

Desenvolvimento em Ensino de Física

Observando as marés atmosféricas: Uma aplicação da placa Arduino com sensores de pressão barométrica e temperatura

(*Observing the atmospheric tides:
An application of the Arduino board with sensors for barometric pressure and temperature*)

Luiz Raimundo Moreira de Carvalho¹, Helio Salim de Amorim²

¹Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

²Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Recebido em 14/1/14; Aceito em 24/2/14; Publicado em 31/7/2014

Apresentamos uma montagem experimental simples para o estudo da maré atmosférica, baseada no uso da placa Arduino Uno. Com essa montagem, o professor de física no Ensino Médio poderá apresentar para seus alunos as oscilações barométricas, um efeito fundamentalmente de origem térmica devido ao aquecimento da atmosfera produzido pela radiação solar. Apresentamos também uma comparação entre a maré atmosférica e o efeito gravitacional da maré oceânica, destacando as diferenças entre os dois fenômenos.

Palavras-chave: maré atmosférica; Arduino; atividade experimental investigativa.

We present a simple experimental apparatus for studying the atmospheric tide based on the use of Arduino Uno board. With this apparatus, the physics teacher in high school can present to your students barometric oscillations, an effect mainly of thermal origin, due to the warming of the atmosphere produced by solar radiation. We also present a comparison between atmospheric tide and the gravitational effect of ocean tide, with emphasis on the differences between the two phenomena.

Keywords: atmospheric tide; Arduino; investigative experimental activity.

1. Introdução

O modelo gravitacional do fenômeno das marés oceânicas, tal como o conhecemos hoje, foi apresentado e discutido originalmente por Isaac Newton (1643–1727) em seu *Principia Mathematica*. As marés são uma consequência de forças gravitacionais exercidas pela lua e pelo sol em consonância com suas três leis da Mecânica. A lua exerce uma influência bem mais importante que o sol. Esta e várias outras propriedades importantes foram explicadas, incluindo a ocorrência da segunda maré alta quando a lua está no meridiano oposto, fato que intrigou vários estudiosos que se dedicaram ao assunto. Para uma revisão e um maior detalhamento sobre a mecânica das marés recomendamos os sítios do Instituto Hidrográfico da Marinha de Portugal [1] e do *National Oceanic and Atmospheric Administration* [2].

Newton concebeu que as mesmas ideias que implicam o efeito de maré nos oceanos deveriam produzir também um efeito similar na atmosfera, mas concluiu que o efeito atmosférico seria muito mais difícil de observar. Como a atmosfera não tem uma superfície

limítrofe bem definida, como é o caso dos oceanos, o efeito teria que ser observado indiretamente. Um dos parâmetros que pode se mostrar sensível a variações da “espessura” da atmosfera é a pressão. Sobre o fenômeno das marés atmosféricas, recomendamos o livro clássico de Lindzen e Chapman [3].

É um fato bem conhecido da meteorologia que a pressão atmosférica sofre uma leve variação diurna periódica. Essas variações tendem a ser mais pronunciadas nas regiões tropicais. A Fig. 1 mostra o comportamento típico da pressão atmosférica na Cidade do México, entre os dias 10/9/2013 e 15/9/2013. Por sua semelhança com o mecanismo da maré oceânica, essas oscilações são conhecidas como *maré barométrica* e, por extensão, também como *maré atmosférica*. Os estudos que se desenvolveram a partir de Newton até os nossos dias dão conta de que as oscilações barométricas não são de origem gravitacional, mas fundamentalmente de origem térmica, devido ao aquecimento da atmosfera produzido pela radiação solar. O efeito gravitacional está presente, mas é muito menor que o efeito térmico.

Neste trabalho apresentamos uma montagem experimental simples, que pode ser empregada para estudar

¹E-mail: luiz.fisica.prof@gmail.com.

o efeito da maré atmosférica. Com essa montagem, o professor de física no Ensino Médio não só pode apresentar para seus alunos as oscilações barométricas como também pode criar uma atividade investigativa sobre esse fenômeno. Nas próximas seções apresentamos a montagem experimental, alguns resultados e por fim concluímos com algumas informações que podem auxiliar na definição de uma agenda investigativa sobre a maré atmosférica.

