

Um barco a vela pode ser propulsionado por um ventilador solidário ao barco que sopra em sua vela?⁺*

*Fernando Lang da Silveira*¹

*Antonio Endler*²

*Eloir de Carli*³

Instituto de Física – UFRGS

Porto Alegre – RS

I. Introdução

A questão sobre o barco à vela, propulsionado por um ventilador solidário ao barco que sopra contra a vela, é recorrente na literatura de Física, constando também de questões em concursos vestibular à universidade. À guisa de exemplo, segue uma questão do concurso vestibular de 2006 da UFPEL⁴. A resposta considerada correta no concurso é a alternativa d.

*Um pescador possui um barco a vela que é utilizado para passeios turísticos. Em dias sem vento, esse pescador não conseguia realizar seus passeios. Tentando superar tal dificuldade, instalou, na popa do barco, um enorme ventilador voltado para a vela, com o objetivo de produzir vento artificialmente. Na primeira oportunidade em que utilizou seu invento, o pescador percebeu que o barco não se movia como era por ele esperado. **O invento não funcionou!** (grifo nosso).*

⁺ Would it be possible to propel a sailboat by using a fan on it and blowing the wind into the sails?

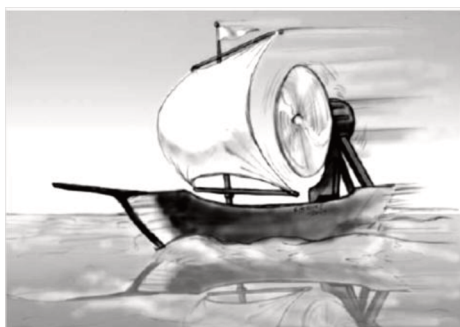
^{*} *Recebido: novembro de 2013.
Aceito: setembro de 2014.*

¹ E-mail: lang.ez@terra.com.br

² E-mail: a.endler@gmail.com

³ E-mail: eloir.carli@ufrgs.br

⁴ Disponível em: <http://ces.ufpel.edu.br/vestibular/download/2006/prova_2006v_2.pdf>. Acesso em: 22 ago. 2013.



A razão para o não funcionamento desse invento é que:

- a) a força de ação atua na vela e a de reação, no ventilador.*
- b) a força de ação atua no ventilador e a de reação, na água.*
- c) ele viola o princípio da conservação da massa.*
- d) as forças que estão aplicadas no barco formam um sistema cuja resultante é nula.*
- e) ele não produziu vento com velocidade suficiente para movimentar o barco.*

Em uma apresentação da disciplina de Física Geral I da IFGW da UNICAMP encontra-se a questão seguinte⁵, cuja alternativa indicada como correta é a alternativa a.

Um físico tenta impulsionar um barco a vela ligando um ventilador a pilha direcionado à vela do barco (o físico está dentro do barco).

Assinale a alternativa correta:

- A. O sistema não funcionará, pois todas as forças são internas, e, portanto, $a_{cm}=0$.*
- B. O sistema funcionará (porém com baixa eficiência) devido ao consumo de energia química do ventilador, que por conservação de energia se converte em energia cinética do barco.*

Muitos outros exemplos existem negando a possibilidade de um barco ser propulsionado dessa forma. A aquisição de momento linear pelo barco, com a mesma orientação daquele que o ar ganhou ao sair do ventilador, é considerada impossível⁶.

Vale lembrar que no famoso filme *cult* de ficção de 1968, *Barbarella*, dirigido por Roger Vadim e tendo Jane Fonda no papel de heroína, mostra um veículo movido em acordo com o proposto nos problemas referidos.

Demonstra-se a seguir que um barco (ou um veículo sobre rodas) pode ser propulsionado por um ventilador que, soprando contra sua vela o impulsiona no mesmo sentido do fluxo do ar que sai do ventilador. Evidências experimentais mostram que o interessante efeito

⁵ Disponível em: <<http://sites.ifg.unicamp.br/f128/files/2012/10/Aula-9.pdf>>. Acesso em: 22 ago. 2013.

