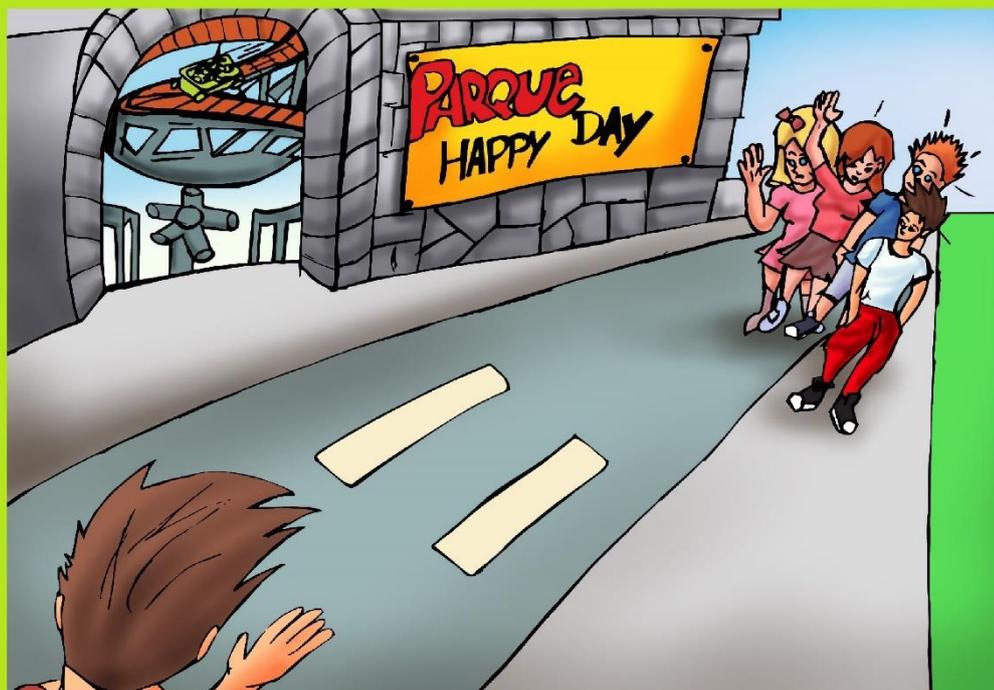


PRODUTO EDUCACIONAL

"FISICANDO" NO PARQUE DE DIVERSÕES



**BRUNO D. LORENÇON
EDEMAR B. FILHO
JAMES A. SOUZA**

UFSCar - Sorocaba
Abril de 2019

MNPEF
Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física

MNPEF Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física
Polo UFSCar Sorocaba

SBF
SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA

Prefácio

O produto educacional a seguir contém uma história em quadrinhos (HQ) elaborada para complementar a prática docente do professor de Física do Ensino Médio. São abordados alguns tópicos de Física em temas como Mecânica Newtoniana, Termodinâmica, Óptica e o Experimento de Dupla Fenda de Young.

O enredo dessa HQ se passa em um parque de diversões em que as personagens se divertem e exploram seus conhecimentos físicos relacionados aos temas descritos acima. Dentre estes foi explorado a Física da montanha-russa com descrições e conceitos da mecânica clássica, a primeira e segunda leis da termodinâmica durante a construção de um barco a vapor, o estudo dos espelhos planos no labirinto de espelhos e o experimento de dupla fenda de Thomas Young no brinquedo de tiro ao alvo. Este último pode ser uma alternativa interessante para introduzir tópicos de Física Moderna. Antes da descrição dos tópicos de Física é sugerida uma sequência didática para usar o material. O professor está livre para adaptar o conteúdo ou usá-lo da maneira que achar mais conveniente para a sua realidade em sala de aula.

Os temas descritos seguem os conteúdos destinados a cada série do Ensino Médio conforme o currículo de Física da escola em que o produto foi aplicado. Adicionalmente aos quadrinhos, é fornecida uma discussão sobre os conceitos abordados para que os tópicos de Física sejam melhor contextualizados com os quadrinhos. É importante ressaltar que o desenvolvimento matemático apresentado neste material é para fornecer melhor entendimento para os professores e não para os alunos. A transposição didática das equações e a própria abordagem dos temas, se será mais quantitativa ou qualitativa, fica a cargo do professor que escolherá a melhor maneira de trabalhar o conteúdo com os seus alunos.

Esperamos que esse material seja útil para complementar as aulas de Física dos professores do Ensino Médio e que o mesmo contribua como uma boa alternativa metodológica para a melhoria do ensino de Física.

Para dúvidas ou informações adicionais, envie um e-mail para
bru_lorençon@yahoo.com.br.

Os autores.

Este material foi produzido no Programa de Mestrado Profissional em Ensino de Física da
Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba (PROFIS-So)
Sorocaba, abril de 2019.

Sumário

SUGESTÃO DE SEQUÊNCIA DIDÁTICA

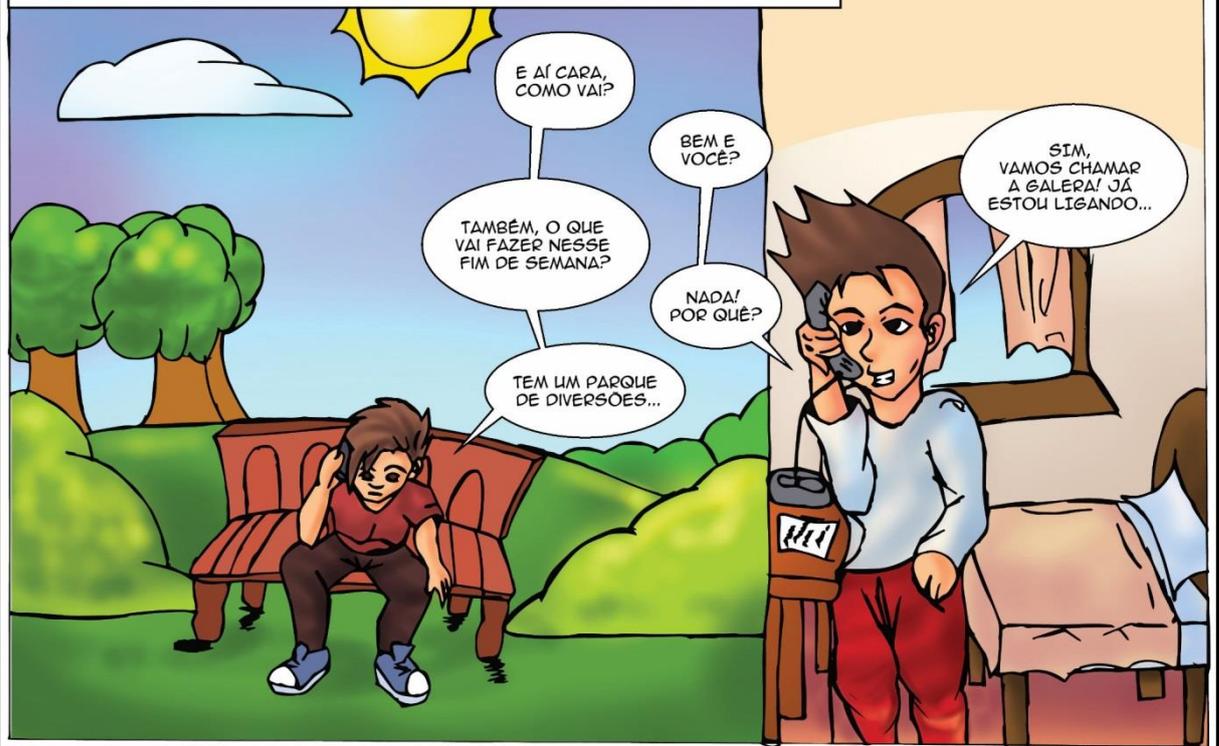
1. A Mecânica Clássica na Montanha-Russa.....	4
2. A Termodinâmica no Barco a Vapor.....	11
3. Óptica e o Corredor Infinito.....	17
4. Tiro ao Alvo através da Dupla Fenda de Young.....	21

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

5. Discussão dos Tópicos de Física das Históridas em Quadrinhos.....	28
5.1. Aprendendo Tópicos de Mecânica Clássica na Montanha-Russa.....	29
5.2. Introdução à Termodinâmica e suas Aplicações.....	34
5.3. O Efeito do Espelho no Infinito: Estudando Óptica.....	40
5.4. Pensando no Experimento da Dupla Fenda no Brinquedo de Tiro ao Alvo.....	46
REFERÊNCIAS.....	51

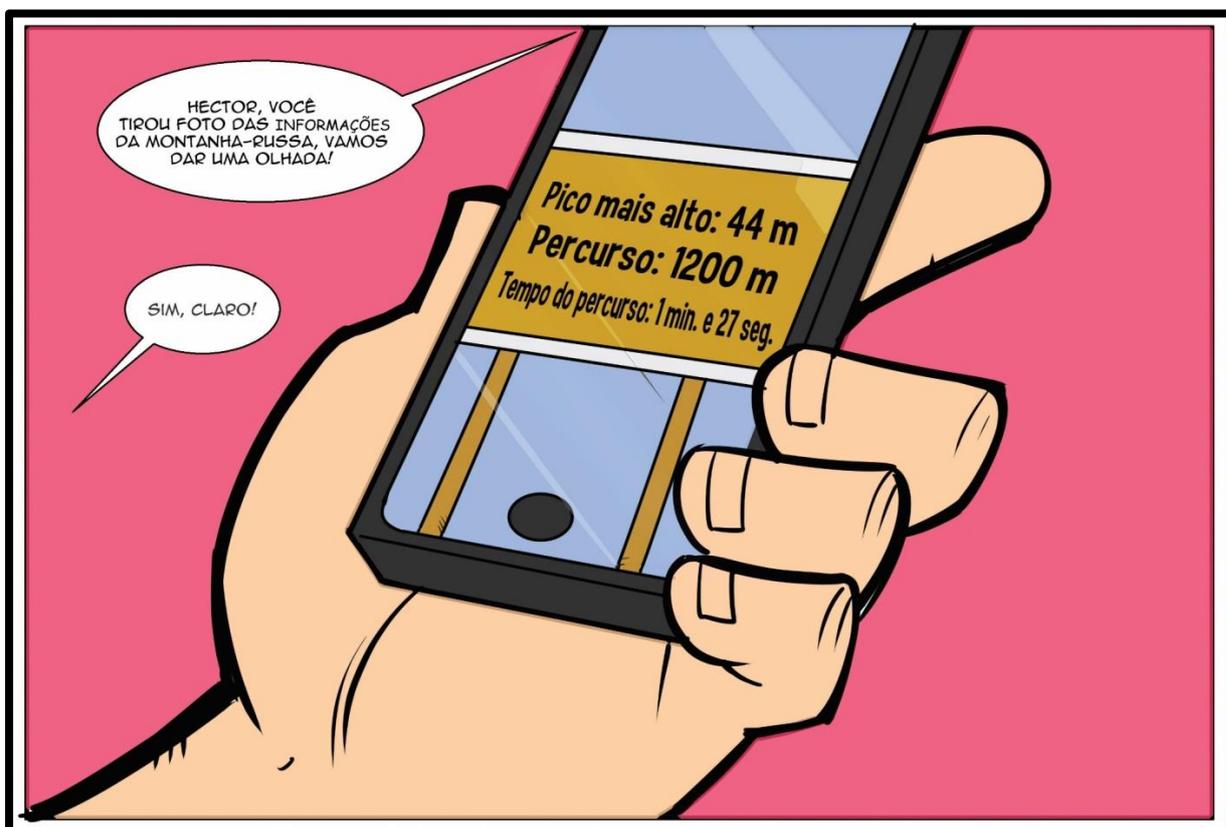
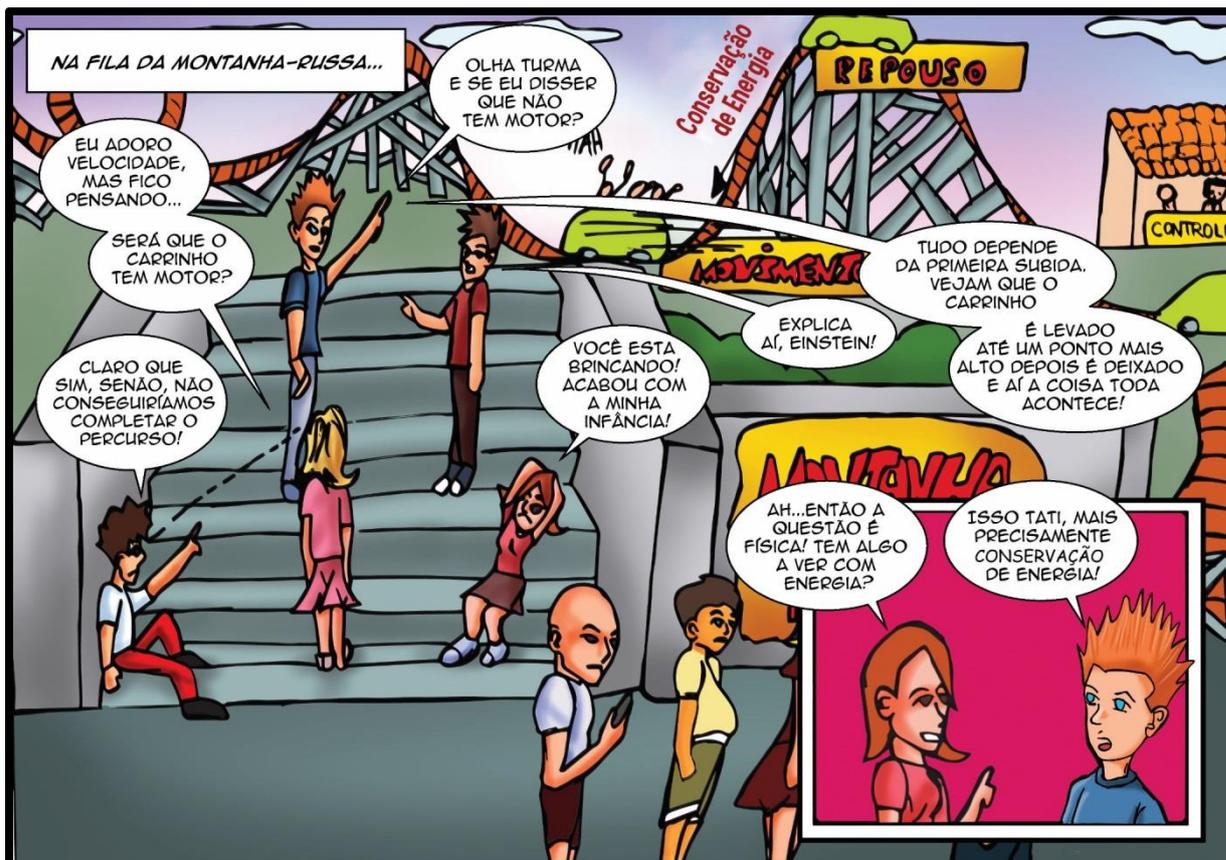
1. A Mecânica Clássica na Montanha-Russa.