2. Montagem experimental

O aparato experimental é constituído de três partes: uma placa Arduino Uno (REV. 3), um sensor duplo de pressão atmosférica e temperatura BMP085 da Bosch e um escudo (*shield*) para Arduino com função de armazenamento de dados (*data logging*) em cartão de memória. O escudo que usamos é fabricado pela *Adafruit* e todos os itens aqui descritos são acessíveis e podem ser adquiridos no território nacional. Na Tabela 1

listamos os itens envolvidos.

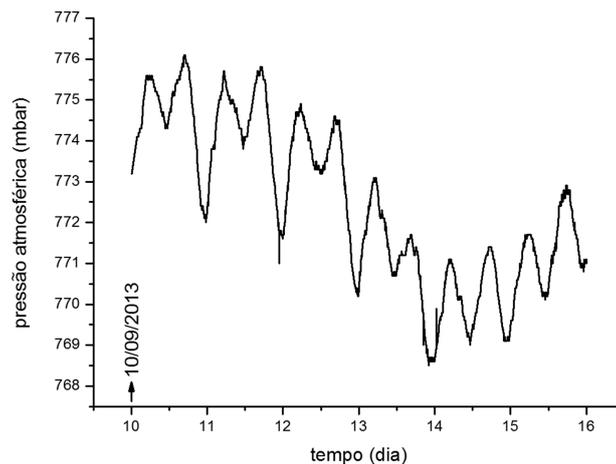


Figura 1 - Gráfico da pressão atmosférica registrada na Cidade do México, México. [Lat. 19° 36' N, Long. 98° 57' O]. Dados obtidos no sítio do *Observatório de Raios Cósmicos da Cidade do México*: <http://www.cosmicrays.unam.mx/>.

Tabela 1 - Itens envolvidos na montagem experimental.

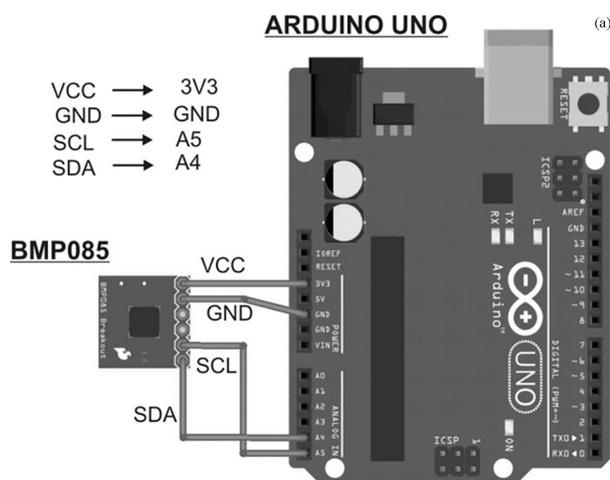
Itens	Quantidade	Observações
1 Placa Arduino Uno R3	01	REV. 3
2 Sensor digital de pressão barométrica e temperatura BMP085 da Bosch	01	O sensor que utilizamos é fornecido numa pequena placa (<i>breakout board</i>) produzida pela <i>SparkFun</i> [4].
3 <i>Data logging shield</i> da Adafruit [5]	01	
4 Fonte de alimentação externa	01	9VDC / 1A
5 Cartão de memória	01	Formato SD ou outro formato com adaptador SD.
6 Barra de pinos (macho)	01	Normalmente a barra tem 40 pinos no espaçamento padrão de 0,1".
7 Barra de pinos (fêmea)	01	Normalmente a barra tem 40 pinos no espaçamento padrão de 0,1".
8 Será necessário um ferro de solda, solda, fios finos para pequenas conexões e um estilete.		

A placa Arduino é basicamente um microcontrolador que administra todas as etapas envolvidas na medida e armazenagem dos dados. É recomendável para a realização dessa montagem que o interessado tenha alguma familiaridade com a placa Arduino. O uso da placa Arduino em atividades experimentais didáticas já recebeu a atenção de artigos na RBEF [6, 7] e uma extensa literatura pode ser encontrada na internet. Entretanto, vamos procurar detalhar a montagem e ao final, como apêndice, apresentamos informações sobre o (*sketch*), *software* utilizado na programação do Arduino. Na Fig. 2 mostramos as partes envolvidas e na Fig. 3 a montagem completa.

