

Sensor sonar de movimento para ensino de Física experimental



Fábio Saraiva da Rocha¹, Paulo Henrique Guadagnini²

¹Universidade Federal do Pampa, Campus Bagé, Bagé, RS, Brasil.

²Universidade Federal da Fronteira Sul, Campus Chapecó, Chapecó, SC, Brasil.

E-mail: fabio.rocha@unipampa.edu.br

(Received 23 April 2010; accepted 17 May 2010)

Resumo

Apresentamos neste trabalho o projeto de construção de um sensor sonar para uso no estudo de movimentos em física experimental baseado na técnica de pulso-eco de ultrassom. O projeto de construção do sensor de movimento é discutido em detalhes a partir de seus componentes mais básicos de hardware até o software embarcado. Efetuamos testes físicos de comparação do desempenho deste sensor com um instrumento de medida de distância (régua profissional) e também com outro sensor sonar de movimento, marca Vernier, disponível no mercado nacional. Os resultados desses testes indicam que a resolução do nosso sensor é cerca de 1 cm, e o erro absoluto em relação à régua padrão ficou entre 1 cm e 2 cm. Aplicamos o sensor sonar na tarefa de descrever os dados de posição e tempo relativos ao movimento de um cilindro que desce um plano inclinado num rolamento sem escorregamento, obtendo-se um desvio máximo de 5% em relação ao sensor comercial de referência Vernier.

Palavras chave: Instrumentação, Ensino de Física, Sensor de movimento.

Abstract

This work presents a sonar sensor project for motion studies in experimental physics based on the ultrasound pulse-eco technique. Details of the project from both hardware and embedded software are discussed from its most basic components. Physical tests relating to performance were carried out by comparing this sensor with a professional ruler as well as another sonar sensor, brand Vernier, available at national market. These tests indicate the resolution of our motion sensor is about 1 cm, and absolute error relating to the standard rule stays in the range of 1 cm to 2 cm. Our sensor is also tested by applying it on the task of describing position versus time concerning to the movement of a cylinder descending a tilted plane, rolling without slipping, for the which a maximum deviation of 5% in relation to the Vernier reference sensor is obtained.

Keywords: Instrumentation, Physics education, Motion sensor.

PACS: 74., 74.60.-w, 74.80.Bj

ISSN 1870-9095

1. INTRODUÇÃO

Recentemente, diversos trabalhos [1, 2, 3, 4] têm oferecido novas discussões e reflexões a respeito do importante papel das atividades experimentais na aprendizagem de Ciências. A grande maioria destas reflexões aponta que é necessário buscar renovar tais atividades, fugindo principalmente do ensino tradicional que se dá através de roteiros rígidos que tem por objetivo principal apenas a verificação e comprovação de leis científicas ou até mesmo transmitir a idéia de que a ciência trabalha sempre usando “o método científico” em suas atividades. Uma proposta bastante interessante consiste em estruturar as atividades práticas como verdadeiras investigações propondo guias abertos, reflexivos e bem planejados, com objetivos claros e que levem em conta as idéias prévias dos aprendizes [4].

Na direção de propor um novo cenário para o laboratório didático, o computador pode ser de grande utilidade se usado de forma reflexiva, segundo Borges [4]:

“O uso de laboratório baseado em computador permite que o estudante dedique menos tempo à coleta e apresentação dos dados; com isso, ele dispõe de mais tempo para o controle de outras partes do processo, como o planejamento da atividade, a seleção do que medir, execução da investigação e interpretação e avaliação dos resultados. Além disso, esses recursos permitem a execução de investigações em tempo real, bem como a pronta alteração do planejamento, caso seja necessário, o que freqüentemente é o caso numa investigação.”

Atualmente temos visto o aparecimento de um conjunto de novos instrumentos de medidas especialmente concebidos para uso nos laboratórios didáticos de ensino de Física [5, 6]. Estes instrumentos tem sido projetados

para que seus usos sejam feitos a partir de conexões diretas com o computador, principalmente pela porta serial, pela porta *USB (Universal Serial Bus)* e até mesmo através de conexões sem fio “wireless”[7]. Estes instrumentos didáticos são concebidos, em muitos casos, a partir do uso de técnicas de sensoriamento baseadas em princípios físicos muito bem conhecidos. Paralelamente a isso, o mercado internacional, e até mesmo o mercado nacional, tem disponibilizado módulos preparados a partir de dispositivos eletrônicos analógicos e/ou digitais que podem atuar como sensores úteis para a medição de temperatura, posição, pressão, aceleração, tempo, força,

Sensor Sonar de Movimento para Ensino de Física Experimental entre outros. Estes módulos sensores podem ser comandados por dispositivos eletrônicos chamados *microcontroladores* que além de controlar os diversos módulos ainda podem executar tarefas matemáticas, fazer conversão de sinais analógicos em digitais e enviar e receber informações e comandos de um computador através uma conexão devidamente projetada para tal fim.

Apresentamos neste artigo o projeto de construção de um sensor sonar de movimento para fins didáticos de ensino da cinemática experimental, que utiliza a técnica de pulso-eco de ultrassom para a medida de distâncias e velocidades.

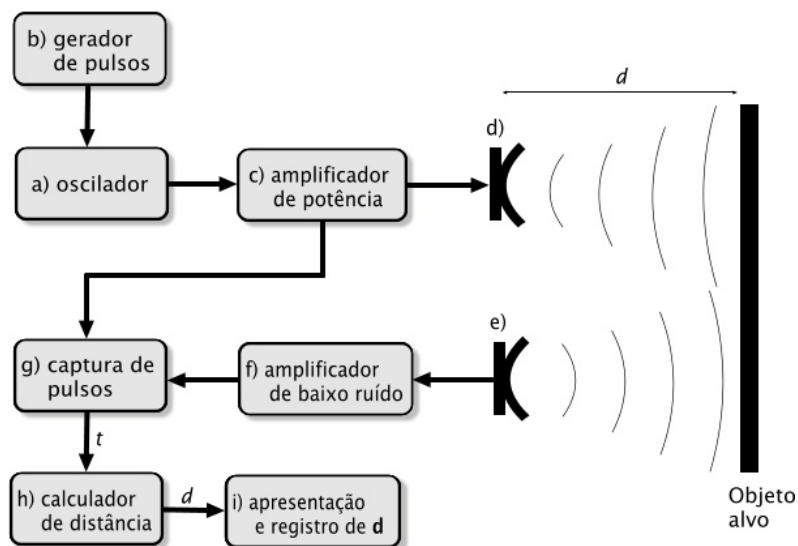


FIGURA 1. Diagrama esquemático do funcionamento de um sistema de medida de distância utilizando a técnica do pulso-eco.