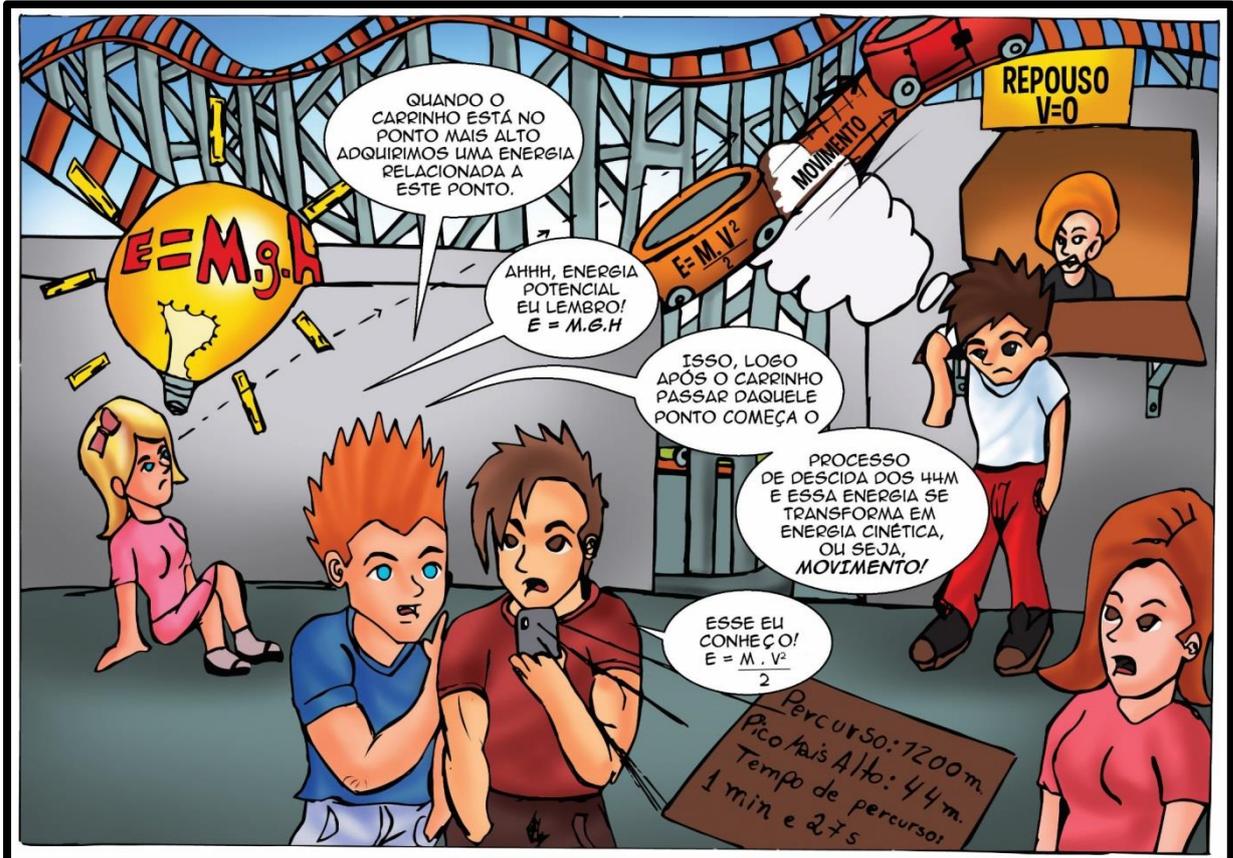
EM UMA TARDE TRANQUILA, O TEMPO COM NUVENS NOS LUGARES CERTOS, ENSOLARADO. HECTOR LIGA PARA OLIVER:



JÁ NO PARQUE DE DIVERSÃO, HECTOR VÊ DE LONGE SEUS AMIGOS OS QUAIS HAVIA CHAMADO PARA PASSAR A TARDE: RENATA, OLIVER, DANIEL E TATIANE.









Sugestão de Sequência Didática

Execução em 2 aulas

Como o uso da História em Quadrinhos (HQ) é para complementar as aulas de Física, é interessante o professor iniciar as aulas no tema com a discussão de conceitos sobre mecânica clássica, como energia mecânica, energia cinética e potencial, trabalho, unidades de medida, movimentos retilíneo uniforme e acelerado, movimento circular e força centrípeta, entre outros. Esses tópicos podem ser ministrados conforme a preferência do professor. Nós optamos por aulas expositivas. Essa metodologia foi utilizada não só para o tópico de mecânica clássica na montanha-russa, mas para todos os outros tópicos de física apresentados neste material.

Após a apresentação e discussão desses tópicos as Histórias em Quadrinhos foram introduzidas aos alunos. As turmas foram divididas em grupos e cada grupo representou uma personagem durante a leitura da HQ. Para melhor visualização e interação de todos os grupos utilizamos um projetor para projetar a HQ. O objetivo foi fazer com que a leitura fosse coletiva e não individual.

Após a leitura o professor pode trabalhar os conceitos de física à medida que forem surgindo nos quadrinhos. No terceiro quadrinho, por exemplo, pode-se dar maiores detalhes sobre os conceitos de repouso e movimento mostrados através das próprias palavras das personagens. No quarto quadrinho pode-se discutir unidades de medidas na Física através da altura e o comprimento do percurso da montanha-russa introduzindo o Sistema Internacional de Unidades (SI). Podem ser feitas perguntas como: A unidade de comprimento no SI é o metro, e a unidade de energia, qual é? No quinto quadrinho os próprios personagens discutem a energia e suas modalidades apresentando equações. No sexto quadrinho as personagens falam sobre conservação de energia. Que energia é essa que se conserva? Será que existe conservação dessa energia na montanha-russa? Por que os outros pontos altos da montanha são mais baixos que o primeiro? Este momento também é bom para introdução de movimento acelerado. Os efeitos da aceleração podem ser notados nas personagens no sexto quadrinho através dos cabelos levantados e a empolgação de todos quando eles levantam os braços.

No sétimo quadrinho as personagens discutem sobre a possibilidade de calcular a velocidade final v de descida do carrinho. Utilizando os dados apresentados no celular de uma das personagens no quarto quadrinho e a aceleração da gravidade g , os alunos podem fazer uma estimativa dessa velocidade utilizando o princípio de conservação da energia mecânica,

em que toda a energia potencial na primeira subida E_p seria convertida em energia cinética E_c durante a descida, ou seja,

$$\begin{aligned}E_p &= E_c, \\mgh &= \frac{mv^2}{2}, \\v &= \sqrt{2gh},\end{aligned}$$

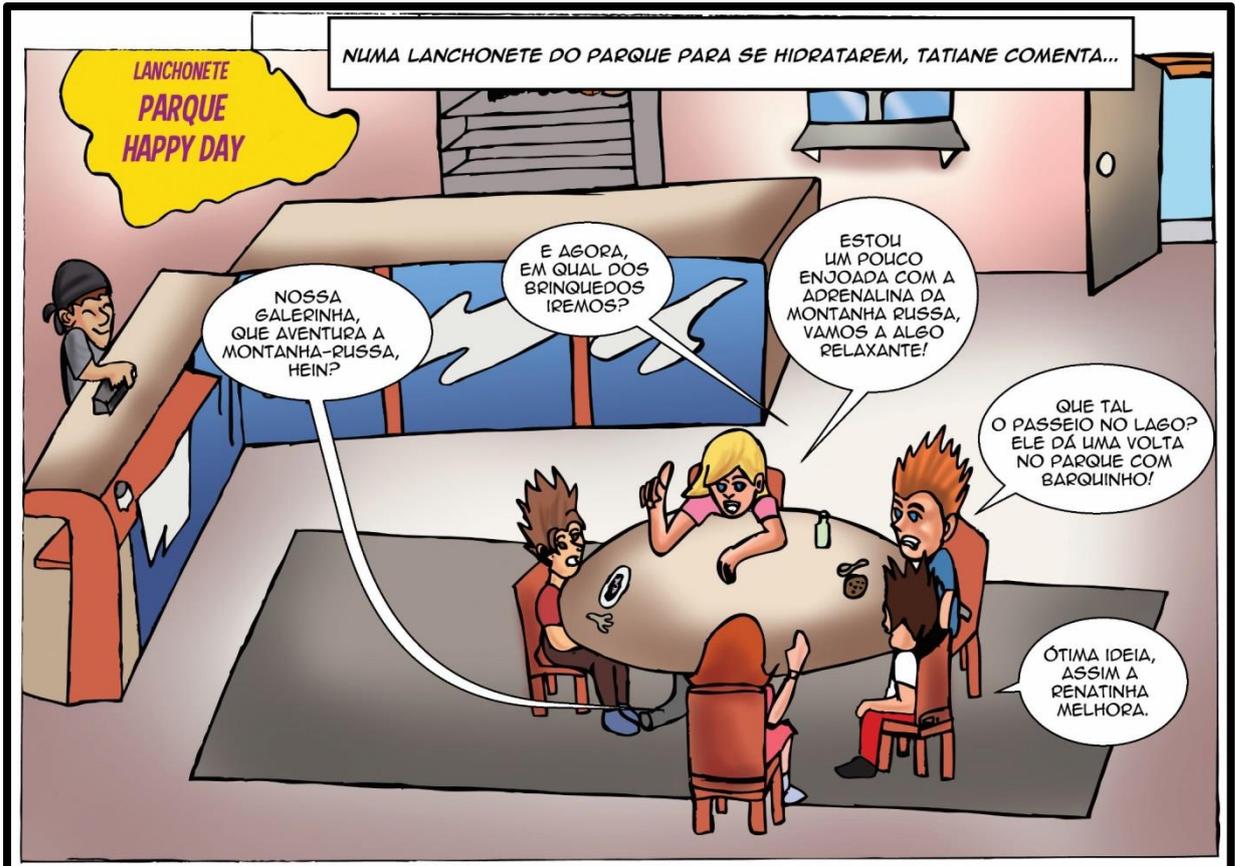
em que h é a altura máxima da montanha, primeira subida, e m é a massa total do carrinho junto com os passageiros. Mais perguntas sobre o resultado obtido podem ser conduzidas como: A velocidade final de descida depende de quais parâmetros? Como podemos então aumentar essa velocidade? Se fizermos isso o que acontece com a energia cinética e potencial do sistema? Mas a energia mecânica se conserva nesta situação? O professor pode ressaltar a partir da fala dos próprios personagens que o fato dos outros picos da montanha serem mais baixos que o primeiro é devido a não conservação de energia durante a descida do carrinho. Quais outras formas ou modalidades de energia surgem no processo de conversão de energia potencial para cinética? Por que então utilizamos este princípio para realizar tal cálculo se a energia não se conserva? O professor pode discutir o que é uma estimativa ou aproximação em ciência, que é exatamente o que os alunos estão fazendo. Se esta equação não leva em conta o atrito ela pode ser útil para algum esclarecimento? Sim, para verificar quais parâmetros podem influenciar na velocidade do carrinho.