⁶ Este texto já estava redigido quando tomamos conhecimento que, no concurso vestibular de 2014 da Universidade de Pernambuco, a questão 4 da prova de Física abordou o problema (<<http://p.download.uol.com.br/jc/VESTIBULAR2DIA.pdf>>. Acesso em 19 mai. 2014), sendo dada como correta a afirmação da impossibilidade do barco se mover.

de fato ocorre. Inicia-se por explicitar os equívocos dos raciocínios que conduzem à negação do de tal possibilidade.

II. Raciocínios equivocados

Uma razão para se negar a possibilidade de um barco ser propulsionado pelo ventilador que joga ar sobre sua vela está explícita na alternativa da resposta indicada como correta na apresentação de Física I do IFGW da UNICAMP ou ainda na questão do concurso vestibular da UFPEL: todas as forças são internas ao sistema barco-vela-ventilador e, portanto, em acordo com a 3ª Lei de Newton, a força resultante no sistema barco-vela-ventilador é nula.

A alternativa dada como correta na questão da UFPEL argumenta que “*as forças que estão aplicadas no barco formam um sistema cuja resultante é nula*”. Ora, ainda que se desprezem as forças realizadas pela água, a totalidade das forças exercidas teria necessariamente uma resultante nula se os agentes de cada uma das forças fizessem parte do sistema barco-vela-ventilador. Entretanto, tanto a força que o ventilador sofre quanto a força exercida sobre a vela tem como agente o ar e, portanto, como o ar é externo ao sistema barco-vela-ventilador, pode a força resultante sobre este sistema (barco-vela-ventilador) não ser nula.

Ao argumentar que “*o sistema não funcionará, pois todas as forças são internas, e, portanto, $a_{cm}=0$* ”, incorre-se no mesmo erro se o sistema abrange o barco, a vela e o ventilador, excluindo-se o ar do sistema. Se o sistema incluir também o ar, então, a aceleração do centro de massa do sistema é nula, mas nada impede que cada parte do sistema (ar e barco-vela-ventilador) modifique seu momento linear, enquanto o momento linear total permanece inalterado.

Outra possível razão para a resposta errada parece ser a de que o sistema barco-vela-ventilador transfere momento linear para o ar através do ventilador e recebe do ar, ao incidir na vela, no máximo o mesmo momento linear em módulo. Se a máxima transferência de momento linear do ar para a vela fosse igual àquela recebida pelo ar do ventilador, então de fato o barco não poderia ser propulsionado no mesmo sentido do fluxo de ar sobre a vela.

Um dos autores do presente texto discutiu por correio eletrônico com um amigo, autor de livros didáticos de Física para o ensino médio, aliás, livros excelentes. Em seu livro, ele admitia a possibilidade de o barco se movimentar, entretanto, nunca no sentido pretendido; quando a incidência do ar sobre a vela fosse normal à vela, o barco ficaria parado, segundo o autor. Nesta discussão, foi-lhe ponderado o seguinte:

O equívoco do teu raciocínio parece ser o de considerar que a colisão do ar na vela não pode transferir mais momento linear do que o ar recebeu do ventilador. Entretanto, em uma colisão, há a possibilidade de transferir até o dobro do momento do corpo para o alvo. Tal se concretiza quando o corpo é refletido elasticamente pelo alvo, retornando com a mesma velocidade em módulo que o corpo possuía antes da colisão.

O autor do livro didático havia adotado a premissa falsa sobre a máxima transferência de momento linear (conforme ele mesmo reconheceu posteriormente) e todo o seu raciocínio subsequente ficou comprometido, levando-o a demonstrar a impossibilidade do efeito.

III. O barco pode se mover no sentido pretendido!

Argumentamos nesta seção que o barco pode se mover no sentido pretendido, no sentido do fluxo de ar que sai do ventilador em direção à vela.

Consideremos que o nosso grande sistema seja constituído de duas partes, uma partícula de ar e o sistema barco-vela-ventilador (S_BVV), ambos inicialmente em repouso no sistema de referência da Terra. Desta forma, o momento linear do grande sistema – que inclui a partícula de ar e a totalidade do barco – é nulo. Consideremos adicionalmente que tal grande sistema não sofre influências externas. Então, graças à interação do ar com o ventilador a partícula de ar é lançada em direção à vela com velocidade \vec{V} de acordo com a Fig. 1, enquanto o S_BVV recua com velocidade \vec{W} , mantendo o momento linear total do grande sistema nulo. No Apêndice equacionamos em detalhe esta situação.