II. A FÍSICA DO SENSOR SONAR

Ultrassom são ondas acústicas longitudinais associadas a vibrações mecânicas que se propagam em um meio material com frequências maiores que 20 kHz. O termo sonar (*SOund NAvigation and Ranging*) refere-se a técnicas que utilizam a propagação do som para localização acústica e medida de distância de objetos alvo [8, 9]. Os sistemas de medida de distância que utilizam ultrassom possuem aplicações em sistemas de segurança, projeto de robôs, monitoramento de nível de líquidos em tanques, determinação de fluxo de fluidos e atividades experimentais em física. As suas principais vantagens são: a relativa simplicidade, o baixo custo do equipamento de medida e a robustez contra certas perturbações externas, tais como fontes de luz, fumaça e interferência eletromagnética.

Sistemas sonar do tipo ativo utilizam uma fonte de ultrassom que é direcionada ao objeto alvo. O método do pulso-eco utiliza um sonar do tipo ativo e consiste na transmissão de pulsos curtos de ultrassom em direção ao alvo. Ao atingir o alvo, o pulso de ultrassom é total ou parcialmente refletido e retorna como uma reflexão (eco), que é detectada em um transdutor receptor. Um sistema

para medida de tempo determina o tempo, t , gasto da emissão do pulso até a detecção do pulso refletido. Conhecendo-se a velocidade de propagação do ultrassom no meio, v_u , pode-se calcular a distância, d , ao objeto que está causando o eco segundo [9]:

$$d = \frac{1}{2} v_u t. \quad (1)$$

Um sistema sonar que utiliza a técnica do pulso-eco utiliza um arranjo experimental mostrado esquematicamente na Figura (1). O sistema [8] consiste de:

- Oscilador gerador de sinais que gera uma tensão alternada com frequência igual à frequência do ultrassom a ser produzido;
- Gerador de pulsos para acionamento periódico do oscilador (a);
- Amplificador de potência, que eleva a potência do sinal gerado pelo oscilador (a) e permite a excitação do transdutor ultrassônico (d);
- Transdutor transmissor ultrassônico, geralmente do tipo piezoelétrico, que transmite o sinal de ultrassom até o objeto alvo;
- Transdutor receptor ultrassônico, geralmente do tipo piezoelétrico, que converte as ondas mecânicas

- provenientes da reflexão no objeto alvo a um sinal elétrico oscilante;
- f) Amplificador de baixo ruído, que amplifica o sinal captado pelo transdutor receptor;
- g) Sistema de captura de pulsos provenientes do amplificador de potência (c) e do amplificador de baixo ruído (f);

- h) Sistema para cálculo da distância, segundo a Eq. (1).
- i) Dispositivo para apresentação e/ou armazenamento das leituras de distância.

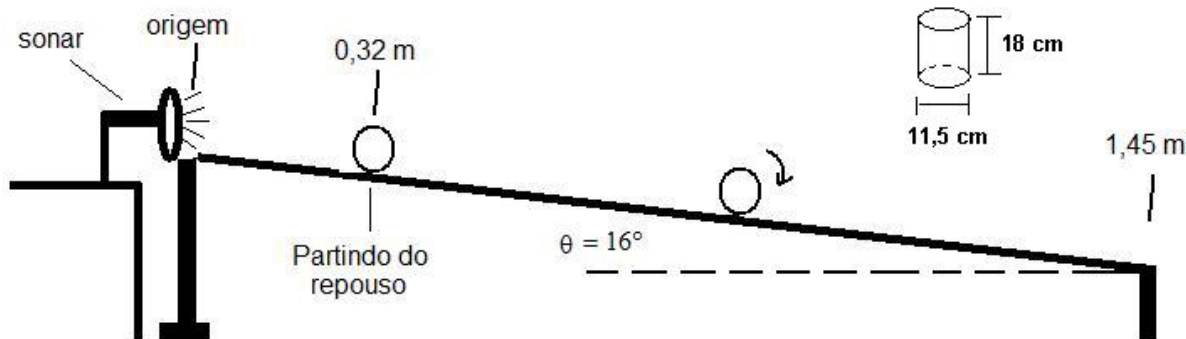


FIGURA 2. Esquema da montagem da experiência de cinemática. O cilindro começa seu movimento a partir do repouso na posição 32 cm desde o marco de referência onde se encontra ora o sensor TATO ora o sensor *GoMotion*. Na parte superior direita da figura encontramos as dimensões físicas do cilindro utilizado na experiência.

Na técnica do pulso-eco, um gerador de pulsos (b) produz pulsos de curta duração (da ordem de algumas dezenas de milissegundos) para uma sucessão de acionamentos do gerador de ultrassom, em geral na frequência de 1 a 50 Hz. O gerador de sinais (a) gera um sinal elétrico alternado, tipicamente de 40 kHz, que é amplificado no amplificador de potência (c) e em seguida transformado em vibrações mecânicas na forma de ultrassom no transdutor eletroacústico ultrasônico (d) [8].

A vibração da superfície do transdutor ultrasônico, causada pela aplicação de uma tensão alternada, transfere energia acústica ao meio de condução, como por exemplo, o ar. Os transdutores ultrasônicos do tipo piezoelétrico são construídos de uma cerâmica ou cristal piezoelétrico, tal como quartzo, que possui a propriedade de produzir vibrações mecânicas em resposta a um pulso de voltagem aplicado, ou produzir uma voltagem em resposta a um stress mecânico aplicado. Esse comportamento permite a aplicação dos transdutores piezoelétricos como transmissores e receptores de sinal de ultrassom. Em alguns instrumentos, os transdutores do tipo transmissor e do tipo receptor podem ser o mesmo dispositivo, operando como transmissores e receptores em momentos diferentes no tempo. Em geral, o oscilador (a) opera na frequência de ressonância do transdutor ultrasônico, o que maximiza a potência de saída do transdutor.

O feixe de energia sonora emitida pelo transdutor transmissor de ultrassom sofre um espalhamento na forma de um cone, à medida que se afasta da fonte de som. O ângulo de abertura do cone de emissão afeta a direcionalidade do feixe de ultrassom, e depende da frequência do ultrassom e do tamanho e outras características construtivas do transdutor. Frequências maiores de ultrassom reduz o ângulo de abertura do feixe, o mesmo ocorrendo quando se aumenta o diâmetro da membrana do transdutor transmissor. Na prática, a

direcionalidade do feixe de ultrassom não é crítica na técnica do pulso-eco, desde que os transdutores para transmissão e recepção de ultrassom sejam mantidos próximos, ou coincidentes, quando somente um transdutor para transmissão e recepção é usado [9].

