UMA APLICAÇÃO DO CONCEITO DE MASSA-REDUZIDA EM PROBLEMAS DE ENERGIA

A APPLICATION OF THE CONCEPT OF REDUCED MASS IN ENERGY PROBLEMS

10.36977/ercct.v21i1.357

Artigo Original

Felipe Costa Melo Cunha[1]

https://orcid.org/0000-0003-3826-6077

Francisco Tadeu de Carvalho Belchior Magalhães[2]

https://orcid.org/0000-0003-3997-3312

RESUMO

O presente trabalho traz uma abordagem quantitativa, que pretende ao mesmo tempo ser didática e simplificada, mostrando aplicações do conceito de massa reduzida em problemas de física envolvendo energia em um sistema isolado com dois corpos. Mediante uma revisão de literatura na área verificou-se a deficiência de tal análise em materiais didáticos. Buscando contribuir com tratamentos do tipo, este trabalho propõe uma simplificação do conceito de massa-reduzida e faz sua aplicação em problemas de dois corpos envolvendo energia. Tal abordagem pretende ser útil aos professores em seu exercício profissional, mostrando uma alternativa para abordagens didáticas em sala de aula.

Palavras-chave: Energia. Massa-reduzida. Problemas de física.

Essentia
Revista de Cultura, Ciência e Tecnologia
www.uvanet.br/essentia

Recebido em: 30 /04/2020

Aprovado em: 20/06/2020

Autor para correspondência:

Felipe Costa Melo Cunha

Rua Caio Cid, 262, Torre 1, apt 1803, Engenheiro Luciano Cavalcante, Fortaleza, CE, Brasil. CEP: 60.811-150.

E-mail: felipe22fcmc@gmail.com

Copyright (c) 2020 Essentia - Revista de Cultura, Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual Vale do Acaraú
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

[1] Docente do Curso de Física. Mestrando em Ensino de Física pela Universidade Federal do Ceará - UFC. Instituto Federal do Ceará, *campus* Tauá. Tauá, Ceará, Brasil. E-mail: felipe22fcmc@gmail.com

[2] Docentes do Curso de Física. Doutorando em Engenharia em Teleinformática pela Universidade Federal do Ceará - UFC. Instituto Federal do Ceará, *campus* Sobral. Sobral, Ceará, Brasil. E-mail: carvalho.tadeu@gmail.com

ABSTRACT

The present work brings a quantitative approach that aims at the same time to be didactic and simplified, showing applications of the concept of reduced mass in physics problems involving energy in an isolated system with two bodies. Through a literature review in the area, the deficiency of such analysis in didactic materials was seen. Seeking to contribute to treatments of this type, this work proposes a simplification of the concept of reduced mass and makes its application in problems of two bodies involving energy. Such an approach can be useful to teachers in their professional practice, showing an alternative to didactic approaches in the classroom.

Keywords: Energy. *Mass-reduced. Physics problems.*

INTRODUÇÃO

Muitos estudantes possuem certa insegurança e desconforto ao se depararem com problemas de física envolvendo dois corpos, conforme apresentado por TARSIA (1997) e HAGA (2008). Tais obstáculos estão presentes em diversos ramos da física, desde a correção da massa finita na análise dos postulados de Bohr, como duas estrelas em um sistema de estrelas binárias, dois corpos em uma colisão, o elétron e o próton em um átomo de hidrogênio, os dois átomos de uma molécula diatômica, dentre outros, estudados em CUNHA (2017). O objetivo dessa pesquisa é propor uma simplificação do conceito de massa-reduzida e fazer sua aplicação em problemas de dois corpos envolvendo energia. Para isso, é necessária uma análise do centro de massa do sistema e da velocidade relativa entre os corpos, considerando uma situação livre de atrito na qual as interações gravitacionais são desprezíveis.