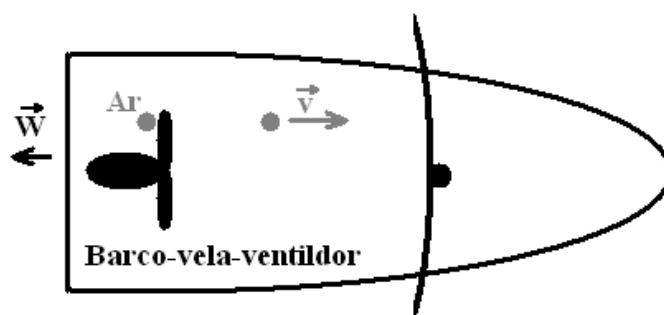


Fig. 1 – Grande sistema constituído por uma partícula de ar e o sistema barco-vela-ventilador.

Ao colidir com a vela a partícula de ar é refletida e retorna com velocidade \vec{u} , adquirindo na reflexão um momento linear orientado para a esquerda no sistema de referência da Terra. Como o momento linear do grande sistema não se altera (continua sendo nulo) a outra parte do sistema adquire um momento linear orientado para a direita e, portanto, o S_BVV se move para a direita de acordo com a Fig. 2.

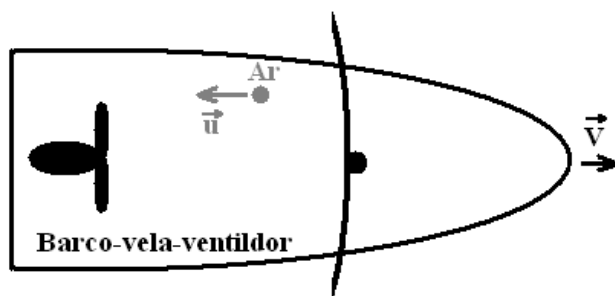


Fig. 2 – O ar retorna após ser refletido pela vela e o sistema barco-vela-ventilador se move para a direita.

Para que o SB_VV não se movesse no final desse processo, a partícula de ar também deveria estar em repouso, pois o momento linear do grande sistema continua nulo e, se o momento de uma das duas partes é nulo, o momento da outra parte também deve ser nulo. Portanto, a colisão do ar com a vela deveria ser completamente inelástica e, então, ela e o S_BVV estariam em repouso.

Entretanto a colisão da partícula de ar com a vela é parcialmente elástica (a partícula de ar não é incorporada à vela), determinando que ela se mova, entre outras possibilidades, para a esquerda, sendo, portanto, impossível que o S_BVV permaneça em repouso na ausência de outras forças externas a ele. Se após a reflexão da partícula de ar na vela o barco ficasse em repouso (como os raciocínios equivocados da seção anterior afirmam) o momento linear do grande sistema não seria mais nulo e estaria ocorrendo uma violação da Lei de Conservação do Momento Linear.

Discutiremos a seguir a possibilidade de o barco permanecer em repouso após a colisão de muitas partículas de ar na vela.

Consideremos duas partículas de ar com a mesma massa sendo lançadas contra a vela conforme a Fig. 3. A vela possui um furo e uma das partículas passa enquanto a outra é refletida. Neste caso, o S_BVV não terá momento linear no final do processo se a partícula que colide com a vela retorna com a mesma velocidade em módulo. Desta forma o momento linear do grande sistema será nulo já que o momento linear total das duas partículas de ar é nulo após incidência na vela.

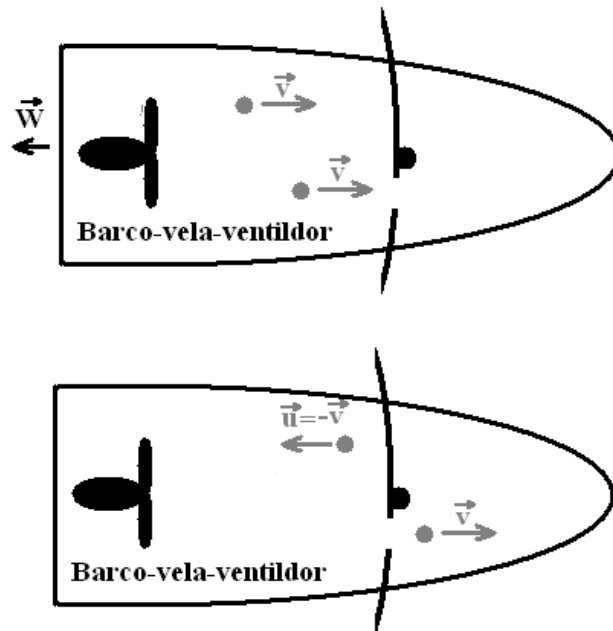


Fig. 3 - O barco com a vela furada pode não ser propulsionado.