O método do pulso-eco apresenta como desvantagem inerente a baixa relação sinal ruído no sistema de recepção do sinal refletido, o que se deve à pequena magnitude da energia de cada pulso de ultrassom refletido. É necessário, portanto, um sistema de amplificação do sinal do transdutor detector que possua um ganho relativamente elevado. O amplificador de baixo ruído (f) tem como função elevar a amplitude do sinal captado pelo transdutor receptor (e) mantendo a maior relação sinal/ruído possível. O ganho do amplificador de baixo ruído deve ser ajustado de modo a manter um compromisso adequado entre o alcance do sensor sonar e sua susceptibilidade a detecção de multireflexões por outros objetos no local do experimento e a interferência de fontes de ruído na faixa de frequências do ultrassom.

O sistema de captura de pulsos (g) detecta os sinais transmitidos e recebidos, vindos do amplificador (c) e do amplificador (f), respectivamente, e calcula o tempo, t , entre a transmissão e reflexão do sinal. Esse módulo do sistema consiste em um circuito digital que conta o tempo entre o início do pulso transmitido (em (c)), e o início do pulso refletido (em (f)). O sistema de cálculo de distância, (h), aplica a Eq. (1) utilizando o tempo disponibilizado em (g). Os módulos (g) e (h) podem ser elementos distintos ou um microcontrolador previamente programado para executar ambas as tarefas. Por fim, o sistema (i) é alimentado com as leituras de distância e apresenta os dados em um mostrador numérico ou gráfico e/ou transfere os dados para um computador através de uma interface digital, permitindo o armazenamento das leituras para arquivamento e posterior análise.

A velocidade do som no ar, v_u , utilizada na determinação de d segundo a Eq. (1), é de aproximadamente 340 m/s a 20 °C, e depende de fatores tais como a temperatura, pressão, densidade, umidade e composição química do ar. Dentre esses fatores, a temperatura é o que exerce a maior influência na velocidade do som no ar, que depende da raiz quadrada da temperatura absoluta [9]. Medidas de distância com ultrassom devem, preferencialmente, levar em conta a variação da temperatura ambiente, o que pode ser feito na prática medindo-se a temperatura do ar e depois calculando-se v_u . O método do pulso-eco pode produzir erros de medida de distância devido a fatores que afetam de modo não previsível a velocidade de propagação do ultrassom, como gradientes de temperatura e correntes de ar no caminho do sinal [8].

Os sinais acústicos que percorrem a trajetória do transmissor até o alvo refletor, e depois de volta até o detector sofrem um amortecimento, ou atenuação, devido ao efeito combinado da absorção e espalhamento das ondas de ultrassom. A magnitude da energia do sinal acústico a uma distância l do ponto de emissão, E_l , depende da distância l percorrida pelo sinal, da frequência nominal do ultrassom, f , e das características de absorção do meio no qual o sinal viaja, segundo [9]:

$$E_l = \frac{E_0 \left(e^{-\alpha l} \right)^2}{f l} \quad (2)$$

Em que E_0 é a magnitude da energia no ponto de emissão e α é a constante de atenuação que depende da frequência do ultrassom e do meio no qual o ultrassom se propaga. Segundo a Eq. (2), o aumento da distância da fonte do sinal reduz a magnitude da energia do sinal acústico, o que determina, em parte, um limite de alcance para os sistemas sonar. Para cada pulso gerado em (b) são transmitidos vários ciclos completos da onda de ultrassom, e, idealmente, a detecção do sinal refletido deve ocorrer durante a chegada do primeiro pico da onda de ultrassom em (e). Quando a distância d torna-se grande, mas não o suficiente para a atenuação do sinal impedir totalmente sua detecção, há um aumento da probabilidade da detecção do sinal refletido em uma posição no tempo diferente da correspondente ao primeiro pico da onda de ultrassom, podendo resultar na redução de acurácia da medida de distância. Para levar em conta esse problema em potencial, usualmente os sensores sonar para medida de distância são especificados para operarem a uma distância limite do objeto alvo.

Para uma onda sonora com um único componente de frequência, f , o comprimento de onda, λ , descreve o comprimento de um período da onda sonora, na direção de sua propagação, e é obtido segundo:

$$\lambda = \frac{v_u}{f} \quad (3)$$

Em um sistema sonar que utiliza a técnica do pulso-eco, a

resolução máxima de medida de distância é igual a λ [8]. A utilização de frequências elevadas permite maior resolução das medidas, entretanto o alcance das medidas é reduzido devido à maior atenuação do sinal de ultrassom em razão da maior absorção em frequências mais elevadas, segundo a Eq. (2). Na prática, sistemas sonar de medida de distâncias de até 10 m usualmente utilizam frequências entre 20 kHz e 60 kHz, que representam um compromisso adequado entre o alcance e resolução das medidas.

Quando uma onda sonora atinge a interface entre dois meios de características físicas diferentes, por exemplo, ar e madeira, ela é parcialmente refletida e parcialmente transmitida através da interface. A extensão relativa da reflexão e transmissão da onda sonora depende dos valores de impedância característica, R_a , de cada um dos dois meios em que as ondas se propagam. A impedância característica de um meio é função da densidade do meio, ρ , e velocidade de propagação do som neste meio, v_u , segundo [9]:

$$R_a = \rho v_u, \quad (4)$$

sendo, portanto, independente da frequência do ultrassom. Impedâncias características significativamente diferentes resultam no predomínio da reflexão do ultrassom na interface, o que é desejável na técnica do pulso-eco quando se refere ao objeto alvo. Quando as medidas de distância são feitas no ar e com um objeto alvo sólido, em geral há o predomínio da reflexão, pois as impedâncias características são significativamente diferentes devido à grande diferença de densidade entre o ar e a maioria dos corpos sólidos. Qualquer objeto que possua impedância característica significativamente diferente que o ar pode potencialmente causar reflexão do ultrassom.