DESENVOLVENDO A EXPRESSÃO DE ENERGIA ENVOLVENDO MASSA REDUZIDA

Considere, por exemplo, dois corpos de massas m_A e m_B, os quais se movem ao longo do mesmo eixo x e em mesmo sentido com respectivas velocidades v_A e v_B, conforme a figura. O eixo está contido em um plano horizontal e liso.

Figura 1 - Dois corpos de massas m_A e m_B com suas respectivas velocidades v_A e v_B ao longo do eixo x.

Fonte: Própria.

Perceba que a energia total do sistema em relação à origem O é dada por:

$$E = \frac{1}{2} m_A v_A^2 + \frac{1}{2} m_B v_B^2 \quad (1)$$

Porém, a velocidade do centro de massa (v_C) desse conjunto e a velocidade relativa (v_R) entre os corpos podem ser expressa por:

$$v_C = \frac{m_A v_A + m_B v_B}{m_A + m_B} \quad (2)$$

$$v_R = v_A - v_B \quad , \quad v_A > v_B \quad (3)$$

Logo, vamos escrever a energia do sistema em relação ao centro de massa.

Da equação (3) temos,

$$v_A = v_R + v_B$$

que substituindo na equação (2),

$$v_C = \frac{m_A (v_R + v_B) + m_B v_B}{m_A + m_B} \quad (4)$$

a qual pode ser organizada para encontrar v_B em função da velocidade do centro de massa do sistema e da velocidade relativa como,

$$v_B = v_C - \frac{m_A v_R}{m_A + m_B} \quad (5)$$

Caso seja realizado o mesmo processo agora para v_A, da equação (3) $v_B = v_A - v_R$, que substituindo na equação (2), temos:

$$v_C = \frac{m_A v_A + m_B (v_A - v_R)}{m_A + m_B} \quad (6)$$

É possível que seja rearranjada para relacionarmos v_A à velocidade do centro de massa do sistema e a velocidade relativa entre os corpos dados. Desta forma, com um pouco de manipulações algébricas, teremos

$$v_A = v_C + \frac{m_B v_R}{m_A + m_B} \quad (7)$$

Nesta ocasião, escreveremos a energia substituindo a equação (5) e a equação (7) na equação (1):

$$E = \frac{1}{2}m_A\left(v_C + \frac{m_B v_R}{m_A+m_B}\right)^2 + \frac{1}{2}m_B\left(v_C - \frac{m_A v_R}{m_A+m_B}\right)^2 \quad (8)$$

Desenvolvendo e organizando os termos da equação anterior, encontramos:

$$E = \frac{1}{2}(m_A + m_B)v_C^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{m_A m_B}{m_A+m_B}\right)v_R^2 \quad (9)$$

Considere M a soma das massas dos corpos A e B e, μ a massa reduzida desse sistema envolvendo os dois corpos:

$$M = m_A + m_B \quad (10)$$

$$\mu = \frac{m_A m_B}{m_A+m_B} \quad (11)$$

Reescrevendo:

$$E = \frac{1}{2}Mv_C^2 + \frac{1}{2}\mu v_R^2 \quad (12)$$

O termo "massa reduzida" recebe esse nome, pois caso os dois corpos tenham o mesmo valor de massa $(m_A = m_B = m)$, o valor de μ será menor que cada um deles, individualmente. A mesma expressão é desenvolvida através das leis de Newton em NUSSENZVEIG H. (2013) e TAYLOR (2005).

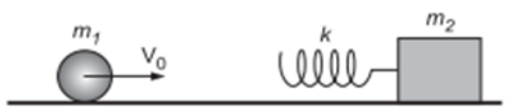
APLICAÇÃO

Seguidamente, um problema será apresentado bem como sua solução tradicional e, em seguida, outra resolução, com a aplicação da massa reduzida.

Problema

Considere uma pequena esfera de massa com velocidade inicial que colide com um sistema massa-mola, de massa e constante elástica , inicialmente em repouso sobre uma superfície sem atrito, conforme ilustra a Figura 2. Dito isto, determine a compressão máxima da mola, considerando sua massa desprezível.