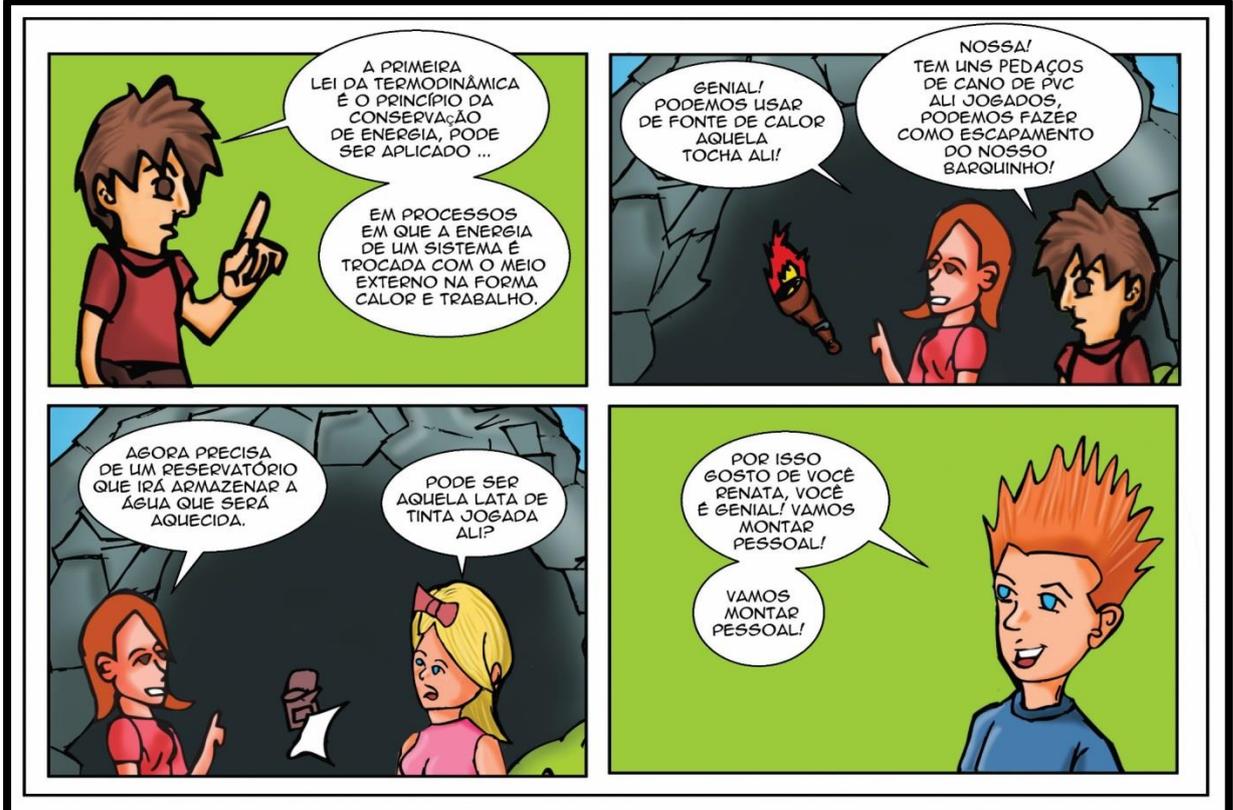
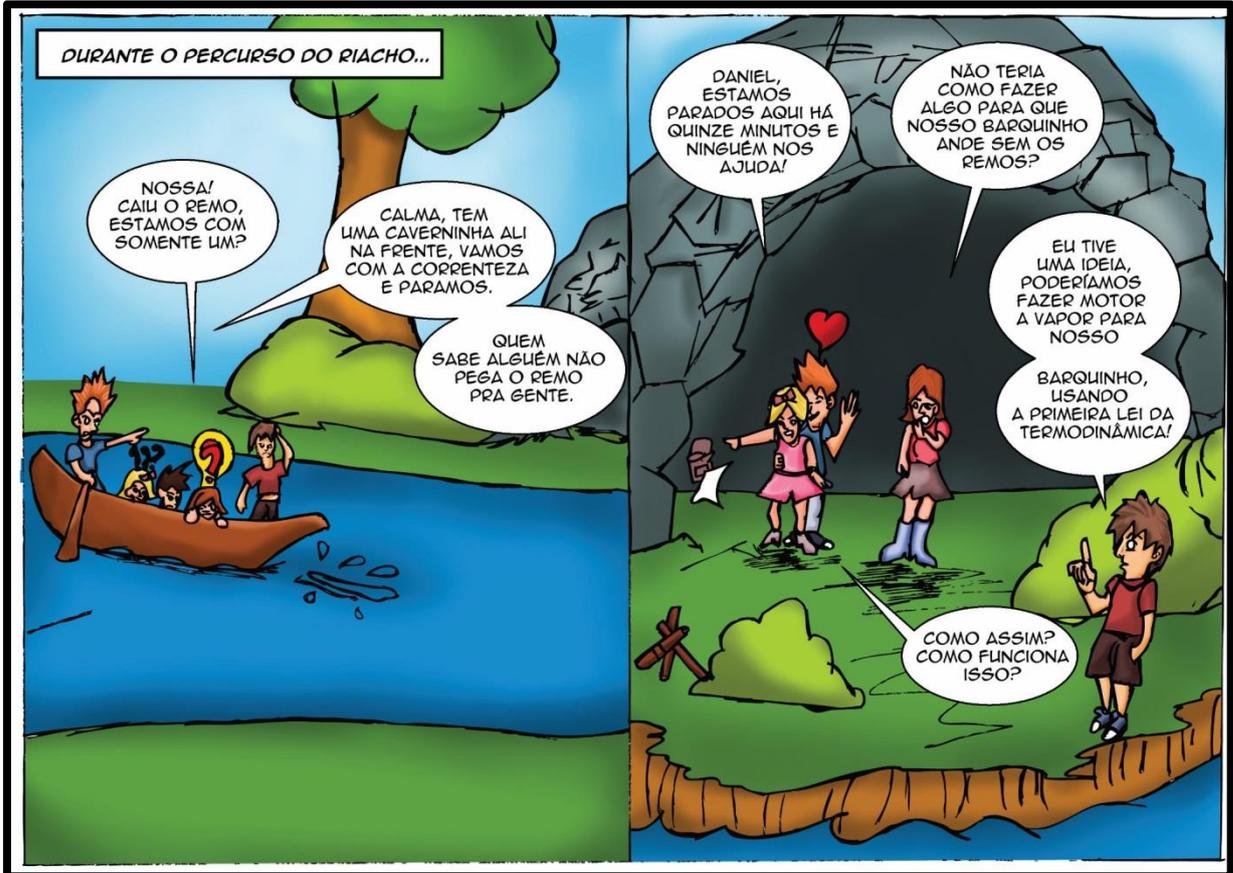
Várias outras discussões e conceitos podem ser conduzidos como movimento circular e uma curva na montanha-russa, força centrípeta e forças de inércia, como a força centrífuga, trabalho, entre outros. Maiores detalhes de outros conceitos e o tratamento matemático destes podem ser explorados na seção 5.1.

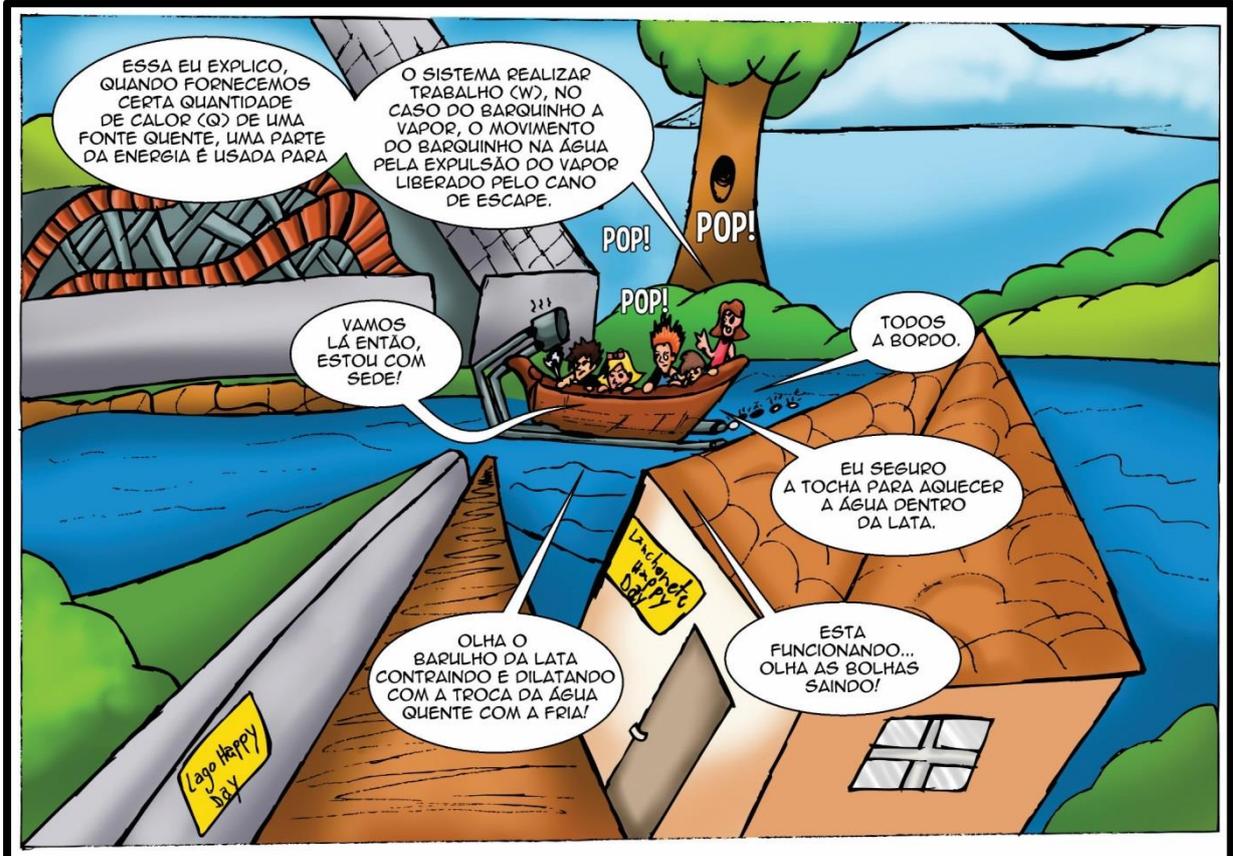
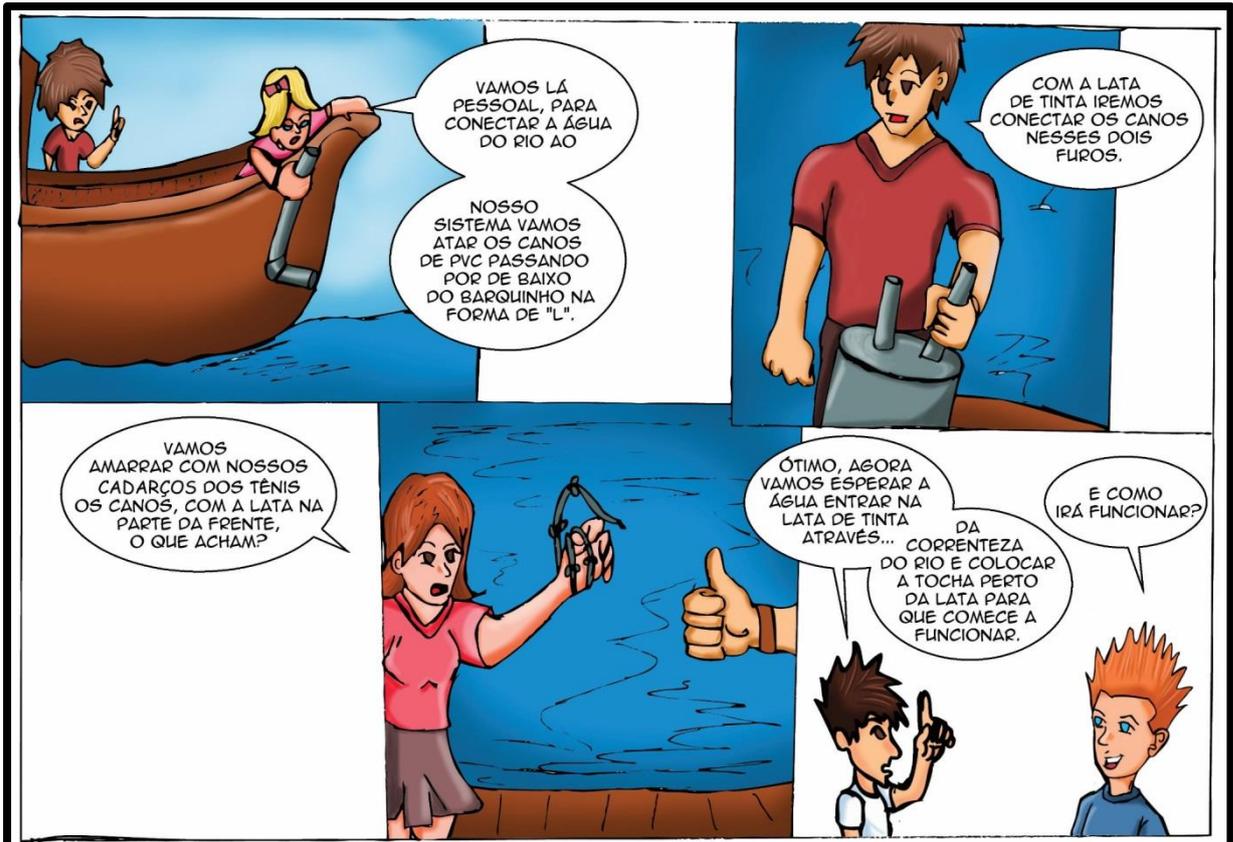
É interessante finalizar as discussões deixando claro que o percurso total da montanha russa só é completado pela conversão de energia potencial em cinética e que algumas considerações devem ser levadas em conta durante a construção da montanha-russa para se atentar para a não conservação da energia mecânica, pois se tivéssemos subidas de mesma altura que a primeira, após a primeira descida, o carrinho não completaria o percurso devido à dissipação de energia no decorrer do mesmo devido ao atrito do carrinho com os trilhos, produção de som, etc.