III. O PROJETO DO SENSOR SONAR DE MOVIMENTO

Descrevemos a seguir detalhes de um projeto de aplicação de um módulo sonar marca TATO [10] para uso em práticas de ensino de cinemática experimental. Este módulo sonar tem sido utilizado previamente em projetos de medidas de distâncias com o alvo estático [11]. O módulo sonar TATO incorpora internamente as funções dos módulos (a), (b), (c), (d), (e), (f) e (g) representados na Figura (1). Para controle deste sensor e envio dos dados de posição e tempo de um alvo em movimento, utilizamos o microcontrolador *Basic Step -1 OEM* [12], da marca TATO, que tem a função do módulo (h) representado na Figura (1). O apêndice B apresenta mais detalhes técnicos destes componentes. O sensor sonar emite uma onda mecânica na faixa do ultrassom (de 40 kHz) e recebe esta mesma onda após ser refletida no obstáculo mais próximo. O tempo de ida e volta desta onda é contabilizado pelo sensor sonar, o qual envia através de sua saída uma coleção de pulsos de sinais digitais (0 ou 1) onde o tempo em que permanece no sinal alto (1) é igual ao tempo de ida e volta da onda sonora. Este valor aparece expresso em milissegundos para o

microcontrolador. Se quisermos saber qual é a distância do alvo até o sensor, necessitamos dividir este tempo em milissegundos pela metade e depois multiplicá-lo pela velocidade do ultrassom no ar, conforme a Eq. (1). A coleta da informação que o módulo sonar entrega e as manipulações matemáticas acima, em nosso projeto, foram feitas através do microcontrolador *Basic Step -1 OEM* de 8 bits. Este microcontrolador dispõe também de uma base de tempo “timer” que pode ser utilizado para fazer a leitura do tempo entre uma medida e outra entregue pelo módulo sonar. Os dados de tempo e posição que ficam registrados na memória interna do microcontrolador são enviados através da porta serial do nosso computador e lidos na tela deste através de um programa computacional chamado de *232 Analyzer* que pode ser utilizado na versão livre “demo” disponível na internet [13]. O microcomputador e o programa *232 Analyzer* consiste no módulo (i) representado na Figura (1), efetuando a apresentação e registro dos dados. Alertamos que este não é o único programa que faz este tipo de comunicação serial de dados com um microcomputador. Veja mais detalhes no apêndice A deste trabalho.

Abaixo a lista de componentes do projeto:

- Módulo sonar marca TATO;
- Microcontrolador marca TATO modelo *Basic Step -1 OEM*;
- Fonte de corrente contínua estabilizada fornecendo +5 V (nível TTL) para alimentação do sensor sonar e o microcontrolador;
- Placa universal de prototipagem para fixação e interligação dos componentes do projeto;
- Cabo de comunicação serial com conector DB9

fêmea (ver apêndice B);

- Dois resistores de 10 kΩ que podem ser de 1/8 W;
- Um resistor de 100 kΩ que pode ser de 1/8 W;
- Fios rígidos para as diversas interligações dos componentes;
- Computador com interface serial e sistema operacional Windows (ver apêndice A).

No apêndice B, mostramos o esquema de interligação destes componentes.

Em nosso projeto, as medidas do sensor até o alvo são expressas de centímetro em centímetro (nosso intervalo de confiança) por limitações nos testes prévios de desempenho feitos com os componentes do projeto. A seguir, iremos mostrar testes que foram feitos com os componentes acima para estabelecer parâmetros de comparação entre o sonar e uma régua milimetrada profissional visando conhecer as limitações do instrumento. Sabemos que vários aspectos podem ser melhorados, entre eles ativar a correção do valor da velocidade da onda de ultrassom no ar pelo conhecimento da temperatura local. Esta correção será possível ao introduzirmos a leitura de um termômetro pelo microcontrolador e do uso pelo programa computacional de um incremento ao valor de 331 m/s (velocidade do ultrassom a 0°C) de (0,59 vezes (T°C)) m/s, onde (T°C) é a temperatura do ar em graus Celsius. Outra limitação de nosso projeto diz respeito à taxa de leitura do módulo sonar (três leituras por segundo). Esta limitação está diretamente ligada à arquitetura do módulo sensor que utilizamos, e só pode ser superada a partir do uso de outros módulos existentes no mercado, porém com maior custo.

TABELA I. Valores dos coeficientes ajustados numericamente da Eq. (5) aos dados experimentais de posição e tempo utilizados no gráfico da Figura (3).

| Sensor | $X_0 \pm \Delta X_0$ (m) | $v_0 \pm \Delta v_0$ (m/s) | $a_{c.m.} \pm \Delta a_{c.m.}$ (m/s ²) |
|-----------------|--------------------------|----------------------------|--|
| GoMotion | 0,377 ± 0,002 | 0,03 ± 0,03 | 0,160 ± 0,001 |
| Tato (1) | 0,37 ± 0,03 | 0,04 ± 0,03 | 0,156 ± 0,007 |
| Tato (2) | 0,38 ± 0,02 | 0,02 ± 0,03 | 0,157 ± 0,007 |

IV. TESTANDO O SENSOR SONAR

A. Medidas com o alvo estático

Antes de utilizarmos o sensor sonar diretamente em uma prática de cinemática, realizamos um primeiro conjunto de testes de desempenho em medidas com o alvo estático. Estes testes foram realizados comparando os valores das medidas de distância do sonar a um alvo imóvel colocado em posições predeterminadas através de uma régua milimetrada de referência, modelo profissional, marca Trident [14]. Adicionalmente usamos esta mesma sistemática para verificar o desempenho do sensor sonar modelo *GoMotion*, marca Vernier [15]. No teste com o sensor TATO utilizamos o valor de 340 m/s para a velocidade do ultrassom no ar diretamente no programa

computacional (ver apêndice A) que controla o microcontrolador OEM (ver apêndice B). A temperatura ambiente era de 20°C no momento dos testes.

O sensor TATO apresentou sensibilidade aceitável de medida apenas a partir da distância de 22 cm até o alvo estático. Medidas abaixo deste valor foram desconsideradas para nossos propósitos. Na faixa que vai de 22 cm até 60 cm desde o sonar até o alvo, o desvio absoluto das medidas em comparação com a régua *Trident* se manteve constante e igual a 1 cm. Portanto, o desvio percentual esteve entre os limites do intervalo que vai de 4,5% até 9% (para 22 cm) até o valor de desvio mínimo que pode ir de 1,7% até 3,4% (para 60 cm). Os limites superiores dos intervalos apresentados são sempre abertos. Este critério foi adotado, pois pensamos que nosso sensor TATO, ao apresentar desvio absoluto de 1 cm em relação à medida da régua, poderia estar no limite de quase 2 cm sem no entanto

mostrar tal valor por não poder realizar a leitura da distância dentro do intervalo de 1 cm até 2 cm.

Na faixa que vai de 60 cm até 110 cm, o desvio que ocorreu sempre esteve nominalmente abaixo de 1 cm, portanto abaixo da nossa possibilidade de comparação. O valor apontado pelo sonar era idêntico ao valor da régua quando deslocávamos com o alvo de centímetro em centímetro no sentido oposto ao sensor. Neste caso, podemos afirmar que o desvio percentual nunca esteve superior a 1,7 %. Este valor foi tomado na pior hipótese (para o caso de estarmos no limite de 1 cm de desvio) e para a distância de 60 cm. Nas medidas entre 110 cm e 150 cm, a diferença nominal voltou a ser constante e de 1 cm, levando o desvio máximo possível até o valor de 1,8% porém nunca inferior a 0,9%. Acima do valor de 150 cm desde o sonar até o alvo não encontramos sensibilidade de medição aceitável, para nossos propósitos, por parte do sensor TATO. Esse limite de alcance é resultado da atenuação progressiva do ultrassom em função da distância, segundo a Eq. (2).