O sensor digital BMP085 é baseado no efeito piezoresistivo, onde a pressão aplicada sobre certos materiais, notavelmente semicondutores, afeta a sua resistência elétrica. Ele possui uma interface serial I²C (*Inter-Integrated Circuit*) que usa duas vias de comu-

nicação: a linha SDA (*Serial Data*) por onde os dados são enviados, e a SCL (*Serial Clock*) que é o sinal de *clock* usado para controlar a transferência de dados, sinal esse suprido, no nosso caso, pela placa Arduino. A linha SDA é ligada ao pino A4 e a linha SCL é ligada ao pino A5 do Arduino. O BMP085 opera na faixa de 30 kPa a 110 kPa e -40 °C a +85 °C, e pode ser alimentado por uma tensão na faixa 1,8 a 3,6 VDC. Assim, para o seu acionamento usamos a fonte de 3,3 VDC e um pino terra (*ground*) do próprio Arduino. O esquema de ligação do sensor ao Arduino está indicado na Fig. 2(a). O escudo para armazenagem de dados é normalmente fornecido sem os pinos para acoplamento à placa Arduino e será necessário soldá-los como indicado na Fig. 2(b). O escudo possui também uma *área de contatos* que pode ser usada para soldar algum componente auxiliar. Nesse caso soldamos uma barra fêmea com seis pinos na área de contatos para receber

o sensor BMP085 como está indicado na Fig. 2(b). Nos seis terminais do sensor BMP085 soldamos uma barra macho de seis pinos. Com esses pinos fixamos o sensor na barra de pinos fêmea previamente soldada no



escudo. Com isso temos uma montagem experimental bem compacta e firme (Fig. 3) podendo ser instalada em qualquer lugar.

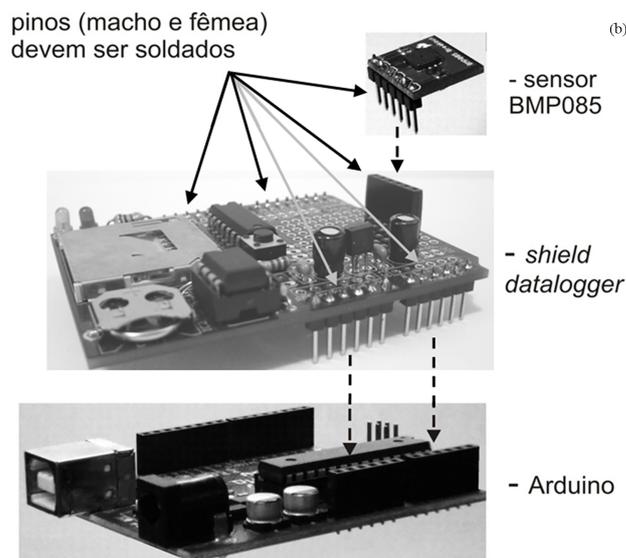


Figura 2 - (a) Esquema de ligações entre sensor e a placa Arduino. Das seis saídas do sensor usamos apenas quatro, indicadas na figura. / (b) Mostramos as três camadas do equipamento: na base está a placa Arduino; no meio está o escudo *data logger* e por fim a placa com o sensor BMP085. No escudo é necessário soldar os pinos machos que farão as conexões com as diversas saídas do Arduino dando continuidade elétrica e sólido acoplamento mecânico. No escudo vemos uma seção de seis pinos fêmeas que são soldados em sua matriz de contatos. Esse pinos fêmeas são usados para receber o sensor BMP085. No sensor, por sua vez, é necessário soldar uma peça de seis pinos machos, como indicado na figura.



Figura 3 - Montagem experimental completa. Para maior portabilidade, esse equipamento também pode ser alimentado por bateria.

O arquivo de saída de dados é em padrão ASCII, tem o formato de colunas (pressão, temperatura) separadas por vírgula e pode ser aberto diretamente no Microsoft Excel ou outro programa de tratamento de dados, ou ainda examinado com um programa de texto.

3. Resultados

Na Fig. 4 apresentamos os resultados registrados durante cinco dias na cidade de Teresópolis/RJ. Vemos claramente as oscilações na pressão e na temperatura do ar. Se medirmos os tempos em que ocorrem os máximos (ou os mínimos) e os ordenarmos em ordem crescente

podemos construir os gráficos auxiliares apresentados como pequenas inserções na parte superior dos gráficos da Fig. 4. Os pontos se distribuem linearmente e o coeficiente angular da reta ajustada, via método dos mínimos quadrados, é uma medida do período das oscilações. Podemos inferir duas propriedades importantes: as oscilações barométricas possuem um período de 12 horas e as oscilações de temperatura um período de 24 h. Isso mostra que o sol rege essas variações. Por sua vez, como vemos na Fig. 4, a pressão barométrica não varia de forma estritamente periódica. Para o intervalo de observação aqui reportado, as oscilações de pressão se superpõem a uma variação monótona decrescente e as oscilações de temperatura a uma variação monótona crescente. Essas variações estão ligadas à dinâmica de larga escala da atmosfera e são essas variações que determinam o tempo local no sentido meteorológico do termo.