Figura 2 - Uma esfera de massa m_1 é lançada com velocidade inicial V_0 em direção ao bloco de massa m_2 acoplado a uma mola de constante elástica k está em repouso.



Fonte: CAHN et al. (1994)

Solução tradicional

O sistema descrito anteriormente se encontra sujeito apenas a atuação de forças conservativas, logo, podemos escrever a seguinte relação envolvendo as energias do sistema:

$$(E_{CINÉTICA})_{ANTES} = (E_{CINÉTICA} + E_{POTENCIAL})_{DEPOIS} \quad (13)$$

Observe que o bloco com a mola não está fixo, portanto, quando a esfera começar a comprimir a mola de um lado, à medida que a mola for sendo imprensada pela esfera ela deve empurrar em sua outra extremidade, o bloco, de modo que a compressão máxima ocorrerá quando a velocidade relativa entre os corpos for nula. A velocidade relativa nula, por sua vez, implica que eles permaneçam imóveis um em relação ao outro (no referencial ligado aos corpos) , ou seja, não se aproximam e nem se afastam nesse instante, por isso a distância entre os corpos é mínima e a deformação da mola é máxima.

$$\frac{1}{2}m_1V_0^2 = \frac{1}{2}m_1u^2 + \frac{1}{2}m_2u^2 + \frac{1}{2}kx^2 \quad (13.1)$$

$$\frac{1}{2}m_1V_0^2 = \frac{1}{2}(m_1 + m_2)u^2 + \frac{1}{2}kx^2 \quad (13.2)$$

onde, u é a velocidade da esfera e do bloco no instante da deformação máxima.

Todavia, temos uma nova incógnita em nosso problema, sendo necessário, dessa maneira, desenvolver uma nova equação. Como o sistema possui somente forças internas, visto que os pares das forças de contato (ação e reação, possuem mesmo módulo e mesma direção, mas sentidos opostos, atuando em corpos diferentes) anula-se, podemos escrever a conservação do momento linear na horizontal.

$$(P)_{ANTES} = (P)_{DEPOIS} \quad (14)$$

$$m_1 V_0 = m_1 u + m_2 u \quad (15)$$

Isolando u, temos:

$$u = \frac{m_1 V_0}{m_1 + m_2} \quad (16)$$

A velocidade do conjunto logo após a colisão é definida por u. Nesta ocasião, substituindo a equação (16) na expressão da energia cinética equação (13-2), encontramos:

$$\frac{1}{2} m_1 V_0^2 = \frac{1}{2}(m_1 + m_2)\left(\frac{m_1 V_0}{m_1 + m_2}\right)^2 + \frac{1}{2} k x^2 \quad (17)$$

Dividindo ambos os lados da equação (17) por 2 e desenvolvendo-a, teremos:

$$m_1 V_0^2 = (m_1 + m_2)\frac{m_1^2 V_0^2}{(m_1 + m_2)^2} + k x^2 \quad (18)$$

$$m_1 V_0^2 - \frac{m_1^2 V_0^2}{(m_1 + m_2)} = k x^2 \quad (19)$$

$$\frac{(m_1 + m_2)\, m_1 V_0^2 - m_1^2 V_0^2}{(m_1 + m_2)} = k x^2 \quad (20)$$

$$\frac{(m_1^2 V_0^2 + m_1 m_2 V_0^2) - m_1^2 V_0^2}{(m_1 + m_2)} = k x^2 \quad (21)$$

$$\frac{m_1 m_2}{(m_1 + m_2)} V_0^2 = k x^2 \quad (22)$$

$$x = V_0 \sqrt{\frac{m_1 m_2}{k(m_1 + m_2)}} \quad (23)$$

Solução por massa-reduzida

Nesta ocasião, solucionaremos o mesmo problema fazendo-se uso da massa reduzida do sistema.