A frequência de ultrassom utilizada no projeto foi de 40 kHz, o que representa um comprimento de onda de ultrassom de 0,68 cm para propagação no ar com velocidade de 340 m/s. A resolução teórica do sensor sonar deverá ser então igual a este comprimento de onda do ultrassom [8]. A incerteza de cerca de 1 cm nas medidas descritas acima representa, aproximadamente, uma unidade de comprimento de onda do ultrassom, e pode ser considerada como uma estimativa da resolução do sensor sonar.

Na verificação de desempenho do sensor sonar *GoMotion* (limitado a medidas entre 15 cm e 600 cm segundo o próprio fabricante), comparamos seus resultados com as medidas da régua de referência. O sensor *GoMotion* disponibiliza resultados de medida de distância com resolução de 1 mm e acurácia de 2 mm. Utiliza ultrassom de frequência de 50 kHz e corrente de consumo de 51 mA [15].

Adotamos aqui o mesmo critério anterior. Medidas com desvio de 1 mm podem estar no limite de 2 mm maximizando-se assim o valor do desvio. Trabalhamos assim sempre com a pior hipótese. Comprovamos que em toda a faixa de medida testada por nós (entre 15 cm e 150 cm), o maior desvio percentual possível encontrado em relação aos valores medidos pela régua de referência foi de 2% na medida da posição 15 cm. No intervalo entre 15 cm e 30 cm, o desvio diminui de 2% até 1,3%. No intervalo que vai de 31 cm até 150 cm o desvio, mesmo maximizado, sempre esteve abaixo de 1%. Em todos os testes realizados anteriormente visando conhecer o grau de incerteza nas medidas, verificamos desvios típicos de flutuações de medida, ou seja, desvios aleatórios e nunca sistemáticos ou acidentais.

B. Medidas com o alvo em movimento

Propomos a seguir uma experiência de cinemática translacional e rotacional onde medimos a posição da lateral refletora de um cilindro oco, feito de papelão, que desce em rolamento (sem escorregamento) por um plano inclinado conforme mostra a figura (2). Neste experimento

necessitamos, além dos sensores de movimento, o cilindro e o plano inclinado (uma simples bancada de laboratório em nosso caso).

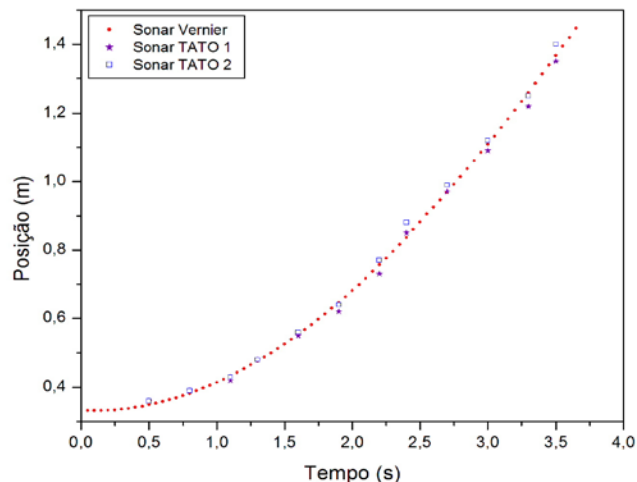


FIGURA 3. Gráfico que compara as medidas de distância e tempo relativas ao movimento de um cilindro que desce rolando um plano inclinado de 16° em relação a direção horizontal. O desvio máximo entre as medidas tomando como referência o sensor *GoMotion* está abaixo dos 5%.

Quando realizamos medidas com sensores tipo sonar, é importante tomar o cuidado com reflexões espúrias que podem atrapalhar. Portanto, retire objetos que estejam próximos à trajetória prevista para o alvo evitando assim que a onda reflita em tais obstáculos e seja percebida indevidamente pelo sonar. Isto acontece até mesmo com móveis ou cadeiras colocadas próximas ao “set” experimental. Uma dica é esvaziar o local ou na impossibilidade, deixar um objeto alvo estático a cerca de 150 cm e movimentar os objetos ao redor para ver se estes estão sendo “percebidos” pelo sonar. Materiais pouco refletoras como roupas (tomadas como alvo) podem dificultar a medida do sonar. Utilize este artifício se não for possível retirar um objeto refletor para longe do “set” de medidas. É importante cuidar também as fontes indesejáveis de ultrassom no ambiente e que trabalham no mesmo intervalo de frequência. Incluímos aí motores, trilhos de ar para experiências de cinemática, computadores e monitores (estes últimos devem ficar a, no mínimo, um metro de distância na retaguarda do sensor). Se o seu ambiente de medidas está repleto de objetos refletoras ou se você não consegue eliminar alguma reflexão espúria persistente, coloque o sonar sobre um pano horizontal (tipo flanela) em frente e abaixo deste. Isso poderá ajudar. Procure trabalhar escolhendo alvos com superfícies refletoras bem regulares evitando assim reflexões irregulares. Múltiplos detectores de movimento podem “conversar” indevidamente se estiverem no campo de sensibilidade e retorno um do outro [15].

Ativamos o sensor TATO e depois soltamos nosso cilindro do repouso. Ao chegar ao final do trajeto, desligamos o sonar e colhemos os dados de posição e

tempo diretamente através da tela de nosso computador. O programa usado para esta visualização foi o *232 Analyzer* (ver apêndice B). Realizamos diversas corridas para o cilindro.

Para fins de comparação, realizamos esta mesma experiência utilizando o sensor sonar *GoMotion* posicionando este no mesmo local do sensor TATO. Os dados colhidos com este sensor foram transmitidos diretamente através da porta *USB* do computador e armazenados numa tabela do programa computacional *Logger Pro 3.6.1* também da Vernier [16]. Este programa permite observar, em tempo real, o gráfico dos pontos coletados (posição e tempo) enquanto o sonar mede.

A figura (3) mostra o gráfico de comparação da medida da posição da lateral refletora do cilindro em sua descida utilizando o sensor TATO e utilizando o sensor Vernier. Como todas as nossas medidas apresentaram flutuações dentro dos valores esperados a partir do estudo expresso na sessão de medidas estáticas, e com vistas a possibilitar melhor visão de comparação entre os dados medidos, divulgamos no gráfico da figura (3) apenas uma medida com o sensor *GoMotion* e duas com o sensor TATO.