É interessante, dentro de uma perspectiva de um trabalho investigativo, comparar esses resultados com o efeito de maré oceânica. Na Fig. 5 apresentamos os dados de maré tal como registrados pelo Centro de Hidrografia da Marinha do Brasil (BNDO – Banco Nacional de Dados Oceanográficos), na estação situada na Ilha Fiscal, Baía da Guanabara, Rio de Janeiro/RJ. A pe-

quena inserção no gráfico corresponde ao tempo de cada pico ordenado em ordem crescente. A reta ajustada fornece o período de 12h 23(1) min, o que equivale a um dia de 24h 47(3) min, que corresponde muito bem ao valor conhecido de 24h 51min do dia lunar médio. Isso mostra que a lua rege as variações de maré oceânica. Devemos observar também, a formação das duas marés altas ao longo do dia, que tanto intrigaram os estudiosos predecessores de Newton.

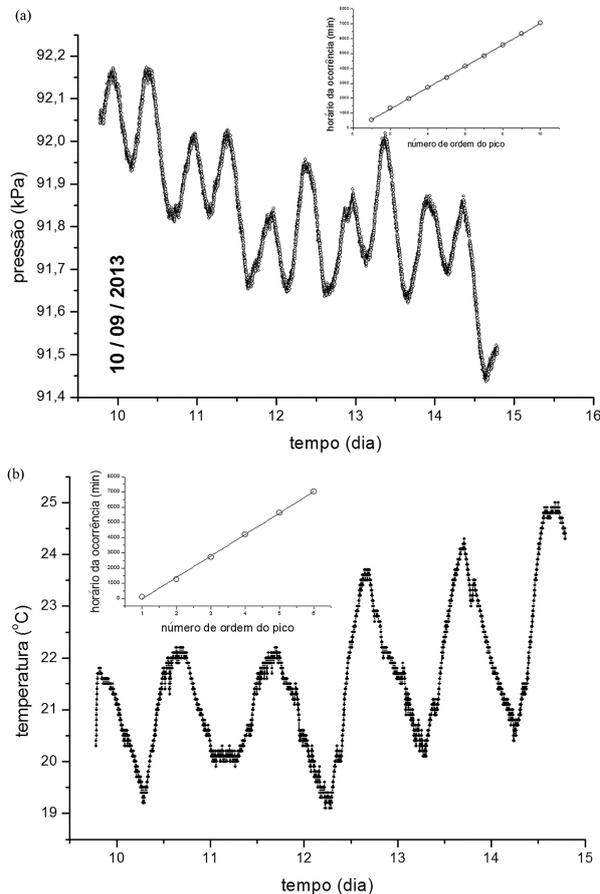


Figura 4 - Gráficos: (a) pressão em função do tempo; (b) temperatura em função do tempo. Valores medidos na cidade de Teresópolis/RJ (Lat. 22° 26' 09" S – Long. 42° 58' 37" O), com uma taxa de amostragem de uma medição por minuto. As pequenas inserções mostram a evolução do horário das ocorrências dos máximos. O coeficiente angular da reta ajustada mede o período em que se repetem os máximos. Para o gráfico da pressão encontramos 11,91(7) h e para a temperatura 23,4(4) h. Os máximos de pressão ocorrem por volta de 9h 30min e 22h 30min.

Os dados de maré oceânica do BNDO ainda podem ser usados para mostrar a influência do sol e outros fatores não gravitacionais. Na Fig. 6(a) mostramos toda a sequência de dados de maré que abrange o período de um mês, 01/09/2013 a 30/09/2013. Vemos que as oscilações rápidas (~12h25min) são como que moduladas por uma oscilação de período maior envolvendo vários dias. Isso ocorre devido à ação gravitacional combinada do sol e da lua. No gráfico está indicado também o momento em que ocorre o início de cada fase lunar. Podemos ver que os máximos (marés de

sizígia) ocorrem nas fases nova e cheia, e os mínimos (marés de quadratura) nas fases crescente e minguante, em consistência com o modelo newtoniano. Esse resultado é análogo ao fenômeno de batimento que encontramos em acústica quando dois sons de frequências muito próximas se interferem. Uma simulação idealizada pode ser feita somando-se duas funções seno de mesma amplitude, mesma fase inicial e com períodos de 12 h (solar) e 12 h 25,5 min (lunar), como mostra a Eq. (1). O gráfico simulado pode ser visto na Fig. 6(b), onde introduzimos uma pequena fase inicial para sincronizar, aproximadamente, os dois gráficos.