Visto que somente forças conservativas atuam (forças não conservativas são restringidas) a energia mecânica é constante, logo, podemos usar a equação (13) e equação (12):

$$(E_{CINÉTICA})_{ANTES} = (E_{CINÉTICA} + E_{POTENCIAL})_{DEPOIS}$$

$$\left(\frac{1}{2} M v_C^2 + \frac{1}{2}\mu v_R^2\right)_{ANTES} = \left(\frac{1}{2} M v_C^2 + \frac{1}{2}\mu v_R^2 + \frac{1}{2} k x^2\right)_{DEPOIS} \quad (24)$$

Dividindo ambos os lados da equação (24) por 2 e sabendo que a velocidade do centro de massa permanece constante e, a velocidade relativa é nula, quando a deformação da mola é máxima, pois nesse instante os dois corpos devem ter mesma velocidade, caso contrário não caracterizaria a máxima deformação, a expressão se reduz à:

$$(\mu v_R^2)_{ANTES} = (k x^2)_{DEPOIS} \quad (25)$$

Onde:

$$x = v_R \sqrt{\frac{\mu}{k}} \quad (26)$$

Sendo: $v_R = V_0$, pois somente um dos corpos inicialmente está em movimento e $\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$, encontramos a equação (23):

$$x = V_0 \sqrt{\frac{m_1 m_2}{k(m_1 + m_2)}}$$

Assim, temos a energia do sistema em função da velocidade do centro de massa e em função da velocidade relativa entre os corpos envolvidos. Perceba que em problemas de energia onde dois corpos fazem parte do sistema de análise, fica muito útil e simples utilizar a energia escrita dessa forma.

O primeiro termo da equação (12) corresponde à energia cinética do centro de massa e, o segundo termo relaciona-se com a energia cinética do movimento relativo entre os corpos. Observe que no referencial do centro de massa $v_C = 0$, e a energia cinética será mínima dada por $\frac{1}{2}\mu v_R^2$. Assim, a energia cinética dependerá do referencial.

Antes e depois de uma colisão a velocidade do centro de massa não varia, o que nos permite escrever:

$$\Delta E = \frac{1}{2}\mu v_R'^2 - \frac{1}{2}\mu v_R^2 \quad (27)$$

onde v_R' é a velocidade relativa após a colisão. Concluímos assim que a variação da energia cinética não depende do referencial.

Em uma colisão elástica, por exemplo, a variação de energia cinética é nula, o que nos permite escrever:

$$v_R' = v_R$$

Comprovando assim que a velocidade relativa não é alterada pela colisão, satisfazendo a relação em que o coeficiente de restituição $e = 1$.

A perda máxima de energia cinética corresponde ao fato de $e = 0$, verificando a partir da nossa equação 27 em que a energia final é nula, assim temos:

$$\Delta E = -\frac{1}{2}\mu v_R^2 \quad (28)$$

O sinal negativo indica perda de energia e o fato de $v_R' = 0$, justifica-se no fato em que em uma colisão inelástica os corpos ficam juntos, ou seja, a velocidade relativa é nula.

Neste tópico, serão abordados e resolvidos alguns exemplos em que a aplicação do conceito de massa reduzida torna a solução dos problemas mais rápida e intuitiva.

Exemplo 1

Note que que a mesma ideia poderia ser aplicada em um problema de eletrostática envolvendo dois corpos carregados eletricamente com mesmos sinais, por exemplo:

A figura mostra duas pequenas esferas A e B inicialmente em repouso, apoiadas sobre uma mesma superfície horizontal lisa, com cargas elétricas e massas, respectivamente, iguais a +Q, M e + q, m. Estando a esfera A inicialmente a uma distância infinita de B, ela é empurrada e adquire uma velocidade inicial V, conforme a figura. Determine a distância mínima atingida entre as caixas no movimento posterior.