Outra possibilidade para o S_BVV ficar parado sob a incidência do ar na vela se dá quando o ar (muitas partículas) é espalhado integralmente em direções diversas de tal forma que o momento linear total do ar seja nulo após a colisão com a vela. A Fig. 4 representa esta possibilidade com apenas duas partículas de ar.

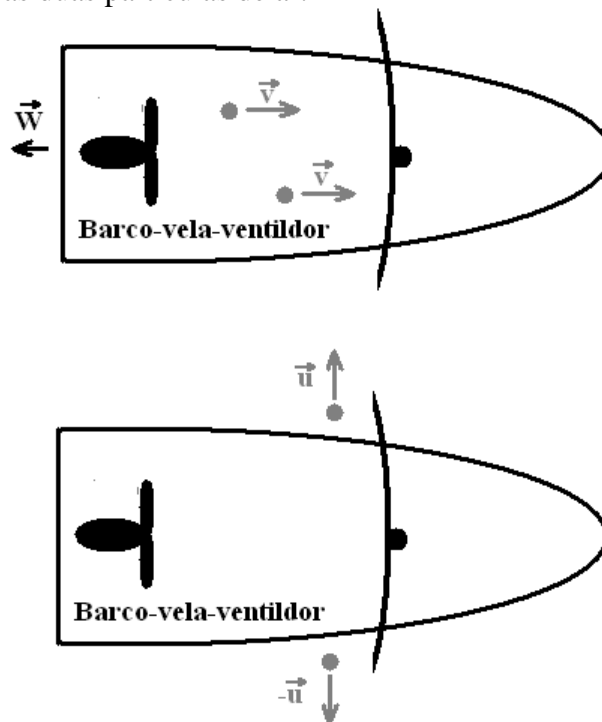


Fig. 4 – O espalhamento do ar na vela pode determinar que o barco não seja propulsionado.

Outra maneira de se concluir que o barco pode ser propulsionado no sentido do fluxo de ar que sai do ventilador em direção à vela está em reconhecer que a força que o ar faz no ventilador, mesmo tendo sentido contrário à força que o ar faz na vela, pode ter intensidade menor do que aquela que ele aplica à vela quando é refletido. Dependendo de como seja a colisão do ar na vela, poderá o ar transferir mais momento linear ao barco do que ele recebeu do ventilador, determinando, então, que as duas forças que o ar exerce, respectivamente, no ventilador e depois na vela, tenham efeito não nulo.

Sintetizando, para que o barco, inicialmente em repouso e livre das ações externas (exceto aquelas que o ar pode exercer), não ganhe momento linear, o ar que interagiu com o sistema S_BVV deverá possuir um momento linear total nulo após a interação. Caso o momento linear total do ar após a interação com o S_BVV não seja nulo, o barco terá necessariamente um momento linear não nulo, podendo se mover no sentido do fluxo de ar que emerge do ventilador.

IV. O carrinho com vela e ventilador se move!

Idealizamos e concretizamos um sistema constituído por um carro com vela e ventilador que de fato se move no sentido do fluxo de ar que atinge a vela⁷.

V. Conclusão

O problema do barco à vela com ventilador é mais complexo do que imaginam aqueles que equivocadamente negam a possibilidade de o barco se mover. A propulsão do barco à vela com ventilador é uma excelente ilustração da Terceira Lei Newton e da Lei de Conservação do Momento Linear de um sistema.

O nosso amigo, autor de excelentes livros de ensino médio, reconheceu o equívoco da sua afirmação sobre a impossibilidade do efeito e comentou:

Fico-lhe grato pelas explicações, não tem coisa pior do que ideias aceitas sem reflexão, por que todo mundo diz. É a maior armadilha pra quem escreve livros didáticos; tenho fugido de muitas delas, mas é muito conteúdo para pouco autor... Acho que mais umas três ou quatro edições, se ainda estiver vivo, corrijo tudo.

