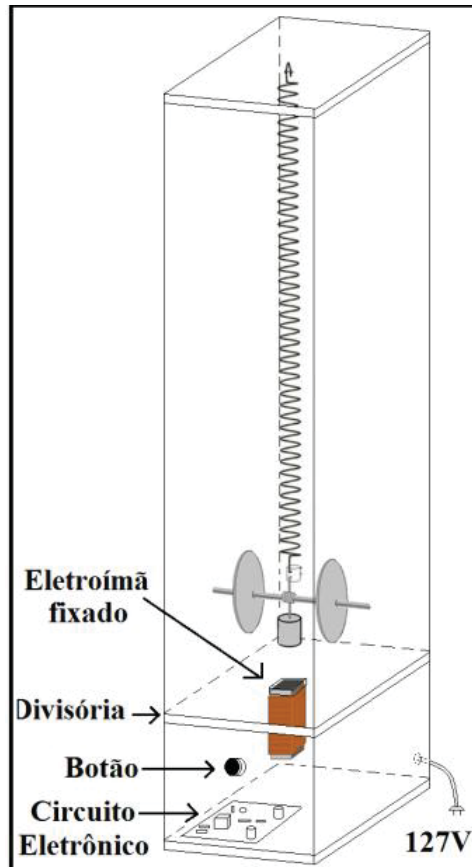


Fig. 4 – Disposição dos elementos preparados.

minados fenômenos acaba escondida (embora isso possa ser resolvido explicando o que há ali dentro por meio de um comentário no texto atrelado no equipamento). Essa consideração se justifica no entendimento da importância dada à visualização do eletroímã pelo visitante-interlocutor como o elemento substitutivo do “puxão manual”. Logo, também se transcende ao mero acionamento de botões. Mais do que o botão, o visitante-interlocutor precisa identificar o papel do eletroímã e, se ele fica escondido, o seu efeito fica parecendo algo “mágico”.

Devido ao núcleo do eletroímã ficar exposto rente a superfície superior da divisória, sugere-se como acabamento acrescentar uma fina espuma circular (ou tira de borracha preta) sobre o local, útil para amortecer e silenciar o impacto. Após esta etapa da montagem, a atenção refere-se à orientação de funcionamento com textos explicativos dos fenômenos. Pela automação feita, é preciso destacar uma frase tipo “PRESSIONE O BOTÃO” ao lado deste.

Facilmente assim ativada a demonstração, as explicações físicas devem caracterizar os conceitos envolvidos objetivando prover um envolvimento dos visitantes com o conhecimento científico dentro da perspectiva seguida em espaços educativos informais. A Fig. 5 representa um modelo nesse sentido aqui estruturado e deve ser percebido como uma alternativa ao que pode ser empregado no equipamento. Em termos qualitativos, procura-se situar noções de conservação e transferência de energia, batimento, frequência e modos oscilatórios do sistema, organizados em uma sintética explicação pensada tendo em vista o público alvo, majoritariamente formado por estudantes do nível básico de ensino e leigos.

A leitura da Fig. 5 está disponibilizada aos visitantes por meio de um adesivo contendo tais comentários, visível atrás da caixa de acrílico na parte acima da divisória (montagem do lado direito da Fig. 6). O equipamento acabado pode ser posto numa bancada para experimentação, mas em situações de MCTs é sensato usar uma cantoneira de ferro para deixá-lo imóvel em local definido de uma parede. A Fig. 6 apresenta uma foto contendo dois pêndulos de Wilberforce com a automatização sugerida.

III. Considerações finais

Em razão do interesse relacionado à mediação entre o prazer e o conhecimento constituído, ambientes planejados para a educação informal (NRC, 2009) visam dotar suas atividades de aprendizagem de um caráter lúdico. Aderindo uma perspectiva de aprendizagem por livre escolha (DIERKING, 2005), estes ambientes disponibilizam demonstrações em que os visitantes, por si sós, interagem livremente no que se espera ser uma maneira diferente e divertida de envolver o conhecimento científico. Para isto, os equipamentos necessitam de adaptações. Comandos ou textos explicativos que induzem o que fazer e observar são indispensáveis. Explicações dos fenômenos são pensadas com linguagem acessível à maioria dos experimentadores. Nos MCTs, conforme Iszlaji (2012, p. 90), grande parte das interações com os aparatos tem o interesse despertado por um “*simples ‘girar manivelas’ ou apertar de um botão tipo push-button (apertar um botão para obter uma única resposta)*”, em que muitos equipamentos são constituídos de uma auto-

PÊNDULO DE WILBERFORCE

Após apertar o botão, o pêndulo é atraído para baixo, iniciando uma oscilação na vertical (longitudinal). Observe que, gradativamente, esta oscilação do pêndulo muda para a oscilação em modo rotacional, continuando a trocar alternadamente essas formas de oscilar. Neste pêndulo temos dois modos de oscilação (longitudinal e rotacional), mas ainda seria possível mais um. O terceiro seria o modo pendular (para-lá-e-para-cá), que não está sendo considerado.