$$y(t) = \text{sen} \left(\frac{2\pi t}{12h} \right) + \text{sen} \left(\frac{2\pi t}{12h 25,5min} \right).$$

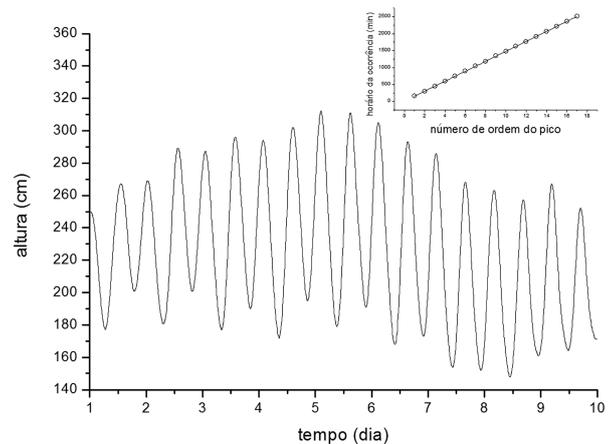


Figura 5 - Altura relativa do nível do mar registrado com um marégrafo na Ilha Fiscal, Baía da Guanabara, Rio de Janeiro/RJ entre os dias 1 e 10 de setembro de 2013. Como na Figura 4, a pequena inserção mostra a evolução do horário de ocorrência dos máximos. O coeficiente angular da reta ajustada indica um período de 12h 23(1) min. (Dados gentilmente cedidos pelo Centro de Hidrografia da Marinha do Brasil.)

A Fig. 6(a) serve também para mostrar a influência de outros fatores que rompem o caráter estritamente regular dessas oscilações. Esses fatores estão ligados, entre outros, ao fato de que os oceanos são lâminas de água limitadas pelos continentes e em contato com a atmosfera circundante. O perfil da costa continental, o piso oceânico irregular e ventos são alguns fatores que produzem um complexo padrão de oscilações secundárias, resultando em valores diferentes da amplitude de um dia para o outro. Em diferentes posições do planeta, as amplitudes da maré podem ir de alguns centímetros até mais de 10 m, como as observadas em Burntcoat Head, na Nova Escócia (Canadá). Um exemplo interessante pode ser encontrado no mar Mediterrâneo, onde os efeitos de maré são insignificantes da mesma forma que não são observáveis em lagos ou pequenas lâminas de água. Os povos mediterrâneos não conheciam o fenômeno da maré oceânica, cuja descoberta historicamente é atribuída ao navegante grego Pytheas, que por volta de 325 a.C. se aventurou para

além do estreito de Gibraltar, tendo atingido as ilhas Britânicas e países nórdicos. Navegando pelos limites costais, ele teria observado efeitos marcantes e admiráveis de maré. Os estudos dos padrões de maré observados nas mais diversas regiões do globo terrestre se beneficiam enormemente da análise de Fourier como uma técnica matemática básica de decomposição de um

sinal periódico em seus harmônicos. Da mesma forma, a análise de Fourier das oscilações barométricas tem sido uma ferramenta importante no estudo desse fenômeno. Muitas informações sobre a atmosfera (e sobre os oceanos) têm sido obtidas analisando a evolução no tempo das amplitudes e das fases desses harmônicos.