Figura 3 - Duas pequenas esferas A e B, ambas carregadas positivamente, inicialmente, muito afastadas. A esfera B está em repouso e a esfera A possui velocidade V.

Fonte: Própria.

Solução tradicional

O sistema descrito possui somente forças conservativas (não atuam forças não conservativas), pode-se então escrever a conservação de energia mecânica do seguinte modo:

$$(E_{CINÉTICA})_{ANTES} = (E_{CINÉTICA} + E_{POTENCIAL})_{DEPOIS}$$

Observe que o bloco B não está fixo, logo quando o bloco A começar a se aproximar, a força elétrica entre eles que os repelem começa a agir, fazendo que a velocidade do bloco A diminua, mas com que a velocidade do bloco B aumente, de modo que a distância mínima ocorrerá quando a velocidade relativa entre os corpos for nula. A velocidade relativa nula implica que eles permaneçam imóveis um em relação ao outro, ou seja, não se aproximam e nem se afastam, nesse instante, por isso a distância entre os corpos é mínima.

$$\frac{1}{2}m_A V^2 = \frac{1}{2}m_A u^2 + \frac{1}{2}m_B u^2 + \frac{kQq}{d}$$

$$\frac{1}{2}m_A V^2 = \frac{1}{2}(m_A + m_B)u^2 + \frac{kQq}{d}$$

Onde, u é a velocidade da esfera e do bloco no instante da deformação máxima.

Porém, temos uma nova incógnita em nosso problema, para resolver devemos ter uma nova equação. Como o sistema possui somente forças internas, podemos escrever a conservação do momento linear na horizontal.

$$(P)_{ANTES} = (P)_{DEPOIS}$$

$$m_A V = m_A u + m_B u$$

Isolando u, temos:

$$u = \frac{m_A V}{m_A + m_B}$$

Agora, substituindo na expressão da energia cinética, encontramos:

$$\frac{1}{2}m_A V^2 = \frac{1}{2}(m_A + m_B)\left(\frac{m_A V}{m_A + m_B}\right)^2 + \frac{kQq}{d}$$

Multiplicando ambos os lados da equação por 2 e desenvolvendo, temos:

$$m_A V^2 = (m_A + m_B)\frac{m_A^2 V^2}{(m_A + m_B)^2} + \frac{2kQq}{d}$$

$$m_A V^2 - \frac{m_A^2 V^2}{(m_A + m_B)} = \frac{2kQq}{d}$$

$$\frac{(m_A + m_B)\, m_A V^2 - m_A^2 V^2}{(m_A + m_B)} = \frac{2kQq}{d}$$

$$\frac{(m_A^2 V^2 + \ m_A m_B V^2) - m_A^2 V^2}{(m_A + m_B)} = \frac{2kQq}{d}$$

$$\frac{m_A m_B}{(m_A + m_B)} V^2 = \frac{2kQq}{d}$$

$$d = \frac{1}{V}\sqrt{\frac{2kQq(m_A + m_B)}{m_A m_B}}$$

Solução por massa reduzida

Por não existir forças não conservativas realizando trabalho a energia mecânica é constante, logo, podemos usar a equação (12):

$$(E_{CINÉTICA})_{ANTES} = (E_{CINÉTICA} + E_{POTENCIAL})_{DEPOIS}$$

$$\left(\frac{1}{2}Mv_C^2 + \frac{1}{2}\mu v_R^2\right)_{ANTES} = \left(\frac{1}{2}Mv_C^2 + \frac{1}{2}\mu v_R^2 + \frac{kQq}{d}\right)_{DEPOIS}$$