Por que ocorre essa alternância nos modos de oscilação?

Neste pêndulo de Wilberforce, ao apertar o botão do aparelho, tem-se uma força externa que atua inicialmente para estender a mola e fornecer energia mecânica ao sistema. Esta força é realizada por um eletroímã escondido na parte inferior da base e que funciona num curto intervalo de tempo atraindo o cilindro de ferro do pêndulo (massa) para baixo.

O fenômeno percebido da alternância de transferência gradual de energia de um modo a outro se deve ao acoplamento destes tipos (ou modos) de movimentos oscilatórios, intrínseco da mola helicoidal, e ao ajuste aproximado das frequências desses modos. Quando a massa do pêndulo oscila verticalmente, a mola ora é alongada e ora é comprimida. Todavia, vale observar que no alongamento da mola há uma leve torção da mesma e, ao ser comprimida, ela se enrola com determinada tensão que ocasiona uma ligeira torção em sentido contrário. Na medida em que a amplitude da oscilação vertical diminui, mais facilmente se nota o movimento de torção devido ao impulso elástico nesse sentido. Logo, há transferência gradativa entre energias potenciais e cinéticas, dependendo o crescimento da amplitude de uma oscilação do decréscimo da outra, pois a energia mecânica total se conserva. Pode-se dizer que a energia total (E_T) do sistema é a soma das energias cinéticas e potenciais segundo a expressão:

$$E_T = K_L + K_R + U_L + U_R = mv^2/2 + I\omega^2/2 + Kx^2/2 + \delta\theta^2/2$$

Onde: K_L é a energia cinética longitudinal; K_R é a energia cinética rotacional; U_L é a energia potencial elástica longitudinal; e U_R é a energia potencial elástica rotacional. Dessas grandezas, especificamente tem-se: m é a massa do peso oscilador; v é a velocidade do peso oscilador; I é o momento de inércia; ω é a velocidade angular; K é a constante de elasticidade longitudinal da mola; x é o deslocamento longitudinal (vertical) da massa m ; δ é a constante de elasticidade rotacional; e θ é o deslocamento angular do peso de uma posição de equilíbrio.

Quando aproximadas as frequências de oscilação dos dois modos e uma vez estendida a mola helicoidal do pêndulo, há uma força restauradora longitudinal e, simultaneamente, uma de torção, tipicamente de intensidade muito menor. Portanto, ao apertar o botão, estamos simultaneamente fornecendo energia potencial elástica longitudinal e rotacional à mola. O fenômeno é, na verdade, um fenômeno de batimento, o qual, efetivamente, requer que as frequências dos dois modos sejam próximas para proporcionar este efeito de alternância de modos oscilatórios, sendo a frequência desse batimento igual à diferença das frequências dos dois modos discutidos. E quanto menor essa diferença, mais lenta será a alternância entre os modos.

Fig. 5 – Texto modelo. Seguindo a montagem especificada, este texto constitui-se num adesivo de aproximadamente (15x50)cm.



Fig. 6 – Pêndulos de Wilberforce da instituição em que se encontram os autores. O do lado esquerdo seguiu a montagem da primeira subseção e pertence a um laboratório didático. O do lado direito pertence ao MCT. A única diferença entre eles é que o do lado direito apresenta quatro hastes ('braços') com pequenas massas de latão nas extremidades, cujo momento de inércia fora ajustado por acréscimos de massas de calafetar (visualmente camufladas na pintura) seguindo orientações de Ehrlich (1990).

matização arquitetada por uma equipe especializada do setor. Assim preparados, almeja-se que os equipamentos superem a qualidade e o papel dos experimentos simples e baratos sugeridos para escolas sem laboratórios (CHINELLI *et al.*, 2008) na medida em que também se diferenciem daqueles comercializados que lá possam existir. Aliás, de acordo com Pereira *et al.* (2008), após interação com um aglomerado desses equipamentos em atividades museais, é visível o impacto favorável nos participantes em saber mais sobre algum tema exposto. Coerentemente, a fim de que as visitas sejam momentos cada vez mais ricos e intensos de aprendizagem, são constantes as preocupações acerca das necessidades de ampliação e aprimoramento das demonstrações das áreas de exposições públicas permanentes.