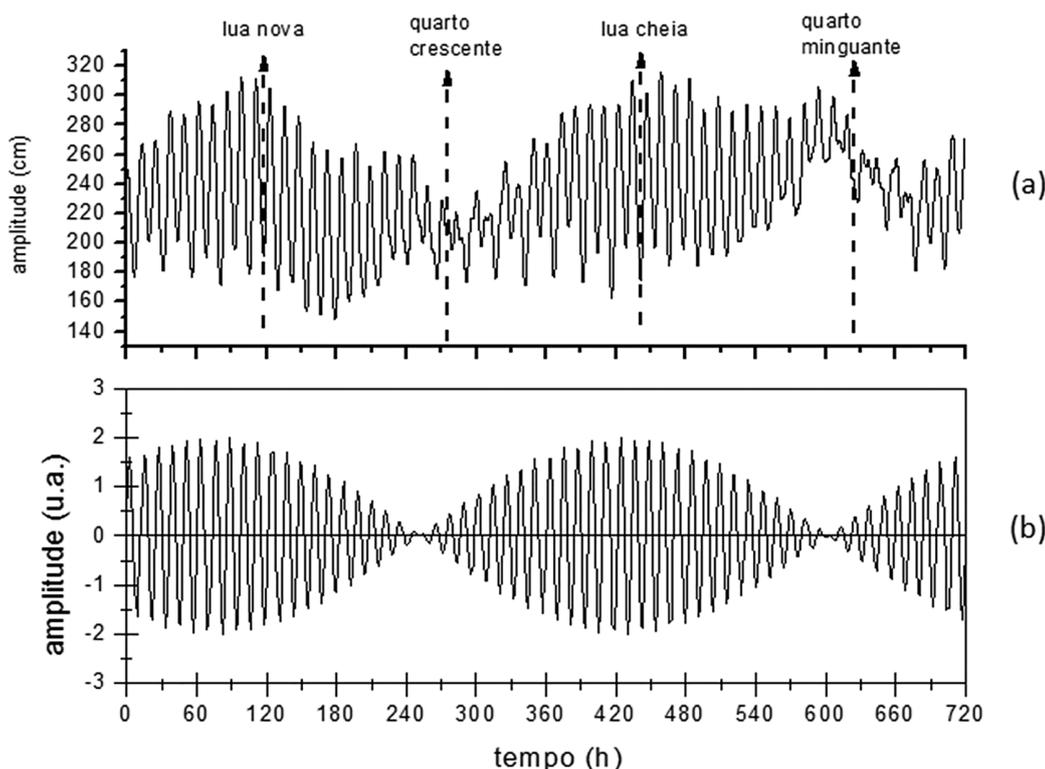


Figura 6 - (a) Altura relativa do nível do mar registrado na Ilha Fiscal, Baía da Guanabara, Rio de Janeiro/RJ entre os dias 1 e 30 de setembro de 2013 (dados gentilmente cedidos pelo Centro de Hidrografia da Marinha do Brasil). O gráfico indica também os instantes em que ocorreram o início das fases lunares. / (b) Gráfico da superposição de duas funções seno de períodos diferentes, como descrita pela Equação 1, que simulam a combinação da ação gravitacional da lua e do sol. Introduzimos aqui uma fase inicial apenas com o intuito de sincronizar aproximadamente os dois gráficos.

4. Conclusão

A montagem experimental utilizada possibilita a automação das medidas, e isso permite que sejam tomadas medidas de longa duração e alta taxa de amostragem. Além disso, a automação elimina o compromisso exacerbado com a obtenção de dados (que costuma ser supervalorizada em atividades mais “tradicionais” de laboratório [8]) e libera o professor e os estudantes para se concentrarem na discussão e interpretação dos dados obtidos. Portanto, no desenvolvimento de uma atividade investigativa, o foco dos estudantes volta-se sobretudo para a compreensão de fenômenos e para a tentativa de construção de modelos físicos que expliquem (mesmo que em parte) os fenômenos investigados.

O fenômeno da maré atmosférica permite a abordagem de uma grande variedade de problemas de Física

que podem, por sua vez, servir de temas para atividades investigativas na escola. Uma das questões interessantes a ser explorada é a sua relação com a maré oceânica e o fato de que as causas primárias dominantes dos dois fenômenos são diferentes. A oscilação diária do nível das águas oceânicas é de origem gravitacional e dominada pela interação com a lua. As marés altas, ou preamar, nunca se repetem de um dia para outro no mesmo horário. O mesmo podemos dizer para a maré baixa. Como sabemos, isso se deve ao fato de que a Lua gira em torno da Terra com um período orbital de 27,3 dias e seu trânsito pelo meridiano local muda de um dia para o outro.