O gráfico da figura (3) permite comparação entre o desempenho dos sensores. As medidas feitas com o sensor *GoMotion* representam um bom parâmetro de comparação para o sonar TATO pois além de apresentar menores desvios percentuais em relação a nossa régua de referência, possui boa taxa de medida (até 50 medidas por segundo). Aqui em nossa medida utilizamos a taxa de 20 Hz, ou seja, 20 medidas por segundo. A chave de sensibilidade do sensor *GoMotion* esteve sempre na posição “Track” escolha que minimiza a possibilidade de reflexões espúrias. Na medida da posição do alvo em movimento, pelo gráfico da figura (3) podemos notar que o sensor TATO apresenta certa dispersão em relação ao *GoMotion* mas não chega a representar mais de 5% de diferença para o valor absoluto medido. O sensor *GoMotion* foi tomado como referência aqui.

Através da medida da posição da lateral do cilindro pode-se chegar à medida da posição do centro de massa (c.m.) do cilindro apenas acrescentando a distância do raio do cilindro (5,75 cm) ao valor de posição medido pelo sonar. O c.m. do cilindro que desce o plano inclinado descreve um movimento retilíneo uniformemente variado. Se a partir de nossa prática tivermos o objetivo de encontrar a aceleração translacional, esperada constante, para o c.m. de nosso cilindro podemos proceder a um ajuste numérico de curvas. Para a translação o ajuste é quadrático se o movimento do c.m. é uniformemente acelerado [17], ou seja:

$$X_{c.m.} = X_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a_{c.m.} t^2 \quad (5)$$

Os valores do ajuste e seus respectivos erros numéricos ($\pm \Delta$) foram obtidos com o uso do programa *Origin 6.0*, utilizando o método dos mínimos quadrados, e estão sumarizados na tabela I.

Através dos dados da tabela I para as duas medidas feitas para o sensor TATO, podemos notar que em todas as

três grandezas físicas analisadas (posição, velocidade e aceleração), se somarmos ou diminuirmos o erro numérico do valor encontrado através do ajuste para a grandeza física em questão, estaremos englobando o valor obtido e seu respectivo erro (pelo ajuste numérico) para a mesma grandeza utilizando os dados do sensor *GoMotion*. Os maiores valores de erros numéricos encontrados para os ajustes dos dados do sensor TATO expressam a menor taxa de leitura deste sensor (3 por segundo) e, é claro, a maior dispersão dos dados de posição colhidos através deste sensor.

A criatividade do professor pode ajudar muito na exploração dos conceitos físicos da cinemática a partir do uso do sensor sonar. Por exemplo, podemos inverter a posição do sonar na figura (2) e colocá-lo no ponto final do movimento para ver o novo gráfico de posição do cilindro em função do tempo. Isso deverá reforçar a noção de sistema de referência e sentido do movimento. Podemos forçar o conflito cognitivo, se, por exemplo, pedimos aos alunos que antes da prática façam uma previsão do gráfico que será obtido em cada caso. Também é interessante mudar a inclinação da rampa para ver o impacto da mudança na aceleração do centro de massa do cilindro sobre o gráfico de deslocamento. Em outra prática, usando um corpo que desliza, podemos introduzir e propor modificações no coeficiente de atrito. Monitorar movimentos periódicos através do sonar, por exemplo, movimento de um pêndulo físico, poderá ser muito útil na explicação dos conceitos de período, frequência, amortecimento, amplitude de movimento, energia dissipada, entre outros. O importante é que na escolha da experiência física que se quer estudar, se tenha claro o critério de velocidade do alvo adequado a sensibilidade e limitação do sensor proposto neste projeto. Nosso sensor apenas é capaz de fornecer três leituras de posição por segundo.

V. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A principal finalidade deste trabalho foi detalhar a construção de um sensor sonar de movimento para uso em experiências de física experimental, a partir de componentes eletrônicos que podem ser adquiridos diretamente no mercado nacional por um custo relativamente baixo. Os testes de comparação deste sensor com a régua de referência e com outro sensor sonar comercial atestam a confiabilidade dos dados medidos para uso em experiências com fins meramente didáticos. Quando utilizado diretamente numa experiência de cinemática, nosso sensor foi capaz de medir os dados de posição e tempo apresentando, no máximo, 5% de desvio em relação aos dados de referência medidos através do sensor sonar comercial. Acreditamos que seja útil e muito interessante o uso deste sensor para, além de possibilitar o estudo experimental dos movimentos da Física, envolver os alunos na montagem e replicação deste projeto. Claro que esta proposta de montagem do protótipo deve estar direcionada ao nível de escolaridade adequado de nossos estudantes.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Senhor Octávio Nogueira da equipe de apoio da empresa *TATO EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS LTDA*, pelas dicas de funcionamentos dos produtos aqui utilizados. Agradecemos a Professora Dra. Priscilla Laws da Dickinson College (U.S.A.) pela cedência do sensor sonar *GoMotion* possibilitando medidas importantes apresentadas neste trabalho. Agradecemos a Professora Vania Elisabeth Barlette do Centro Universitário Franciscano (*UNIFRA*) pela cuidadosa revisão desta obra.

REFERÊNCIAS

- [1] Gaspar, A., *Experiências de Ciências Para o Ensino Fundamental*, Editora Ática, São Paulo (2005).
- [2] Haag, R., Araújo, I. S., and Veit, E. A., *Por que e como introduzir aquisição automática de dados no laboratório didático de Física?*, Física na Escola, São Paulo **6**, 89-94 (2005).
- [3] Figueira, J. S., and Veit, E. A., *Usando o Excel para medidas de intervalo de tempo no laboratório de Física*. Revista Brasileira de Ensino de Física, São Paulo **26**, 203-211 (2004).
- [4] Borges, T. A., *Novos Rumos para o Laboratório Escolar de Ciências*, Caderno Brasileiro de Ensino de Física **19**, 9-31 (2002).
- [5]www.vernier.com, consultado em 05 de abril de 2010.
- [6]www.pasco.com, consultado em 05 de abril de 2010.
- [7]www.vernier.com/labequipment/wdss.html, consultado em 05 de abril de 2010.
- [8] Morris, A. S., *Measurement and Instrumentation Principles*, (Butterworth Heinemann, 3th edition, Oxford, 2001).
- [9] Webster, J. G. (Editor), *The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook*, (CRC Press, 1th edition, New York, 1999).
- [10]www.tato.ind.br/files/sonar.pdf, consultado em 05 de abril de 2010.
- [11]<http://revista.pcs.usp.br/n3/r003c002.pdf>, consultado em 05 de abril de 2010.
- [12]www.arneroobotics.com.br/eletronica/basic_step_OEM.htm, consultado em 05 de abril de 2010.
- [13]www.232analyzer.com, consultado em 05 de abril de 2010.
- [14]www.trident.com.br, consultado em 05 de abril de 2010.
- [15]www.vernier.com/probes/motion.html, consultado em 05 de abril de 2010.
- [16]www.vernier.com/soft/lp.html, consultado em 05 de abril de 2010.
- [17] Tipler, P. A., *Física*, volume 1, (Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 2000).
- [18]www.radiopoint.com.br/MICROCONTROLADORES/MicrocontroladoresBASICStep.pdf, consultado em 05 de abril de 2010.
- [19]www.tato.ind.br/files/Tutorial%20BASIC%20Step%201.doc, consultado em 05 de abril de 2010.