Aos envolvidos com a educação informal desses ambientes, o presente trabalho divulgou a elaboração de um pêndulo de Wilberforce automatizado que pode ser bem aproveitada. A montagem é inovadora e permite que as demonstrações sejam facilmente realizadas pela automação incrementada, levando em consideração os desempenhos dos equipamentos da Fig. 5 há mais de dois anos nos locais mencionados. Ao texto explicativo da Fig. 5, vale ressaltar que ele constitui-se um exemplo que pode ser aperfeiçoado a critério do aprofundamento determinado na linguagem das explicações físicas em termos qualitativos ou não. Nesse sentido, ainda que qualquer elaboração deste tipo esteja sempre limitada e alvo de melhorias, é significativo dizer que a essência desta orientação explicativa, que se sugere atrelar no equipamento, mantém-se conservada. Mais ainda, dentro da perspectiva lúdica de interação com ele, espera-se possibilitar que os fenômenos observados sejam posteriormente bem resgatados da memória de um estudante em situações de sala de aula aonde um assunto abordado tenha sido por ele relacionado, permitindo que o educador possa então usufruir de tais lembranças em melhoria do aprendizado dos conceitos físicos envolvidos no decorrer das discussões. Por fim, o equipamento assim automatizado também pode ser instalado em laboratórios didáticos como um atrativo importante ao seu estudo.

Explicações físicas detalhadas e quantitativas deste experimento fogem do objetivo do trabalho e o leitor nelas interessado poderá consultar a bibliografia em língua inglesa indicada a seguir.

Referências

BERG, R. E.; MARSHALL, T. S. Wilberforce pendulum oscillations and normal modes. *American Journal of Physics*, v. 59, n.1, p. 32-38, jan. 1991. Disponível

em: <<http://faraday.physics.utoronto.ca/PHY182S/WilberforceRefBerg.pdf>>.
Acesso em: 05 nov. 2012.

CHELINI, M. E.; LOPES, S. G. B. C. Exposições em museus de ciências: reflexões e critérios para análise. **Anais do Museu Paulista**, v. 16, n. 2, p. 205-238, jul-dez, 2008.

CHINELLI, M. V.; PEREIRA, G. R.; AGUIAR, L. E. V. Equipamentos interativos: uma contribuição dos centros e museus de ciências contemporâneos para a educação científica formal. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 30, n. 4, p. 4505, 2008.

CONSTANTIN, A. C. C. Museus interativos de ciências: espaços complementares de educação? **Interciência**, v. 26, n. 5, p. 195-200, mayo, 2001.

DEBOWSKA, E.; JAKUBOWICZ, S.; MAZUR, Z. Computer visualization of the beating of a Wilberforce pendulum. **European Journal Physics**, v. 20, p. 89-95, 1999.

DIERKING, L. D. Lessons without limit: how free-choice learning is transforming science and technology education. **História, Ciências, Saúde – Manguinhos**, v. 12 (supplement), p. 145-160, 2005.

EHRlich, R. **Turning the World Inside Out and 174 Other Simple Physics Demonstrations** (Princeton U. P., Princeton, NJ), Demonstration G. 1, Wilberforce [sic] pendulum, p. 89-90, 1990.

FERRAZ NETO, L. Pêndulo de Wilberforce. Feira de ciências – o imperdível. Disponível em: <http://www.feiradeciencias.com.br/sala05/05_52.asp>. Acesso em: 06 nov. 2012.

FREIER, G. D.; ANDERSON, F. J. **A Demonstration Handbook of Physics** (American Association of Physics Teachers, College Park, MD). Demonstration Mx-11, “Wilberforce [sic] Pendulum”, p. M-61, 1981.

GALIAZZI, M. C.; ROCHA, J. M. B.; SHIMITZ, L. C.; SOUZA, M. L.; CIESTA, S.; GONÇALVES, F. P. Objetivos das atividades experimentais no ensino médio: a pesquisa coletiva como modo de formação de professores de ciências. **Ciência & Educação**, v. 7, n. 2, p. 249-263, 2001.