A avaliação desta aula pode ser feita de diversas maneiras, através de cálculos, relatórios sobre o que os alunos compreenderam sobre o funcionamento da montanha-russa, discussões entre os grupos mediadas com perguntas feitas pelo professor, ou até mesmo provas. O professor deve escolher a avaliação de acordo com a realidade de sua sala de aula.

2. A Termodinâmica no Barco a Vapor.







Sugestão de Sequência Didática

Execução em 4 aulas.

Neste tema o professor pode trabalhar as definições que envolvem as leis da Termodinâmica, bem como trabalhar uma montagem experimental de uma máquina térmica através de um barquinho *pop pop*, pois o princípio de funcionamento do barco a vapor dos quadrinhos é referente à este barquinho. Optamos por este experimento por ser simples e fácil de montar por qualquer aluno e professor do ensino médio.

Em uma aula, antes da aplicação da HQ, foi passada para todos os grupos formados a tarefa de assistir em casa ao vídeo da montagem de um barquinho *pop pop* e trazer os materiais necessários para a montagem de seus barquinhos. O vídeo sugerido está disponível no link: <http://www.manualdomundo.com.br/2012/04/como-fazer-um-barco-a-vapor-barquinho-pop-pop/>.

Como no tema sobre mecânica clássica, a HQ foi introduzida através da leitura coletiva com cada grupo formado representando uma personagem da trama.

A Física começa a surgir na história a partir do terceiro quadrinho. Nos primeiros quadrinhos foi feita toda a contextualização da situação-problema em que as personagens se encontram e uma delas sugere o uso da Termodinâmica para resolver o problema. No terceiro quadrinho o professor pode introduzir o princípio de conservação de energia, dado pela primeira lei da termodinâmica, e como a mesma é descrita matematicamente ao introduzir os conceitos de calor e trabalho no quarto quadrinho. Neste, as personagens começam a procurar materiais para a construção do motor de propulsão do barco a vapor, exatamente como os alunos fizeram na aula anterior quando assistiram o vídeo e escolheram materiais para a montagem do barquinho *pop pop*.

No quinto quadrinho as personagens começam a montagem do motor de propulsão a vapor para o barco. Este momento é excelente para introduzir o diagrama de máquinas térmicas e sua definição. Explicações sobre troca de energia do sistema através de calor e trabalho podem ser conduzidas, assim como a eficiência de uma máquina térmica e a segunda lei da termodinâmica. Maiores detalhes são apresentados na seção 5.2.

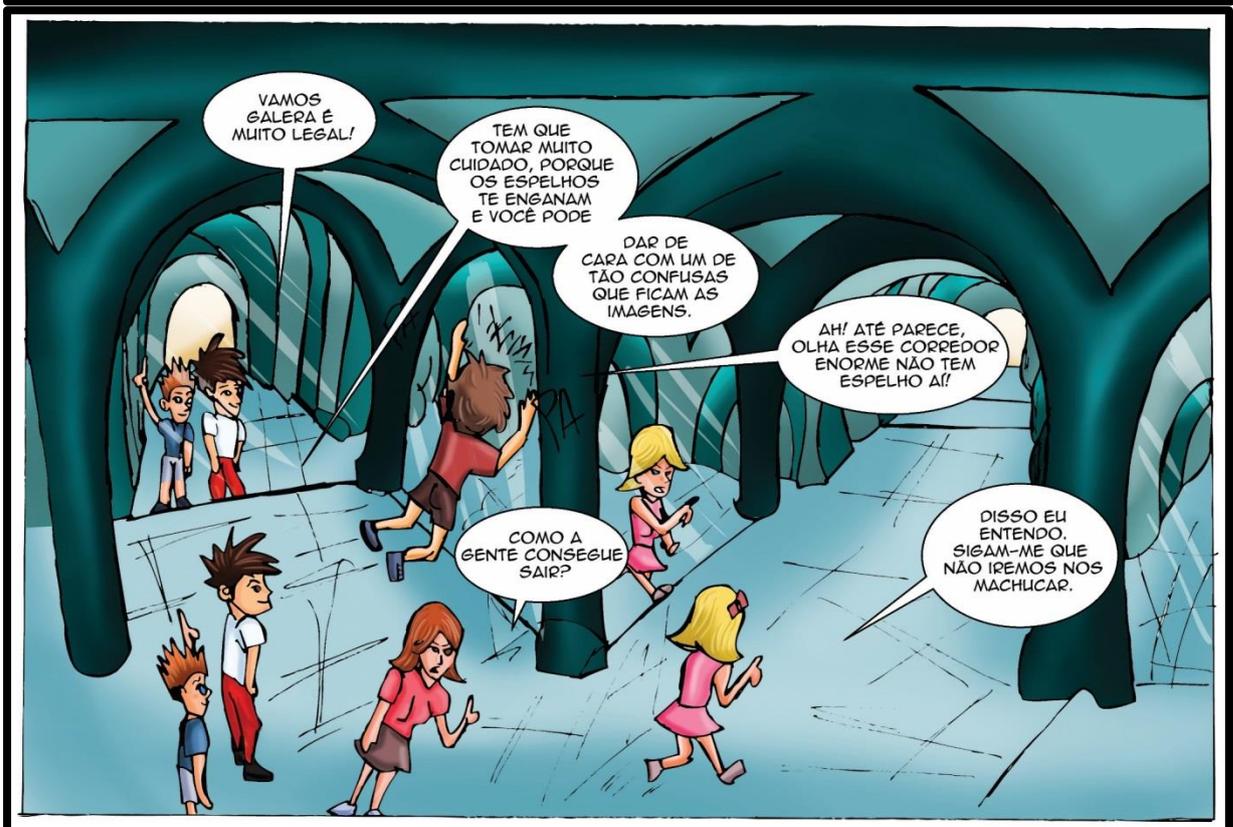
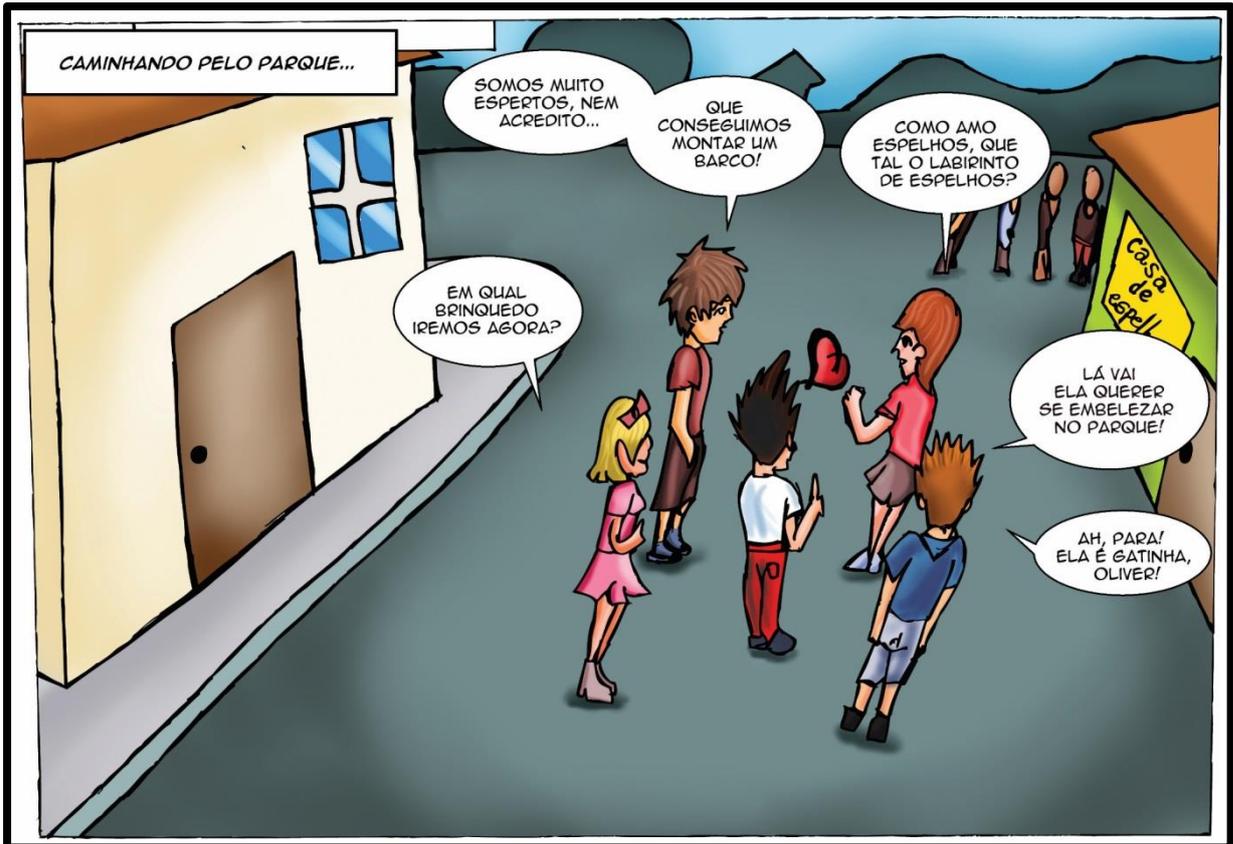
No sexto quadrinho o professor pode discutir o princípio de funcionamento do motor de propulsão à vapor do barco das personagens dos quadrinhos com o objetivo de introduzir tal princípio para o barquinho *pop pop* que os alunos estavam prestes a construir.