A maré atmosférica, como vimos, é regida pelo sol e portanto não é um efeito gravitacional. Se fosse gravitacional, como bem observou *Lord Kelvin* em 1882, o efeito seria dominado pela lua, pois esta exerce um

efeito gravitacional da ordem de 2,5 vezes mais intenso que o do sol. Ao contrário, como vimos, as variações semi-diurnas da pressão barométrica são temporalmente muito regulares. Humboldt, em suas famosas viagens pela América do Sul (1799-1804), teve a oportunidade de medir essas variações constatando que os máximos ocorriam por volta das 10 h e 22 h com tanta regularidade que poderiam ser usados como um relógio [9].

O problema que se apresenta na comparação dos dois fenômenos é a periodicidade semi-diurna das oscilações barométricas. Se no caso da maré oceânica essa periodicidade é uma decorrência natural dos movimentos relativos da Terra, lua, sol e das leis da mecânica newtoniana, o mesmo não podemos dizer da periodicidade das marés atmosféricas. A interpretação do porquê temos dois máximos (e dois mínimos) de pressão é bem mais complicada e não se espera que se resolva no âmbito de uma investigação escolar. Só no período posterior à Segunda Guerra Mundial, com o advento da tecnologia dos foguetes, dos radares, e dos avanços na computação eletrônica, foi possível sondar a atmosfera a grandes altitudes e desenvolver um modelo de como a atmosfera reage à enorme quantidade de energia que recebe do sol. A descoberta da camada de ozônio (O_3) e sua grande habilidade em absorver a radiação ultravioleta foi decisiva para suportar o modelo vigente, e muitas pesquisas são realizadas ainda hoje para aperfeiçoar explicações acerca do fenômeno das marés atmosféricas.

Apêndices

Nos apêndices apresentamos algumas sugestões sobre a montagem experimental e sobre a programação do Arduino. Vamos considerar que o leitor tenha alguma familiaridade quanto ao uso da placa Arduino e já tenha conseguido reunir os itens listados na Tabela 1.

Montagem

O escudo para armazenamento de dados (*data logging shield*) da Adafruit não é fornecido com os pinos machos já soldados, e o mesmo ocorre com o sensor BMP085. Você terá que soldá-los para assim possibilitar o acoplamento do escudo com as entradas analógicas / digitais (fêmea) da placa Arduino. Para esta etapa você pode utilizar o tutorial disponibilizado pela própria Adafruit em <http://learn.adafruit.com/adafruit-data-logger-shield/installing-the-headers>. Seguindo o mesmo procedimento, será necessário soldar uma peça com seis pinos machos na *breakout board* do sensor BMP085. A Fig. 2(b) mostra o aspecto geral do sensor após a fixação dos pinos.

Para fixar a placa do sensor BMP085 no escudo de armazenamento de dados será necessário soldar ao escudo uma peça com seis pinos fêmeas. Essa peça é sol-

data na matriz de contatos disponível no escudo. Como etapa final, será necessário soldar pedaços de fios para estabelecer as conexões entre o sensor BMP085 e as portas da placa Arduino, como indicado na Fig. 2(a). O sensor tem seis conexões, das quais usaremos apenas quatro. Uma conexão para alimentação, que usa a saída de 3,3 V da Arduino (3V3) e uma conexão de terra (GND). A linha SDA é ligada ao pino A4 e a linha SCL é ligada ao pino A5 da Arduino. Esses fios podem ser soldados facilmente na parte de baixo do escudo *data logger*. A Fig. 7 mostra um exemplo de como isso pode ser feito.

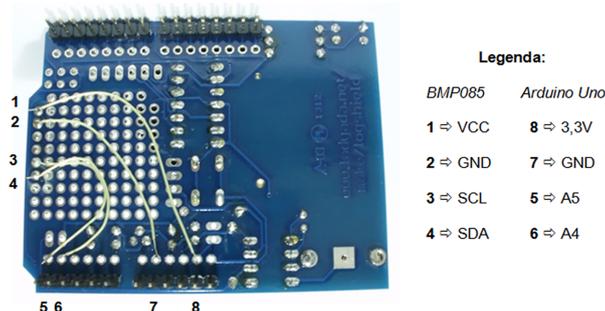


Figura 7 - Ligações feitas no verso do escudo para a conexão dos terminais do sensor BMP085 com o Arduino. Da forma como estão as conexões, o sensor deve ser fixado à barra fêmea como mostrado na Fig. 3.