Multiplicando por 2 de ambos os lados da equação e sabendo que a velocidade do centro de massa permanece constante e a velocidade relativa é nula quando a deformação da mola é máxima, a expressão se reduz à:

$$(\mu v_R^2)_{ANTES} = \left(\frac{2kQq}{d}\right)_{DEPOIS}$$

Onde:

$$d = \frac{1}{v_R}\sqrt{\frac{2kQq}{\mu}}$$

Sendo: $v_R = V_0$, pois somente um dos corpos inicialmente está em movimento e $\mu = \frac{m_A m_B}{m_A + m_B}$, encontramos:

$$d = \frac{1}{V}\sqrt{\frac{2kQq(m_A + m_B)}{m_A m_B}}$$

Exemplo 2

Calcule a perda de energia, devido ao impacto central e direto, de duas pequenas esferas de massas, m_A e m_B com velocidades V_A e V_B, respectivamente, movendo-se uma em direção à outra. (Considere que, após o impacto, os dois corpos se movimentam em sentidos opostos e o coeficiente de restituição vale e).

Figura 4 - Duas pequenas esferas de massas m_A e m_B com velocidades V_A e V_B, respectivamente em sentidos opostos.

Fonte: Própria.

Solução tradicional

Usando a equação (1) para a situação antes e depois e sabendo que a perda de energia é dada pela diferença entre a energia antes da colisão e a energia depois da colisão, assim temos:

$$E_{Antes} = \frac{1}{2}m_A V_A^2 + \frac{1}{2}m_B V_B^2 \quad (29)$$

$$E_{Depois} = \frac{1}{2}m_A V_A'^2 + \frac{1}{2}m_B V_B'^2 \quad (30)$$

Para encontrar V_A' e V_B', podemos escrever a equação da conservação do momento linear equação (14), já que, nesse problema, só existem forças internas:

$$m_A V_A - m_B V_B = -m_A V_A' + m_B V_B' \quad (31)$$

Observe que o sinal (-) indica o momento linear no sentido contrário ao eixo adotado para a direita. Perceba que existem duas incógnitas em nossa equação, V_A' e V_B' que devem ser substituídas na expressão da energia depois da colisão. Assim, precisaremos de outra equação:

$$e = \frac{v_R'}{v_R} = \frac{V_A' + V_B'}{V_A + V_B} \quad (32)$$

Agora dessa equação (32) isolando V_A' fazendo $V_A' = e(V_A + V_B)$ e substituindo na equação (31), temos:

$$m_A V_A - m_B V_B = -m_A e(V_A + V_B) + m_B V_B' \quad (33)$$

Organizando

$$V_B' = \frac{m_A}{m_B}[V_A + e(V_A + V_B)] - V_B$$

Encontramos assim V_B' em função de V_A e V_B. Realizando o mesmo raciocínio para encontrar V_A' em função de V_A e V_B, temos:

$$V_A' = \frac{m_B}{m_A}[V_B + e(V_A + V_B)] - V_A \quad (34)$$

Agora substituindo V_A' e V_B' na equação (30) da energia final, encontramos:

$$E_{Depois} = \frac{1}{2}m_A\left\{\frac{m_B}{m_A}[V_B + e(V_A + V_B)] - V_A\right\}^2 + \frac{1}{2}m_B\left\{\frac{m_A}{m_B}[V_A + e(V_A + V_B)] - V_B\right\}^2 \quad (35)$$

Assim, com um pouco de álgebra, subtraindo a equação (34) da equação (29), a energia perdida pode ser expressa por:

$$E_{Perdida} = \frac{1}{2}\frac{m_A m_B}{(m_A + m_B)}(V_A + V_B)^2(1 - e^2) \quad (36)$$

Solução por massa-reduzida

Para calcular a perda de energia, podemos fazer, simplesmente, a energia existente antes da colisão subtraída da energia ao final da colisão, ficando assim:

$$E_{Perdida} = E_{Antes} - E_{Depois} \quad (37)$$

$$E_{Perdida} = \frac{1}{2}Mv_C^2 + \frac{1}{2}\mu v_R^2 - \left(\frac{1}{2}Mv_C^2 + \frac{1}{2}\mu v_R'^2\right) \quad (38)$$