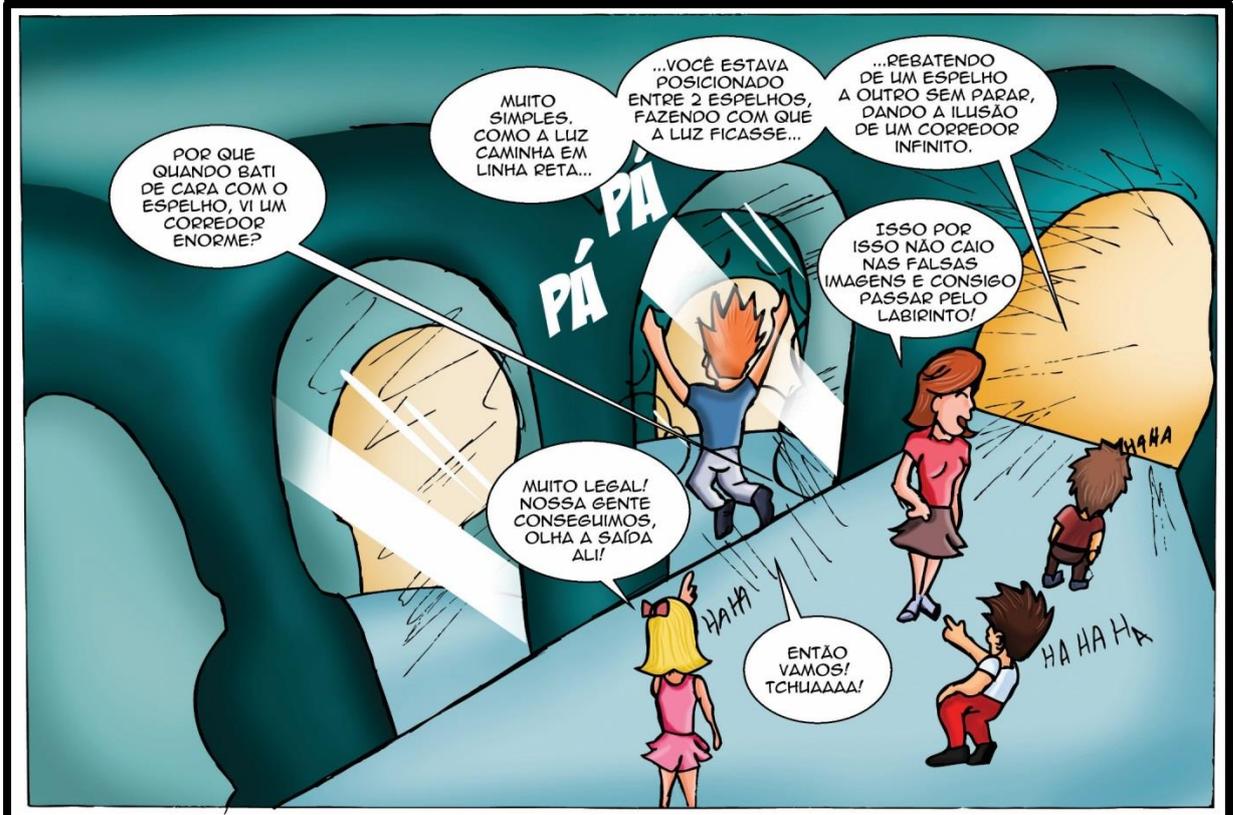
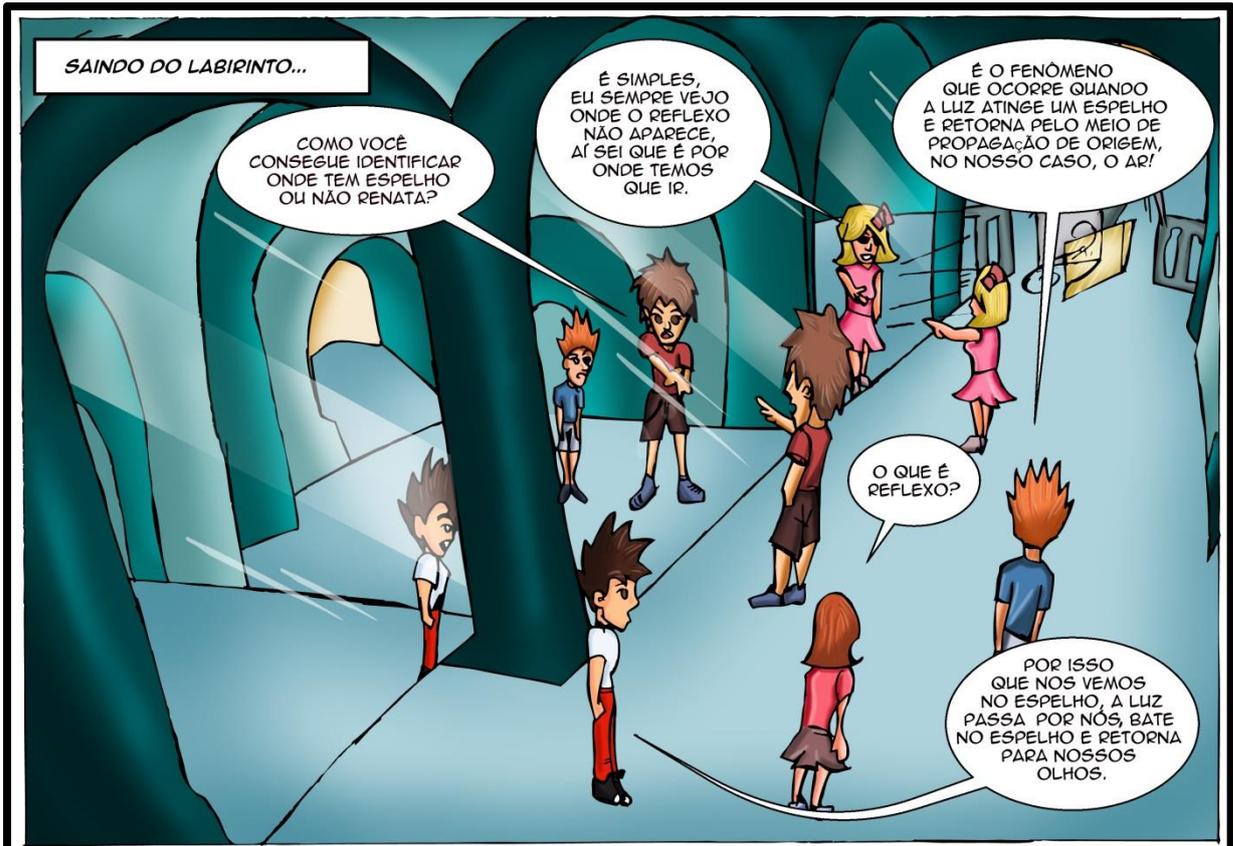
A montagem do barquinho foi realizada nas duas últimas aulas seguindo os procedimentos de montagem com os grupos para que cada grupo montasse seu próprio

barquinho. Após a montagem seria interessante se o professor conduzisse os alunos a uma fonte, lago, tanque ou mesmo levasse uma vasilha com água com dimensões adequadas na sala de aula para que os alunos colocassem os seus barquinhos para funcionar. Durante a diversão o professor pode retomar discussões sobre a segunda lei e máquinas térmicas com questões como: Quais são as fontes térmicas, quente e fria, do barquinho? Como podemos identificar as trocas de energia do barquinho com sua vizinhança através de calor e trabalho? O que podemos dizer sobre a eficiência do barquinho? Podemos melhorá-la? Este funcionará para sempre? Por quê?

Para a avaliação deste tema, além daquelas sugeridas na seção anterior, o professor pode conferir uma nota ao grupo a partir do empenho do mesmo durante a montagem experimental e discussão do princípio de funcionamento do barquinho *pop pop*.

3. Óptica e o Corredor Infinito.





Sugestão de Sequência Didática

Execução em 2 aulas.

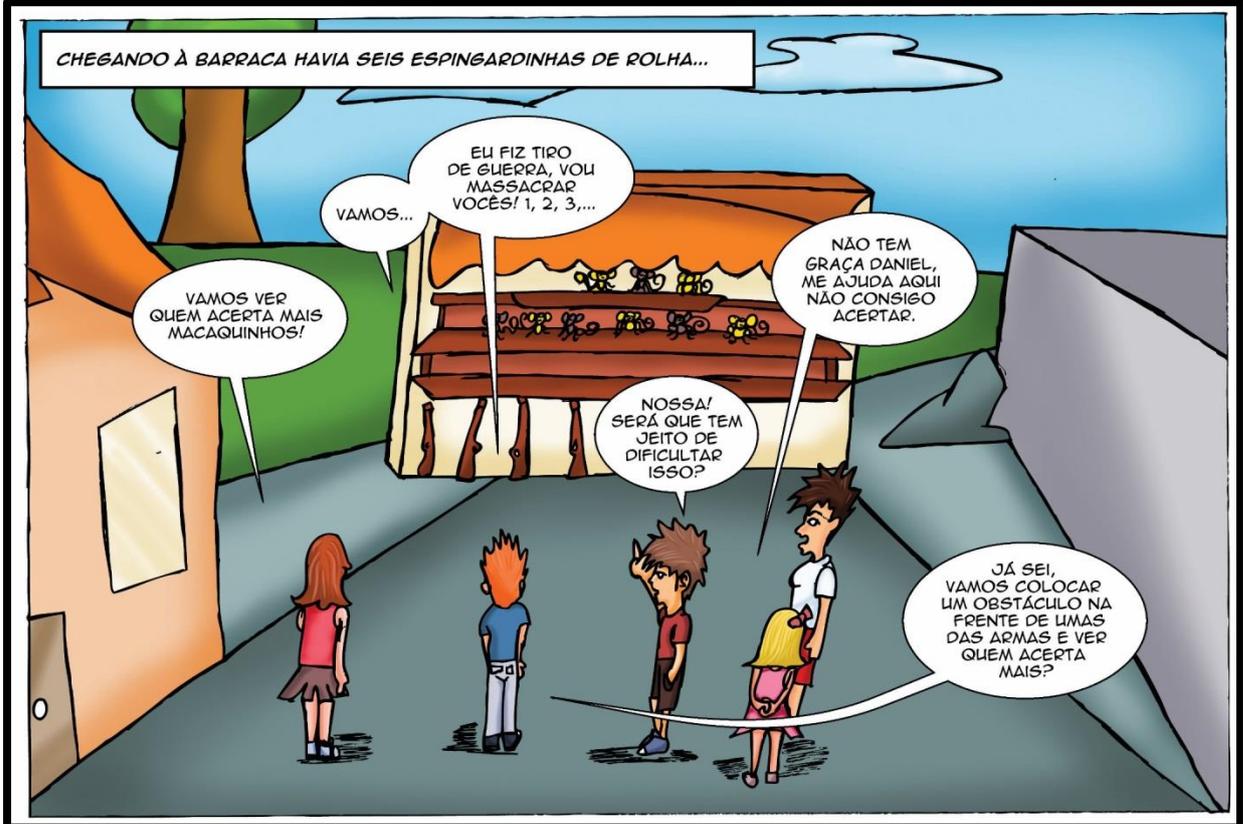
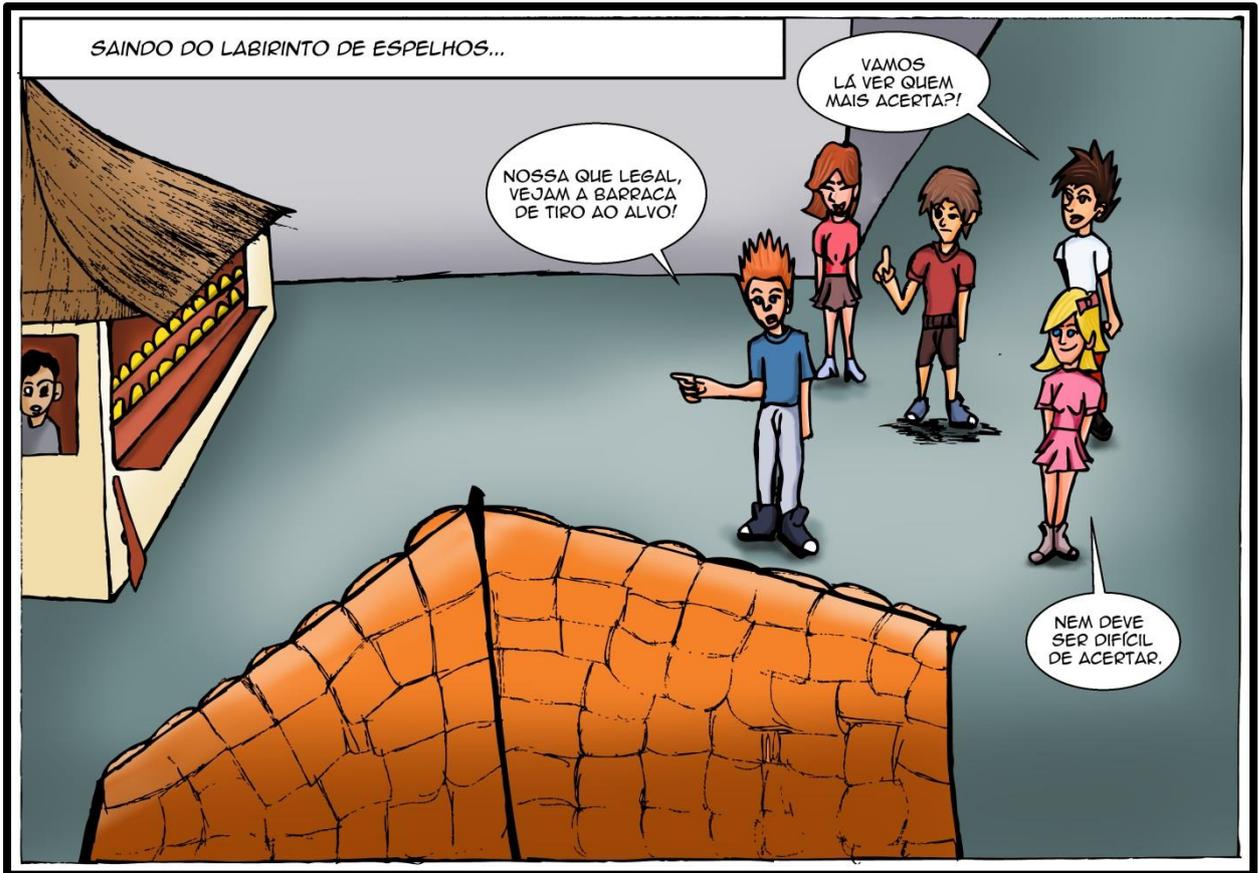
Após a leitura coletiva dos quadrinhos o professor pode trabalhar os conceitos de óptica geométrica a partir das dúvidas apresentadas pelas personagens no segundo quadrinho. No terceiro quadrinho é feita a introdução do conceito de reflexão em um espelho plano pelas próprias personagens. O professor pode utilizar essa discussão como ponto de partida para introduzir outras definições como refração e difração da luz ou tratamento da luz como partícula por Newton e como onda por Huygens.