GRECZYŁO, T.; DEBOWSKA, E. Using a digital video camera to examine coupled oscillations. **European Journal of Physics**, v. 23, p. 441-447, 2002.

GRECZYŁO, T. **The Use of Digital Techniques in an Investigation of Coupled Oscillations of a Wilberforce Pendulum**. 2001. Thesis (Physics Teaching) - Faculty of Physics and Astronomy Institute of Experimental Physics, University of Amsterdam.

INEP - INSTITUTO NACIONAL DE ESTUDOS E PESQUISAS EDUCACIONAIS ANÍSIO TEIXEIRA. **Estatísticas dos Professores no Brasil** (INEP, Brasília, 2003).

ISZLAJI, C. **A criança nos Museus de Ciências: análise da exposição mundo da criança do museu de ciência e tecnologia da PUCRS**. 2012. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências) - Instituto de Física, Instituto de Química, Instituto de Biociências e Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo.

KÖPF, U. "Wilberforce's Pendulum Revisited". **American Journal of Physics**, v. 58, n. 9, p. 833-837, 1990.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Learning science in informal environments: people, places, and pursuits**. Committee on learning science in informal environments. Philip bell, Bruce Lewenstein, Andrew W. Shouse, and Michael A. Feder (Eds.). Board on science education, center for education. Division of behavioral and social sciences and education. Washington, DC: The National Academies Press, 2009.

PASCO. Manual de instruções do aparato experimental PASCO. Disponível em: <<ftp://ftp.pasco.com/Support/Documents/English/ME/ME-8091/012-08397a.pdf>>. Acesso em: 12 nov. 2012.

PEREIRA, G. R.; CHINELLI, M. V.; COUTINHO-SILVA, R. C. Inserção dos centros e museus de ciências na educação: estudo de caso do impacto de uma atividade museal itinerante. **Ciência & Cognição**, v. 13, n. 3, p. 100-119, 2008.

PLAVČIĆ, M.; ŽUPANOVIĆ, P.; LOŠIĆ, Ž. B. The resonance of the Wilberforce pendulum and the period of beats. **Lat. Am. J. Phys. Educ.**, v 3, n. 3, p. 547-549, set. 2009.

SABER ELETRÔNICA: o seu portal para o universo da eletrônica – on-line. Disponível em: <<http://www.sabereletronica.com.br/secoes/leitura/1595>>. Acesso em: 31 ago. 2012.

SILVA, O. H. M.; LABURÚ, C. E. Motor elétrico de Faraday: uma montagem para museus e laboratórios didáticos. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 26, n. 3, p.478-491, 2009.

SILVA, O. H. M.; ZAPAROLLI, F. V. D.; ARRUDA, S. M. Demonstrações em óptica geométrica: uma proposta de montagem para ambientes de educação não formal. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 29, n. 3, p. 1199-1199, dez 2012.

SILVA, O. H. M.; ALMEIDA, A. R.; ZAPAROLLI, F. V. D.; ARRUDA, S. M. Convergência e divergência de raios de luz por lentes e espelhos: um equipamento para ambientes planejados de educação informal. **Caderno Brasileiro de ensino de Física**, v. 30, n. 2, 2013.

TORZO, G.; D'ANNA, M. The Wilberforce pendulum: a complete analysis through RTL and modeling (p. 579-585). In.: **Quality Development in Teacher Education and Training**. Second International Girep Seminar, 1-6 September, Udine, Italy, 2003.

VALENÇA, V. L. C. A criação do Museu das Crianças de Santa Catarina: uma experiência em andamento. **Perspectiva**, v. 24, n. 1, p. 319-338, jan/jun 2006.

WEBSITE:

<<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/oscilaciones/wilberforce/wilberforce.htm>>.

Simulação online do pêndulo de Wilberforce. Acesso em: 09 nov. 2012.

WEBSITE: <<http://www.compadre.org/OSP/items/detail.cfm?ID=7569>>. Download de um programa para a simulação do pêndulo de Wilberforce. Acesso em: 08 nov. 2012.

WILBERFORCE, L. R. “On the vibrations of a loaded spiral spring”. **Philosophical Magazine**, v. 38, p. 386-392, 1894.

WILLIAMS, J.; KEIL, R. “A Wilberforce pendulum”. **Physics Teaching**, v. 21, p. 257-258, 1983.