Logo, pelo fato de não existir forças externas, a velocidade do centro de massa permanece constante o que nos permite simplificar a equação (27):

$$E_{Perdida} = \frac{1}{2}\mu(v_R^2 - v_R'^2) \quad (39)$$

Observe que v_R' encontramos na equação do coeficiente de restituição equação (32):

$$e = \frac{v_R'}{v_R} = \frac{V_A' + V_B'}{V_A + V_B}$$

Assim,

$$v_R' = V_A' + V_B' = e(V_A + V_B)$$

$$E_{Perdida} = \frac{1}{2}\mu\{(V_A + V_B)^2 - [e(V_A + V_B)]^2\} \quad (40)$$

$$E_{Perdida} = \frac{1}{2}\mu(V_A + V_B)^2(1 - e^2) \quad (41)$$

Onde

$$\mu = \frac{m_A m_B}{m_A + m_B}$$

$$E_{Perdida} = \frac{1}{2}\frac{m_A m_B}{(m_A + m_B)}(V_A + V_B)^2(1 - e^2)$$

Note que $0 < e < 1$, para $e = 0$, temos que a energia do sistema antes seria totalmente perdida e perceba também que $e = 1$, teríamos uma colisão perfeitamente elástica, na qual toda a energia iria se conservar, logo a energia perdida pela expressão que encontramos se reduz a zero, justificando, de maneira coerente, o sucedido.

CONCLUSÃO

O trabalho desenvolvido comparou duas soluções alternativas para os mesmos problemas e exemplos apresentados, mostrando mediante uma análise quantitativa a eficiência do conceito de massa reduzida.

Com efeito, ao utilizar o conceito de massa reduzida em problemas de energia envolvendo dois corpos, tornamos a resolução do problema mais simples e rápida, visto que trabalhamos com um número menor de equações, essa conjuntura é útil aos professores como uma alternativa a mais na solução de problemas desse gênero. Ademais, tal concepção torna o resultado mais eficiente, no sentido de usar bem o tempo de aula, que geralmente é bem reduzido na disciplina em questão, a qual tem uma imensa quantidade de conteúdos importantes para formação do aluno.

Portanto, podemos utilizar a equação (12) quando não existir forças dissipativas e quando não possuir forças externas no sistema, visto que a energia se conserva e o momento linear também, deixando assim uma solução simplificada e mais elegante, pois a força externa é nula, implicando na aceleração do centro de massa ser nulo, ou seja, a velocidade do centro de massa deve permanecer constante.

REFERÊNCIAS

CAHN, S. B.; MAHAN, G. D.; NADGORNY, B. E. Guide to Physics Problems, Part 1: Mechanics, Relativity, and Electrodynamics. Traducao . [s.l.] Springer US, 1994.

CUNHA, Felipe Costa M. Um abordagem simplificada e didática do conceito de massa reduzida. 2017. 63 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Física) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017. [Orientador: Prof. Dr. Marcos Antônio Araújo Silva].

FINN, E. J.; ALONSO, M. Física um curso universitário - Mecânica. Traducao . [s.l.] Blucher, 2014.

HAGA, Mário S.; DA SILVA, Cícero Rafael Cena; DE SOUZA, Edilson Guimarães. Uma Abordagem Teórica Experimental do Conceito de Massa Reduzida. Núcleos de Ensino, p. 846-862, 2008.

NUSSENZVEIG H. Moysés. Curso de física básica, 1: mecânica. Traducao . [s.l.] E. Blucher, 2013.

TARSIA, Rodrigo Dias. O Problema de Dois Corpos: Aplicações Pouco Discutidas nos Cursos de Mecânica. Revista Brasileira de Ensino de Fısica, v. 20, n. 2, p. 117, 1998.

TAYLOR, J. R. Classical mechanics. Traducao . [s.l.] University Science Books, 2005.

THORNTON, S. T.; MARION, J. B. Dinâmica clássica de partículas e sistemas. Tradução . [s.l.] Cengage Learning, 2011.