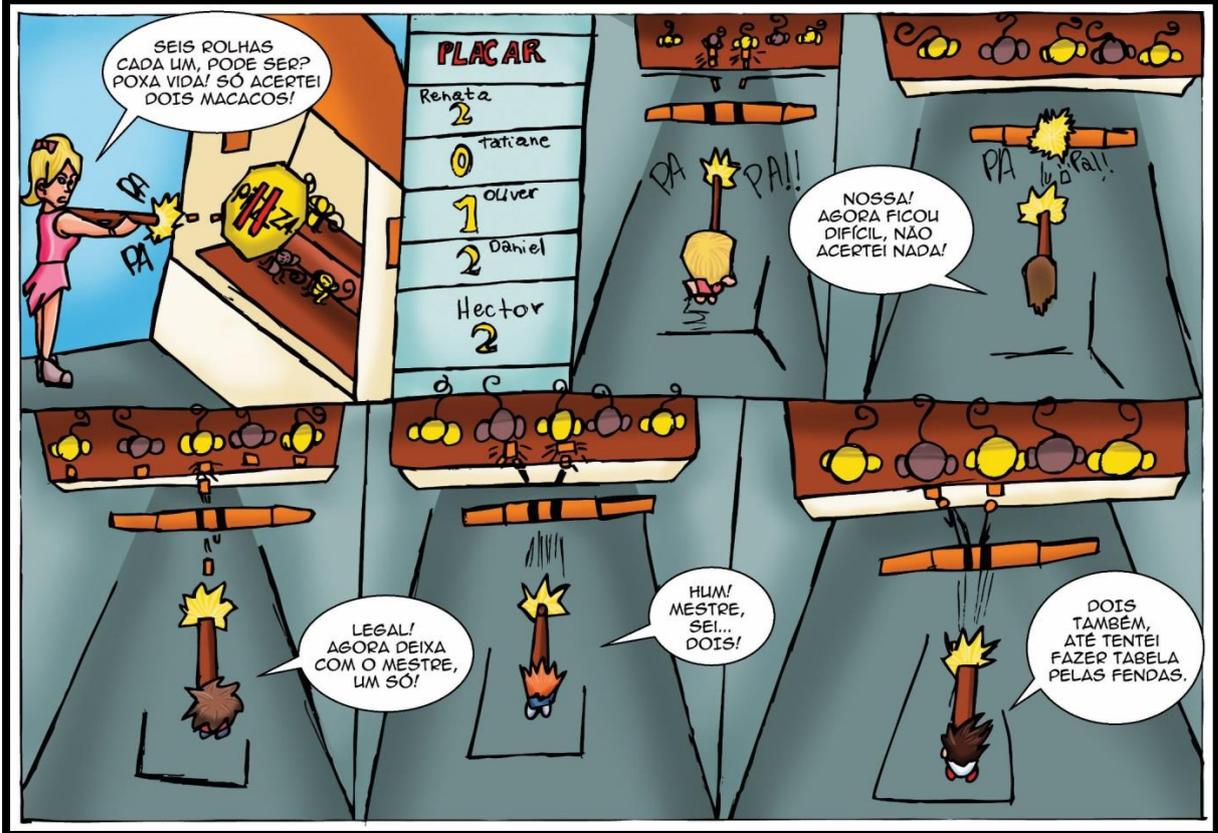
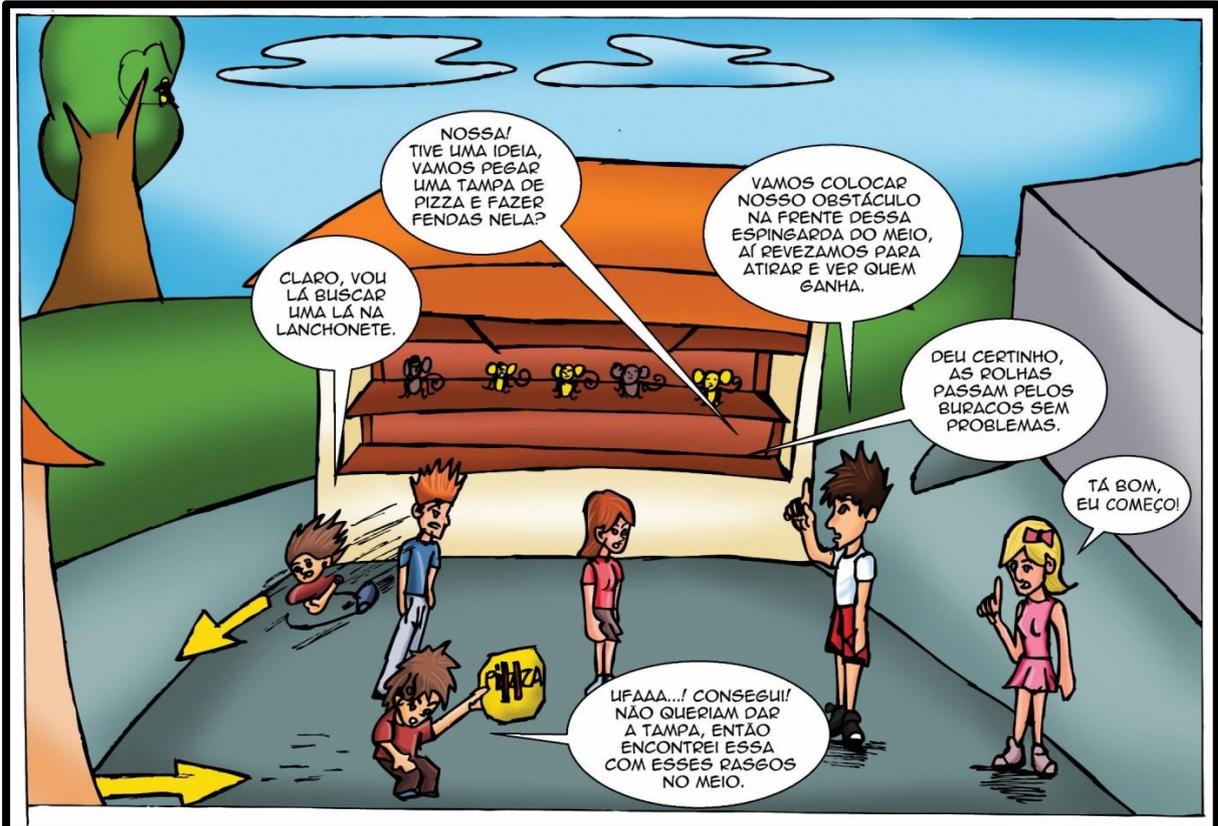
Neste tema é muito interessante o professor levar alguns espelhos, lanternas ou ponteiros laser para mostrar na prática os princípios básicos da óptica geométrica e a formação de imagens quando um objeto é colocado entre dois espelhos planos posicionados a diferentes ângulos entre si. Com os espelhos fica mais fácil discutir as equações e mostrar as condições para a formação do corredor infinito, discutido pelas personagens da história no quarto quadrinho.

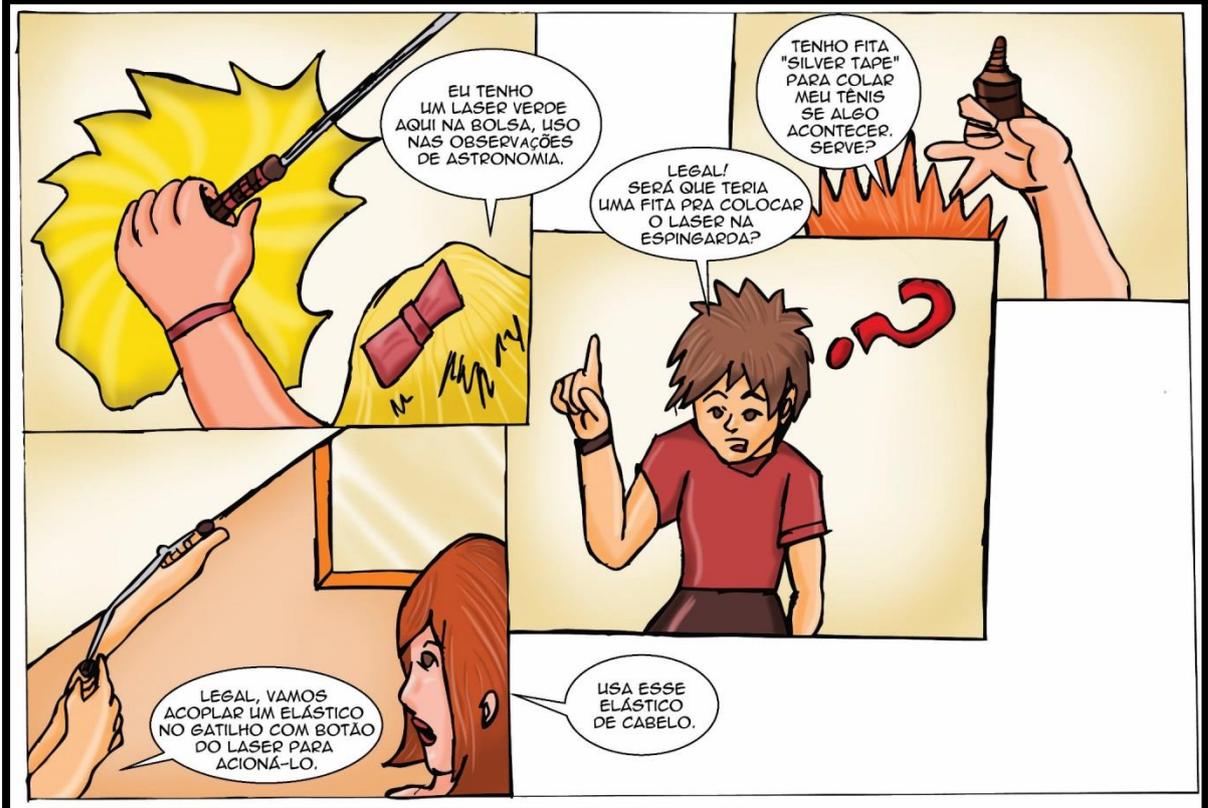
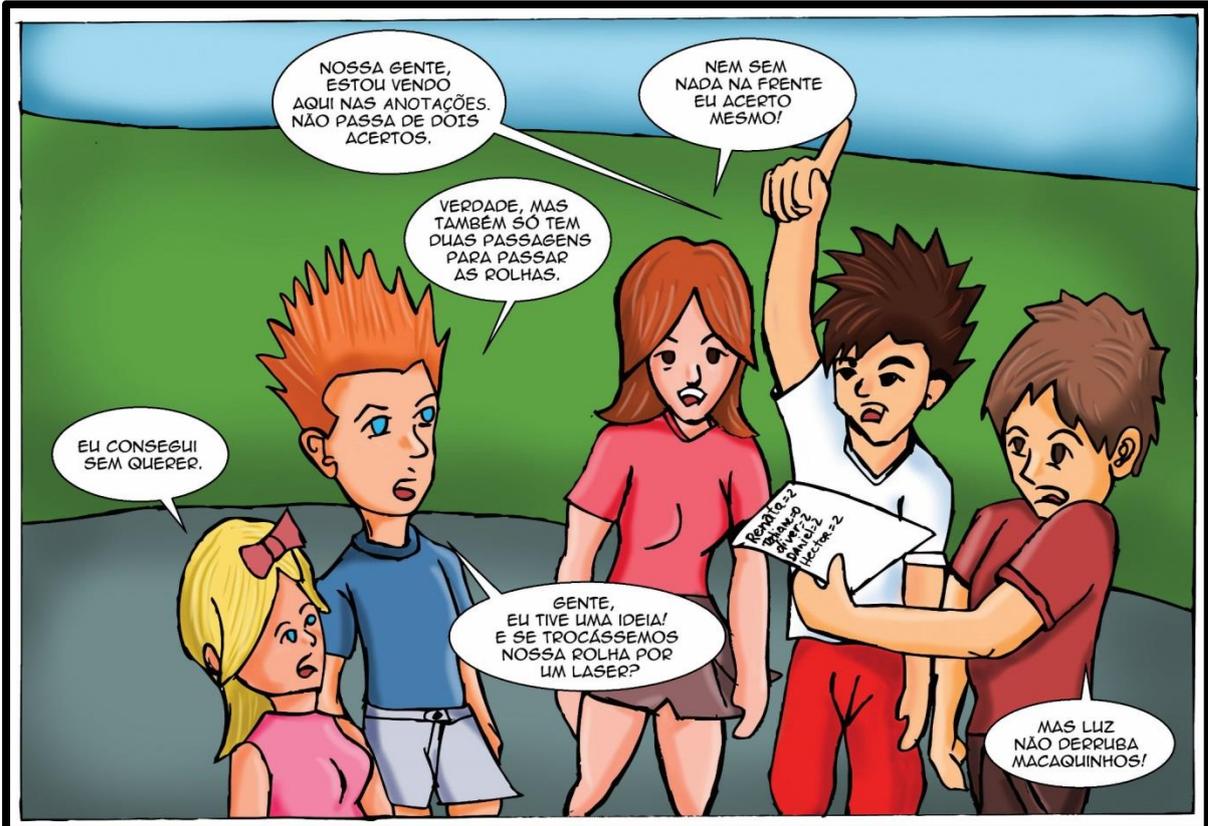
Todos os detalhes para estas atividades são fornecidos na seção 5.3 juntamente com discussões interessantes como a possibilidade de introduzir o conceito de limite para os alunos do ensino médio para explicar a formação de infinitas imagens quando dois espelhos planos são posicionados um de frente do outro paralelamente.

A avaliação deste tema pode ser feita a partir de alguma montagem experimental com espelhos realizadas pelos alunos ou a entrega dos cálculos sobre o número de imagens formadas para ângulos estabelecidos pelo professor, entre outros.

4. Tiro ao Alvo Através da Dupla Fenda de Young.







ATIRANDO COM A ESPINGARDA A LASER.

QUE LEGAL UMA ESPINGARDA A LASER, ACERTEI CINCO!

CINCO AQUI TAMBÉM!

CINCO TAMBÉM!