Cabe destacar que em outro excelente livro de ensino médio, o livro do GREF, encontramos o problema corretamente equacionado⁸. Entretanto, em uma edição de 1990, a solução estava equivocada, afirmando, então, a impossibilidade do efeito.

⁷ O vídeo documentando o efeito está disponível em:

<http://www.youtube.com/watch?v=fs7gXW6AHjc>. Acesso em 23 ago. 2013.

Encontramos, também, o problema corretamente equacionado, embora com solução menos detalhada do que a nossa, em Jargodzki e Potter (2001).

Os Mythbusters testaram o efeito em escala real com um barco à vela. Apesar de confirmarem a propulsão conforme o pretendido, constataram que a dirigibilidade do barco era precária⁹.

Os reversores do fluxo de gás que sai da turbina dos aviões, usados para a frenagem dos aviões, podem ser encarados como uma “vela”, solidária ao avião, que recebendo o jato de gás o reflete no sentido necessário à frenagem e, portanto, produzem uma aceleração no avião orientada no mesmo sentido do jato de gás que emerge da turbina.

Finalmente, indicamos a discussão ocorrida com diversos colegas sobre o tema¹⁰.

Referências

JARGODZKI, C. P.; POTTER, F. **Mad about Physics** – Brainwisters, paradoxes and curiosities. New York: Wiley, 2001.

Apêndice

Desenvolve-se a seguir o detalhamento do processo de propulsão do sistema barco-vela-ventilador quando há a interação com uma partícula de ar. Ao interagir com uma partícula de ar o ventilador lhe confere uma velocidade \vec{v} em relação à Terra. Considera-se o grande sistema constituído pela partícula de ar e o barco-vela-ventilador livre de ações externas. Portanto, como antes da interação todas as partes estavam em repouso em relação à Terra, após a impulsão do ar pelo ventilador o barco recua com velocidade \vec{W} de acordo com a Fig. 1.

Admitindo-se que o grande sistema está livre de ações externas (ou que elas se anulem) o seu momento linear total é nulo antes e depois da interação do ar com o ventilador. Portanto

$$M\vec{W} + m\vec{v} = \vec{0}, \quad (1)$$

onde M é massa do sistema barco-vela-ventilador e m é massa da partícula de ar.

A seguir, a partícula de ar colide com a vela. Após a colisão a sua velocidade é \vec{u} e a velocidade do sistema barco-vela-ventilador é \vec{V} , conforme a Fig. 2. O momento linear total do sistema continua nulo, portanto

⁸ Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=O75bMA7KxeAC&pg=PA250&lpg=PA250&dq=barco#v=onepage&q=barco&f=false>>. Acesso em: 23 ago. 2013.

⁹ Disponível em: <<http://www.youtube.com/watch?v=uKXMTzMQWjo>>. Acesso em: 23 ago. 2013.

¹⁰ Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/cref/?area=questions&id=383>>. Acesso em: 23 ago. 2013.

$$M.\vec{V} + m.\vec{u} = \vec{0}. \quad (2)$$

As velocidades antes e depois da interação do ar com a vela cumprem a bem conhecida condição

$$\vec{V} - \vec{u} = -\varepsilon.(\vec{W} - \vec{v}), \quad (3)$$

na qual ε é o coeficiente de restituição na colisão do ar com a vela.

Da expressão (1) decorre que

$$\vec{W} = -\frac{m}{M}.\vec{v}. \quad (4)$$

Da expressão (2) decorre que

$$\vec{u} = -\frac{M}{m}.\vec{V} \quad (5)$$

A substituição de (4) e (5) em (3) fornece finalmente

$$\vec{V} = \varepsilon.\frac{m}{M}.\vec{v}. \quad (6)$$

Desta forma, a expressão (6) implica que o sistema barco-vela-ventilador terá velocidade nula se $\varepsilon = 0$, isto é, quando a colisão da partícula de ar na vela configurar-se como completamente inelástica. Para $\varepsilon > 0$ (colisão parcialmente inelástica) ou $\varepsilon = 1$ (colisão elástica), a velocidade do sistema barco-vela-ventilador tem a mesma orientação da velocidade do fluxo do ar que sai do ventilador.