Programação do Arduino/esquete

O programa (*sketch*) preparado para essa montagem é uma adaptação de programas especializados fornecidos pelos fabricantes do escudo *data logger* e do sensor BMP085. O programa faz uso de uma biblioteca RTCLib que pode ser obtida através do sítio da SparkFun e em seguida instalada no subdiretório *libraries* do diretório do IDE (*Integrated Development Environment*) do Arduino. Essa biblioteca tem a função de estabelecer o protocolo de comunicação com o circuito integrado DS1307 (*Real Time Clock*) que faz parte do escudo *data logger*. Esse circuito integrado é basicamente um relógio que se ocupa de manter a hora e a data sempre atualizada. Esse relógio é alimentado com uma pequena pilha de 3V colocada no próprio escudo. Com isso, todas as medidas de pressão e temperatura serão salvas no cartão de memória com a respectiva data e hora. Junto com o material do escudo *data logger*, o fabricante fornece as instruções para a atualização da hora/data. Essa operação é necessária apenas uma vez.

Para a comunicação I²C do sensor BMP085 através das portas A4 e A5, o programa faz uso da biblioteca *Wire*. Essa biblioteca já está incorporada no diretório *libraries* do IDE. O sensor é integralmente calibrado na fábrica. A relação entre a pressão e o sinal elétrico gerado pelo sensor, isto é, o sinal de transdução, é uma expressão matemática que envolve um conjunto de coeficientes numéricos. Esses coeficientes estão armaze-

nados em uma memória EPROM no mesmo sensor e precisam ser lidas pelo programa.

As medidas começam a ser armazenadas tão logo o equipamento seja ligado. Os valores são armazenados no diretório raiz do cartão SD em arquivos designados como “baroXX.csv”. A parte numérica XX começa em 00 e vai sendo acrescida automaticamente para cada novo arquivo de dados. O intervalo de tempo entre duas medidas sucessivas é controlado pela variável LOG_INTERVAL. No exemplo apresentado usamos o valor de 60.000 ms, ou seja, 1 minuto. Esse valor pode ser alterado segundo as necessidades lembrando apenas que a base de tempo da Arduino é o milissegundo.

O *sketch* do Arduino para controle do sensor BMP085 e do *data logging shield* pode ser obtido no sítio do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física do Instituto de Física da UFRJ, http://www.if.ufrj.br/~pef/producao_academica/dissertacoes/2014_Luiz_Carvalho/sketches/. Os autores agradecem desde já qualquer informação de falhas ou sugestões de aperfeiçoamento.

5. Nota final

Existem vários fornecedores nacionais para os itens usados no projeto. São facilmente localizados através de uma pesquisa na internet. Os preços também variam muito e exigem uma pesquisa cuidadosa. Existem outros fabricantes de escudos com função *data logging* que podem ser usados. Esses outros modelos naturalmente vão exigir uma adaptação do esquete para o Arduino, mas com o aporte de informações técnicas que são, invariavelmente, fornecidas pelos fabricantes, isso não é uma tarefa difícil.

Agradecimento

Gostaríamos de agradecer ao Centro de Hidrografia da Marinha do Brasil, responsável pelo Banco Nacional de Dados Oceanográficos, e particularmente ao Sr. Inácio Farias Serrão (SO-RM1), da Seção de Intercâmbio de Dados, pela gentileza em nos fornecer os dados de maré oceânica utilizadas neste trabalho.

Referências

- [1] Instituto Hidrográfico - Marinha de Portugal, *Marés*. Disponível em <http://www.hidrografico.pt/glossario-cientifico-mares.php>, acesso em 10/1/2014.
- [2] National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), *NOAA's Ocean Service Education: Tides and water levels*. Disponível em http://oceanservice.noaa.gov/education/tutorial_tides/welcome.html, acesso em 10/1/2014.
- [3] Richard Lindzen and Sydney Chapman, *Atmospheric Tides* (Gordan and Breach, New York, 1970).
- [4] Sítio da *SparkFun Electronics Inc.*: <https://www.sparkfun.com/>, acesso em 10/1/2014.
- [5] Sítio da *Adafruit Industries*, <http://www.adafruit.com/>, acesso em 10/1/2014.
- [6] A.R. Souza, A.C. Paixão, D.D. Uzêda, M.A. Dias, S. Duarte e H.S. Amorim, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **33**, 1702 (2011).
- [7] M.A. Cavalcante, C.R.C. Tavoraro, E. Molisani, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **33**, 4503 (2011).
- [8] A.T. Borges, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **19**, 291 (2002).
- [9] Richard Lindzen and Sydney Chapman, op. cit., p. 14-15.