- Sensor Sonar de Movimento para Ensino de Física Experimental*
[20]www.tato.ind.br/downloads.asp, consultado em 05 de abril de 2010.
[21]www.verlab.dcc.ufmg.br/media/cursos/.../2009.../comunicacao_serial.pdf, consultado em 05 de abril de 2010.
[22]www.windmill.co.uk/rs232.html, consultado em 05 de abril de 2010.

APÊNDICE A

Na figura (A1), temos a estrutura do conjunto de instruções escritas em TBASIC [18, 19] e enviadas ao microcontrolador *OEM*. A figura também mostra o programa compilador *Basic Step 1.221* [20] que pode ser baixado diretamente do site do fabricante sem custos financeiros. O *Basic Step 1.221* além de compilar as instruções escritas em TBASIC, faz a conexão com o microcontrolador através da porta serial possibilitando a gravação simples e direta sobre o microcontrolador *OEM* (evitando assim gravadores especiais). O programa desenvolvido em nosso projeto utiliza um “loop” que permite a coleta dos dados enviados pelo módulo sonar (comando *Pulsin*), a leitura da base de tempo do próprio microcontrolador (comando *Write*) e o envio destes dados através da porta serial (comando *Serout*).

Devemos escrever o código do nosso programa diretamente na tela principal do programa *Basic Step 1.221* e logo em seguida utilizar o botão de compilação para ter certeza que o programa entende suas instruções e que não existe nenhuma correção a fazer em termos da sintaxe correta. Após isso, é necessário utilizar o botão “download” que grava diretamente no microcontrolador o conjunto de instruções que você escreveu. Finalizada esta etapa, devemos fechar o programa *Basic Step 1.221* e retirar o fio 2 (RX dado) que vem do conector DB9 para a porta 16 do *OEM* e colocá-lo na porta 13 que corresponde ao PIN7 do mesmo microcontrolador (ver figura (B1)) para receber os dados pela porta serial. Ao fechar o programa *Basic Step 1.221* você desocupa a porta serial para que o programa *232 Analyzer* possa ser usado na mesma porta de comunicação. É importante lembrar sempre de desligar a alimentação de +5 V antes de desconectar e reconectar o fio 2 (RX dado) do microcontrolador *OEM*. Esta troca de conexão serve para possibilitar o uso do comando “Serout” do *TBASIC*. Quando o *232 Analyzer* for ativado e o conjunto dos componentes do projeto for alimentado, os dados de posição e tempo aparecerão na tela do computador. O uso deste programa de comunicação serial pode se dar de forma simples se apontamos corretamente a porta de comunicação do computador e depois acertamos a taxa de transmissão de sinal por “bit” de dados que no caso do nosso projeto ocorreu a 2400 dados por segundos. Importante ainda atentar as seguintes condições solicitadas pelo programa *232 Analyzer*: Data (8), Parity (none) e configurar para o aparecimento dos dados pelo formato numérico decimal.

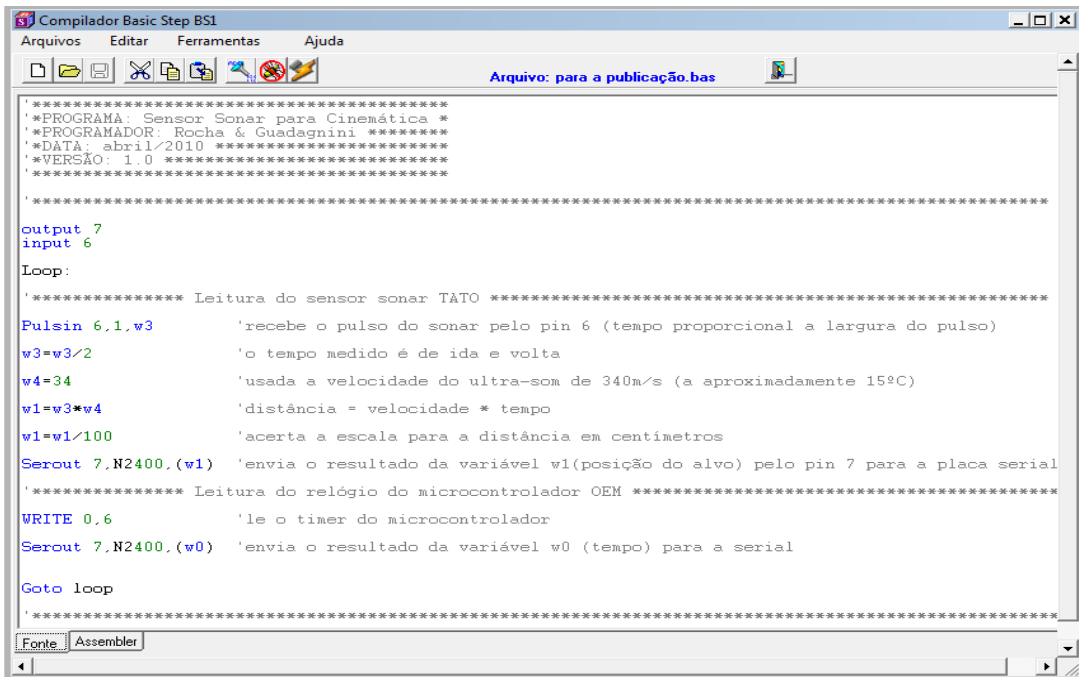


FIGURA A1. Tela principal do programa computacional *Basic Step 1.221*, onde se pode ver o código do programa usado para dar instruções ao microcontrolador *Basic Step-1 OEM*.