LASER

EU TAMBÉM. CINCO!

CINCO! HE-HE-HE

TABELA

RENATA	→ 5
TATIANE	→ 5
OLIVER	→ 5
HECTOR	→ 5
DANIEL	→ 5

NOSSA, MAS O QUE ACONTECEU?

EU NÃO IMAGINEI QUE ACONTECERIA ISSO, TODOS EMPATARAM!

DE REPENTE FICAMOS BONS DE MIRA!

A LUZ PASSA PELAS FENDAS AO MESMO TEMPO E APÓS A PASSAGEM ELAS SE INTERFEREM UMA NA OUTRA FORMANDO....

....PONTOS DE CLARO E ESCURO, AUMENTANDO NOSSA POSSIBILIDADE DE ACERTO, MARCANDO OS MACAQUINHOS.

COM A LUZ DO LASER O COMPORTAMENTO É DIFERENTE.

VERDADE, ESSE É O EXPERIMENTO DA DUPLA FENDA! GENIAL!

Sugestão de Sequência Didática

Execução em 2 aulas.

Como nos outros temas, a HQ foi introduzida após uma aula expositiva sobre o tema da dupla fenda.

O objetivo dessa história é demonstrar o tratamento da luz como partícula e como onda através do experimento de dupla fenda, o qual é abordado pelas personagens da HQ na barraca de tiro ao alvo.

Após a contextualização da história nos dois primeiros quadinhos nossos aventureiros decidem dificultar a brincadeira de tiro ao alvo porque uma das personagens se mostrou com bastante vantagem sobre as outras por ter prática de tiro. A proposta foi fazer uma fenda dupla em uma tampa de caixa de pizza para nivelar um pouco as chances dos jovens. A partir desse momento o professor pode discutir o que é o experimento de dupla fenda de Young e sua importância para a descrição da natureza da luz.

No quarto quadrinho as personagens percebem que é possível acertar no máximo dois macaquinhos, que são aqueles posicionados na região logo atrás das duas fendas. Mas por que isso acontece? O professor pode conduzir a discussão através de perguntas e introduzir o conceito de probabilidade para explicar o número de acertos das personagens discutidos no quinto quadrinho.

No sexto quadrinho é proposta uma modificação na espingarda. No lugar de rolhas as personagens adaptam um laser. Neste momento o professor precisa discutir as condições para que haja interferência construtiva e destrutiva quando o feixe luminoso passar pelas duas fendas, como o comprimento de onda, a distância das fendas, caminho óptico e fase dos feixes que saem das duas fendas, o fenômeno de difração da luz, entre outros. Todos os detalhes são fornecidos na seção 5.4.

É interessante notar que no quinto quadrinho uma das personagens expressa a impossibilidade de um feixe luminoso derrubar os macaquinhos quando outra personagem propõe a troca de rolhas por luz. Nesse momento o professor pode colocar a pergunta aos alunos: Como será feita a contagem dos macaquinhos atingidos pelo feixe de luz? Discussões sobre dispositivos de detecção e dispositivos ópticos conhecidos podem ser conduzidas para os alunos elaborarem estratégias de como fazer com que os macaquinhos caiam quando atingidos.

Em seguida, no sétimo quadrinho, as personagens executam a brincadeira, como se estivessem executando o experimento de fenda dupla de Young. Todos observam

entusiasmados o aumento de acertos com o feixe laser e ficam surpresos que todos obtiveram o mesmo número de acertos. O professor neste momento pode discutir a mudança na probabilidade de acertos com os fenômenos de difração e interferência da luz observados no experimento. Como os macaquinhos estão posicionados nas regiões das franjas claras do padrão de interferência, eles têm como resultado mais macaquinhos sendo atingidos.

É importante deixar claro para os alunos que não é possível realizar o experimento de dupla fenda com fendas perfuradas em uma caixa de pizza. As condições do experimento são bastante específicas e a distância entre as fendas deve ser da ordem do comprimento de onda da luz utilizada no experimento. Uma alternativa experimental e de baixo custo muito interessante é fornecida por Lopes e Laburú (LOPES e LABURÚ, 2004). No lugar de duas fendas espaçadas por uma distância d , eles utilizam de forma equivalente um fio de cabelo de espessura d . Com o padrão de interferência observado é possível estimar a espessura do fio de cabelo d .

A avaliação deste tema pode ser conduzida através de questionários ou outra forma que o professor achar mais adequada.

O professor pode ir mais adiante com estes últimos quadrinhos perguntando aos alunos o que aconteceria se no lugar de rolhas ou luz o experimento de fenda dupla fosse realizado com partículas como elétrons ou nêutrons. Outra possibilidade seria utilizar um feixe de raios-X incidindo em um cristal. Com isso seria possível introduzir tópicos de física moderna.

Este exemplo mostra que várias outras possibilidades e abordagens podem ser conduzidas pelo professor utilizando os quadrinhos desse material.

5. Discussão dos Tópicos de Física das Histórias em Quadrinhos.

5.1. Aprendendo Tópicos de Mecânica Clássica na Montanha-Russa.

As características mais marcantes relatadas pelas pessoas que já se divertiram numa montanha-russa é geralmente sobre o momento da subida do carrinho, o ranger das correntes que levam o conjunto de carrinhos até o topo da primeira descida, trazendo um momento de tensão.

No momento em que se inicia a subida do carrinho até o ponto mais alto, inicia-se o processo de obtenção de energia que fará com que o carrinho desça sobre os trilhos completando todo o percurso. Esse conceito de energia está ligado à altura máxima atingida pelo carrinho com relação à sua posição inicial, a qual nós colocamos o nosso referencial ou altura zero para o sistema.

Para entendermos melhor como todo esse processo funciona, partiremos da definição de trabalho. Trabalho é um método de transmissão de energia para levar um determinado corpo de um ponto a outro de sua trajetória através de uma força generalizada. No caso do carrinho da montanha russa, o trabalho é realizado através da força peso para deslocar o carrinho de uma altura h_1 até h_2 . Matematicamente o trabalho $W_{1 \rightarrow 2}$ de uma força resultante \vec{F} , para levar um sistema de uma posição ou estado 1 para uma posição 2, é dado pelo produto escalar desta força pelo deslocamento $d\vec{y}$ do mesmo, ou seja,

$$W_{1 \rightarrow 2} = \int_1^2 \vec{F} \cdot d\vec{y}. \quad (1)$$

Na montanha-russa a energia é transferida para o carrinho através da força de um motor que leva o carrinho para cima a partir de uma altura inicial h_1 até o ponto mais alto da montanha-russa h_2 , de onde será abandonado.

Quando o carrinho chega ao ponto mais alto da primeira subida, fica em repouso por alguns segundos, estando sujeito à força gravitacional dada pela equação:

$$\vec{F} = m\vec{g}, \quad (2)$$

sendo m a massa total do conjunto e o vetor \vec{g} a aceleração da gravidade. Esta é a força peso do sistema, que é a força com que a Terra atrai o conjunto carrinho mais passageiros. Substituindo a eq.(A-2) em (A-1) obtemos:

$$W_{1 \rightarrow 2} = \int_{h_1}^{h_2} m\vec{g} \cdot d\vec{y} = -mg \int_{h_1}^{h_2} dy = -(mgh_2 - mgh_1)$$

$$\therefore W_{1 \rightarrow 2} = -\Delta E_p. \quad (3)$$

O sinal negativo que aparece na segunda igualdade é obtido do produto escalar entre os vetores \vec{g} e $d\vec{y}$. O vetor gravidade está direcionado verticalmente para baixo enquanto que o vetor deslocamento vertical está para cima, uma vez que tomamos o nosso zero da altura na posição inicial do carrinho antes deste ser levado para cima da montanha-russa.

Note que o trabalho realizado por uma força gravitacional sobre o carrinho, quando o mesmo se desloca entre dois pontos, não depende da sua trajetória, mas somente dos pontos inicial e final, h_1 e h_2 , respectivamente. Isso significa que a força gravitacional é uma força conservativa e o trabalho pode ser representado pelo negativo da variação de uma grandeza chamada energia potencial gravitacional, dada por $E_p = mgh$. A classe de forças conservativas como a gravitacional, elástica, eletrostática, etc. são chamadas dessa forma porque conservam a energia mecânica do sistema.

A energia potencial do carrinho, adquirida durante a subida do mesmo, será convertida em energia cinética durante a descida, partindo do ponto mais alto até o ponto inicial, que é onde os passageiros entram e saem do carrinho.

A partir do momento que o carrinho começa a descer sobre a influência da força gravitacional, a emoção toma conta dos passageiros dos vagões. Para os participantes no interior do carrinho, além do aumento de velocidade incrível na primeira descida, eles verificam algo realmente curioso que acontece durante as rápidas curvas. Sentem a ação de uma força que tenta jogá-los para fora da curva, fazendo com que sejam pressionados nas paredes do carrinho durante o percurso. Mas como pode uma força agir em um corpo sem existir o agente da força? Na verdade, o que está ocorrendo é o efeito dos passageiros estarem se movendo em um referencial não inercial, ou seja, um referencial acelerado. O que os passageiros sentem é o efeito do que chamamos de pseudoforça, ou força de inércia centrífuga.

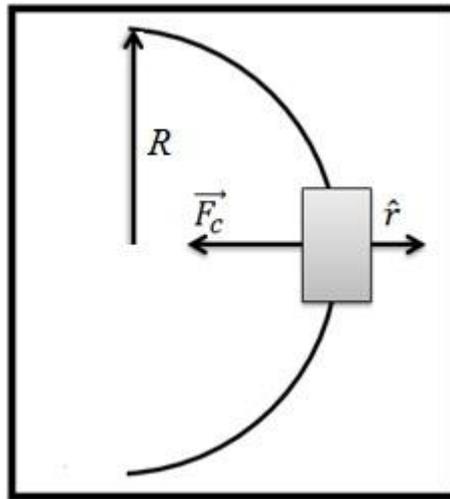
Esta é nomeada dessa forma porque não cumpre os requisitos necessários da definição de força provenientes das leis de Newton. Isso significa que as leis da mecânica de Newton se aplicam apenas a sistemas de referência inerciais, que são sistemas de referência em que corpos livres (sem forças aplicadas) não têm o seu estado de movimento alterado, ou seja, corpos livres não sofrem acelerações quando não há forças sendo exercidas nos mesmos. Tais sistemas ou estão parados, velocidade nula, ou em movimento retilíneo uniforme uns em relação aos outros, velocidade constante. Como a pseudoforça centrífuga somente aparece em sistemas acelerados devido à rotação do sistema, esta não pode ser considerada como uma força de acordo com a definição de Newton. O efeito é o mesmo de sermos pressionados contra as paredes de um ônibus quando o mesmo realiza uma curva.

Para que o carrinho consiga realizar a curva sem descarrilhar e continuar o trajeto é necessário que uma força resultante haja sobre ele. Esta é chamada de força centrípeta e é dada pela equação:

$$\vec{F}_C = -m \frac{v^2}{R} \hat{r}, \quad (4)$$

em que \hat{r} é o versor radial da trajetória curvilínea direcionado para fora da curva, mostrando que a força centrípeta é direcionada para a origem do raio de curvatura R , ou seja, para dentro da curva, uma vez que utilizamos $-\hat{r}$ na eq.(4), veja figura 1.1.

Figura 1.1 – Representação do sistema de vetores mostrando a força resultante centrípeta \vec{F}_C no carrinho no momento em que o mesmo realiza uma curva com raio de curvatura R . Note que a força centrípeta é contrária ao versor radial \hat{r} .



Fonte: Elaborada pelos autores.

Por conveniência, podemos escrever a eq.(4) em termos da velocidade angular ω . Sendo $v = R\omega$, obtemos $\vec{F}_C = -m\omega^2 R\hat{r}$.

No caso da pseudoforça centrífuga, o seu efeito é sentido para fora da trajetória curvilínea, ou seja, possui o sentido positivo do versor radial \hat{r} . Como os passageiros são mantidos no interior dos carrinhos da montanha-russa durante a realização de uma curva, o efeito resultante é como se a pseudoforça centrífuga \vec{F}_{Cf} sentida pelos passageiros fosse equilibrada pela força normal das paredes dos carrinhos sobre eles, que no caso é a própria força centrípeta. Dessa forma podemos escrever $\vec{F}_{Cf} = m\omega^2 R\hat{r}$. Lembrando que estamos apenas falando sobre um efeito, não estamos aplicando a definição de força de Newton para a força centrífuga. Só queremos saber quais os parâmetros que podem influenciar neste efeito.