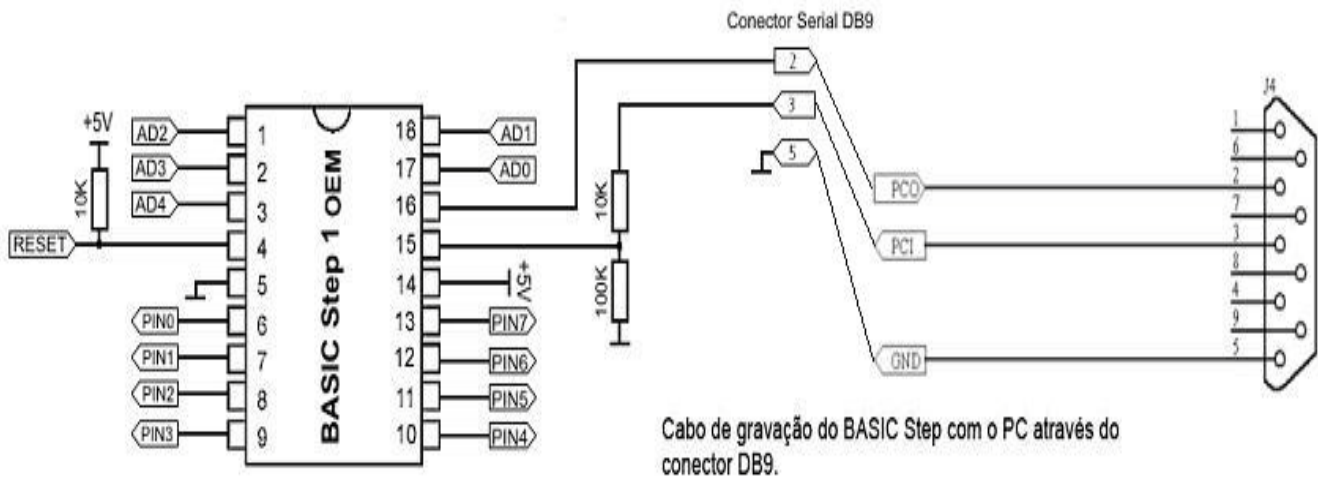


FIGURA B1. Mapa de informações que permite entender as ligações entre o conector DB9 e o microcontrolador *OEM*. Importante não se esquecer de interligar o terra do cabo DB9 ao terra do módulo sonar, ao terra do microcontrolador *OEM* e ao terra da fonte de alimentação do circuito. Figura adaptada do site do fabricante do *Basic Step-1 OEM*.

O *232 Analyzer* não é único programa computacional disponível para comunicação serial e existem formas alternativas para a coleta dos dados [21]. A literatura na internet aponta que é possível, inclusive, utilizar uma rotina escrita em *Visual Basic* (Microsoft) para uso dentro do programa *Excell* (Microsoft) possibilitando receber e plotar os dados recebidos da serial em tempo real [22]. Este rotina ainda não foi testada pelos autores deste projeto.

APÊNDICE B

A comunicação entre o computador e o microcontrolador é estabelecida fisicamente através de um cabo serial que pode ser preparado por você mesmo para tal fim. Na porta serial, o pino 2 (RX dado) permite a recepção de dados e o pino 3 (TX dado) permite a transmissão de dados. O pino 5 é o pino terra (GND). A ligação do cabo serial DB9 com o microcontrolador *OEM* pode ser visto na figura (B1). Você poderá adaptar o cabo serial de um mouse antigo para esta

comunicação, ou adquirir um conector DB9 fêmea em uma empresa especializada em componentes eletrônicos. Para isso utilize apenas os fios 2, 3 e 5 (figura (B1)) e despreze os demais.

O microcontrolador *Basic Step OEM* foi adquirido ao preço de R\$ 29,00 diretamente pelo site do fabricante. Este microcontrolador possui encapsulamento tipo DIP 18, 8

linhas de I/O bidirecionais programáveis independentemente, 5 entradas analógicas (conversores AD), 256 bytes de memória de programa *EEPROM*, 16 bytes de memória RAM e *Clock* interno de 8 MHz. O esquema de ligações deste dispositivo eletrônico está mostrado na figura (B1).

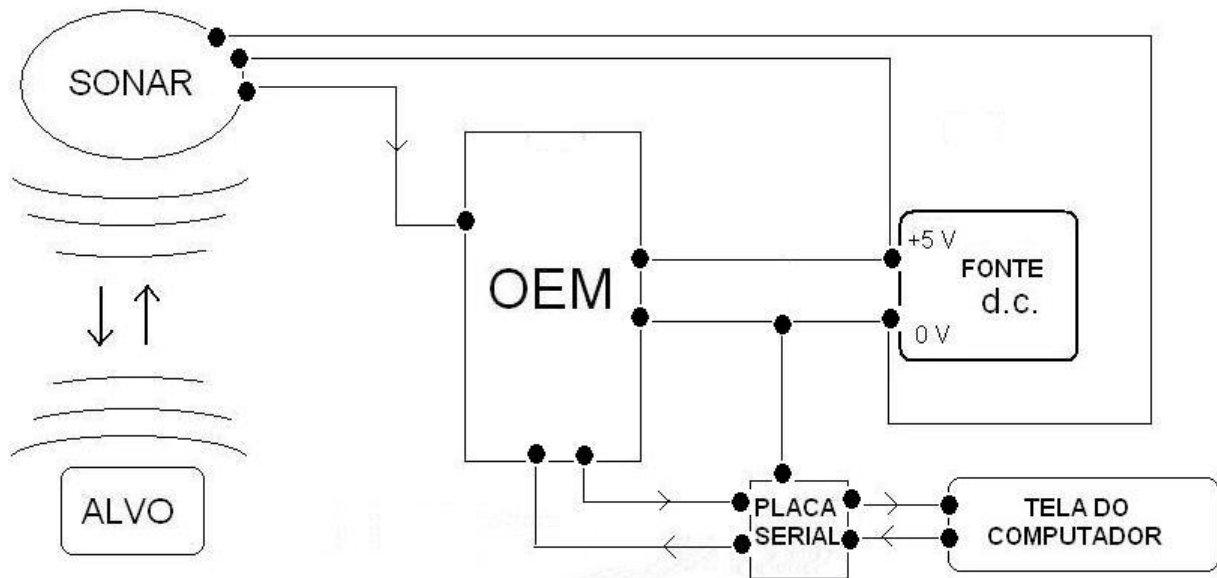


FIGURA B2. Diagrama de blocos que identifica as principais interligações entre os componentes do projeto de construção do sensor sonar.

O módulo sonar foi adquirido da TATO Equipamentos Eletrônicos Ltda ao preço de R\$ 50,00. Este módulo tem quatro 4 pinos com as seguintes funções: dois de alimentação (+5 V e 0 V do terra), um pino de saída que envia um pulso cuja duração é igual o tempo que o som leva para ir até o alvo e voltar ao módulo e possui também um pino de entrada que, quando em nível baixo (0V) ou

desligado, repete a medição indefinidamente. Segundo informa o fabricante, o sensor tem uma corrente de consumo médio de 2 mA, o alcance mínimo é de 20 cm e máximo de 1,5 metros. A figura (B2) mostra o mapa de ligações elétricas entre os componentes do projeto.