Substituindo \vec{F}_{cf} na eq.(1), obtemos o que seria o equivalente da energia potencial da pseudoforça centrífuga $\varphi_{cf}(R)$ em uma trajetória curvilínea de raio R . Integrando o raio da trajetória de 0 a R e considerando $\varphi_{cf}(0) = 0$ obtemos,

$$\varphi_{cf}(R) = \int_0^R \vec{F}_{cf} \cdot d\vec{R}$$

$$\varphi_{cf}(R) = \frac{m\omega^2 R^2}{2}. \quad (5)$$

A eq.(5) mostra que a energia potencial centrífuga é proporcional ao quadrado da velocidade do carrinho, pois $\omega^2 R^2 = v^2$, ou seja, para um raio de curvatura fixo, quanto maior a velocidade do carrinho maior será a energia potencial centrífuga. Isso significa que maior deverá ser a força centrípeta para manter o carrinho na curva, conforme eq.(4), ou seja, será mais difícil manter o carrinho na curva à medida que sua velocidade aumenta. Esse fenômeno é explorado em montanhas-russas que possuem o famoso loop, que ocorre quando o carrinho percorre um círculo no plano vertical. A velocidade limite para o carrinho realizar um loop permite que os passageiros do mesmo fiquem literalmente de cabeça para baixo. Isso ocorre porque a pseudoforça centrífuga atinge grandes intensidades de tal forma que pressiona os passageiros contra o assento mantendo-os em sua posição e impedindo que os mesmos caiam sob o efeito da força gravitacional.

O movimento do carrinho em toda a sua trajetória é causado pela conversão de energia potencial para outra forma de energia, relacionada ao movimento, chamada de energia cinética E_c . Para obtenção de uma expressão matemática que caracteriza essa energia vamos considerar o carrinho com massa constante m movendo-se sob a ação de uma força \vec{F} . Pela segunda lei de Newton temos que:

$$\vec{F} = m\vec{a}, \quad (6)$$

em que \vec{a} é o vetor aceleração do carrinho.

O trabalho W realizado por esta força, de acordo com a eq.(1), é dado por

$$W_{1 \rightarrow 2} = \int_1^2 \vec{F} \cdot d\vec{x} = m \int_1^2 \vec{a} \cdot d\vec{x} = m \int_1^2 \frac{dv}{dt} dx,$$

onde consideramos a velocidade na mesma direção do deslocamento. Sendo a velocidade uma função da posição, ou seja, $v = v[x(t)]$ podemos escrever a aceleração do carrinho como,

$$a = \frac{dv[x(t)]}{dt} = \frac{dv}{dx} \frac{dx}{dt} = \frac{dv}{dx} v.$$

Substituindo na expressão para o trabalho obtemos,

$$W_{1 \rightarrow 2} = m \int_1^2 v \frac{dv}{dx} dx = m \int_1^2 v dv = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}$$

A expressão dada por $E_c = \frac{1}{2}mv^2$ é chamada de energia cinética, de modo que o trabalho de 1 a 2 é igual à variação da energia cinética,

$$W_{1 \rightarrow 2} = \Delta E_c. \quad (7)$$

Esse resultado é conhecido como teorema do trabalho energia. A importância desse teorema reside no fato de podermos calcular o trabalho de um sistema sem a necessidade de conhecer a natureza da força que está agindo sobre o mesmo, como no caso da eq.(1). Basta conhecermos a velocidade inicial e final do sistema.

Quando o carrinho é abandonado do repouso, inicia-se imediatamente o movimento do mesmo. A partir desse momento temos a energia potencial armazenada durante a subida sendo convertida em energia cinética. Esse momento é ilustrado no sexto quadrinho da HQ.

As equações descritas anteriormente podem ser apresentadas durante as aulas à medida que a HQ for sendo mostrada aos alunos.

Para descrevermos como a energia potencial é convertida em energia cinética durante o movimento do carrinho é conveniente definir também a energia mecânica do sistema utilizando o teorema do trabalho energia. Considerando que a força total aplicada ao carrinho é composta por forças conservativas e não conservativas podemos escrever o trabalho total W como sendo a soma do trabalho das forças conservativas W_C mais o trabalho das forças não conservativas W_{NC} , ou seja,

$$W = W_C + W_{NC} = \Delta E_c. \quad (8)$$

Como o trabalho das forças conservativas é igual a menos a variação da energia potencial, temos que:

$$\begin{aligned} -\Delta E_P + W_{NC} &= \Delta E_c \rightarrow W_{NC} = \Delta E_c + \Delta E_P \\ W_{NC} &= E_C^{(2)} - E_C^{(1)} + E_P^{(2)} - E_P^{(1)} = (E_C^{(2)} + E_P^{(2)}) - (E_C^{(1)} + E_P^{(1)}) \\ &\therefore W_{NC} = \Delta E, \end{aligned}$$

em que $E = E_C + E_P$ é a energia mecânica do sistema. Se o trabalho das forças não conservativas for nulo temos que $\Delta E = 0$ e, portanto, a energia mecânica do sistema se

conserva e toda energia potencial inicial será convertida em energia cinética. Caso contrário, se $\Delta E \neq 0$, a energia mecânica não se conserva. Isso é o que ocorre na realidade, pois temos o atrito do ar, dos rolamentos das rodas do carrinho e entre os trilhos e o carrinho, além da produção de som, fazendo com que a energia potencial inicial do carrinho não seja convertida completamente em energia cinética, ou seja, a energia mecânica do sistema não se conserva.

Durante a explicação dessas grandezas o professor pode fazer perguntas para os alunos como: Mas a energia do sistema não tinha que se conservar? Essa pergunta é muito importante para introduzir o princípio de conservação de energia. É interessante ficar claro que o que não está se conservando neste processo é a energia mecânica do sistema. E é por esta razão que a primeira descida do carrinho tem que ter altura maior, para fazer com que o mesmo tenha energia suficiente para realizar todo o percurso do brinquedo com várias curvas e movimentos de sobe e desce. Se tiver uma única subida com a mesma altura do ponto em que o carrinho é abandonado, o mesmo não conseguirá completar o trajeto, pois não terá energia suficiente para isso.

No princípio de conservação de energia é considerada a energia total do sistema. Esta sim é sempre conservada. Se somarmos todas as modalidades de energia observadas durante a descida do carrinho o resultado tem que ser o mesmo do valor da energia potencial gravitacional antes do movimento do carrinho ser iniciado. O tratamento deste princípio é importante para introduzir conceitos de Termodinâmica e suas leis, os quais serão discutidos em maiores detalhes na próxima seção.

5.2. Introdução à Termodinâmica e suas Aplicações.

Desde a Antiguidade sabe-se que o calor pode ser usado para vaporizar a água e usar esse vapor para realizar trabalho mecânico. A partir do final do século XVIII, a ideia de transformar calor em trabalho começou a ser cada vez mais explorada com o advento das máquinas térmicas. Ainda hoje, esse princípio é largamente utilizado pelo ser humano em suas atividades, com destaque para os setores de geração de energia e de transportes.

Neste trabalho nós analisamos um barquinho a vapor, um experimento conhecido e comumente utilizado como exemplo de máquina térmica, podendo ser encontrado em: <http://www.manualdomundo.com.br/2012/04/como-fazer-um-barco-a-vapor-barquinho-pop-pop/>.

Este experimento é comumente chamado de barquinho *pop pop* e é muito promissor para auxiliar o professor a fazer com que os alunos entendam o que é uma máquina térmica e o significado de calor e trabalho segundo os princípios da Termodinâmica.

Uma máquina térmica é qualquer dispositivo que transforma calor em trabalho operando ciclicamente. Segundo os princípios da Termodinâmica, tanto as máquinas térmicas a vapor, que operam com o vapor d'água produzido em uma caldeira, quanto às máquinas térmicas de combustão interna que operam devido aos gases gerados pela queima de combustíveis, têm seu funcionamento baseado no aumento da energia interna das substâncias envolvidas e no trabalho realizado.

Assim como o trabalho, o calor é um método ou forma de transferência de energia e depende do caminho ou do processo pelo qual um sistema é movido de um estado de equilíbrio 1 para outro estado de equilíbrio 2. Diferentemente do trabalho, o calor está relacionado com a variação de parâmetros internos do sistema e é um método responsável pela transferência de energia térmica. Portanto, sempre que nós mencionarmos a palavra calor, estamos nos referindo à energia térmica que o sistema adquiriu ou perdeu através desse método.

Com o barquinho *pop pop* podemos discutir tanto a primeira lei quanto a segunda lei da Termodinâmica. Quando fornecemos a um sistema uma certa quantidade de energia através do calor, adquirida de uma fonte térmica, comumente chamada de quantidade de calor Q , uma parte dessa energia é convertida em outra modalidade através de um corpo de trabalho, ou seja, trabalho W é realizado. No caso do barquinho a vapor parte da energia térmica inicial é convertida em energia cinética, fazendo com que o barquinho se movimente na água. Esse movimento se dá pela expulsão do vapor liberado por um duto de escape. A outra parte da energia, não convertida em trabalho, é responsável pela variação da energia interna U do sistema. Isso significa que, além de ser posto em movimento através do trabalho W , a carcaça do barquinho esquenta devido à variação de U .

A primeira lei da Termodinâmica relaciona a variação da energia interna ΔU do sistema com a quantidade de calor e trabalho da seguinte forma:

$$U_2 - U_1 = \Delta U = Q - W, \quad (9)$$

ou seja, a variação da energia interna do sistema é dada pela quantidade de energia adquirida pelo mesmo através do calor Q , menos a quantidade de energia que o sistema fornece a

vizinhança através do trabalho W . Se quisermos colocar da forma descrita no parágrafo anterior basta escrever a primeira lei como $Q = \Delta U + W$.

Como o barquinho *pop pop* é uma máquina térmica, ele funciona ciclicamente. Isso significa que $\Delta U = 0$, pois o estado final do sistema é igual ao estado inicial $U_2 = U_1$, uma vez que o ciclo é reiniciado. Pela equação da primeira lei obtemos que $Q = W$. Isso implica que todo calor pode ser convertido em trabalho e todo trabalho pode ser convertido em calor. A primeira lei não oferece qualquer restrição sobre a porcentagem de energia que é convertida ou mesmo a direção em que ocorre tal conversão. Isso é feito pela segunda lei da Termodinâmica.

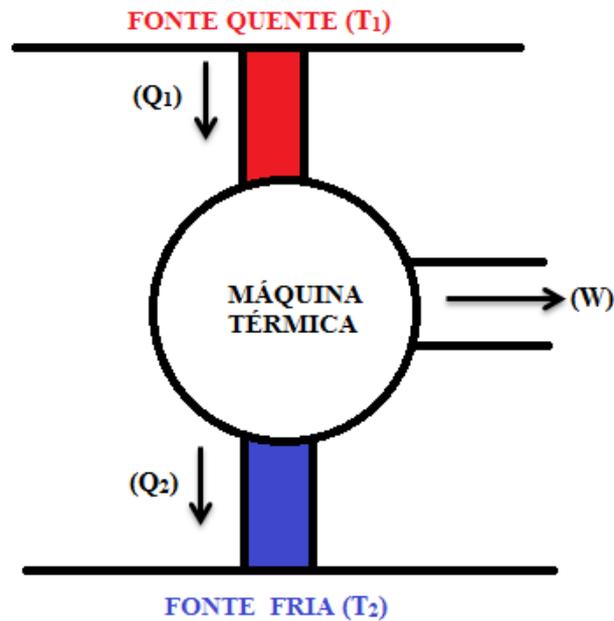
A segunda lei da Termodinâmica nos diz que uma certa quantidade de energia pode ser totalmente convertida em qualquer outra modalidade através do trabalho, ou seja, podemos ter $W \rightleftharpoons Q$, com a seta indicando a direção de conversão. Isso pode ser facilmente observado quando atritamos o dedo em alguma superfície convertendo energia mecânica em energia térmica. Por outro lado, a segunda lei nos diz que é impossível converter totalmente calor em trabalho, pois o fluxo de energia através de calor se dá através de um processo irreversível, significando que existem perdas de energia no processo. Portanto, se quisermos obter uma certa quantidade de trabalho é necessário fornecer uma quantidade de calor maior para compensar as perdas no processo de transferência de energia térmica, ou seja, $Q \succ W$. Como consequência disso é impossível concebemos uma máquina térmica com 100% de eficiência.

Para entendermos melhor essa questão da eficiência de uma máquina térmica vamos ver como se dá o seu funcionamento, o qual é ilustrado na figura 2.1.

A energia fornecida ao sistema através de calor Q_1 se dá por uma fonte térmica, comumente chamada de fonte quente, cuja temperatura é T_1 . Parte dessa energia é utilizada para realização de trabalho W e parte é dissipada ou descartada pelo sistema através de Q_2 , na fonte fria com temperatura $T_2 < T_1$, como ilustrado na figura 2.1.

O trabalho é dado por $W = Q_1 - Q_2$, ou seja, temos $Q_1 = W + Q_2$ mostrando que devemos ter de fato que $Q \succ W$. Colocando em termos de equações fica bem mais fácil de explicar para os alunos o que significa a compensação que deve ser fornecida ao sistema para realizarmos uma quantidade de trabalho definida.

Figura 2.1 – Diagrama esquemático do fluxo de energia de uma máquina térmica, mostrando uma fonte quente à temperatura T_1 fornecendo uma certa quantidade de energia através de calor, Q_1 , da qual parte é convertida em trabalho W e a outra parte é dissipada pelo sistema através de calor, Q_2 , para a fonte fria à temperatura $T_2 < T_1$.



Fonte: Elaborada pelos autores.

O rendimento ou eficiência η da máquina térmica é definido como a quantidade de trabalho útil produzida pela quantidade de energia total fornecida pela fonte quente, ou seja,

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}. \quad (10)$$

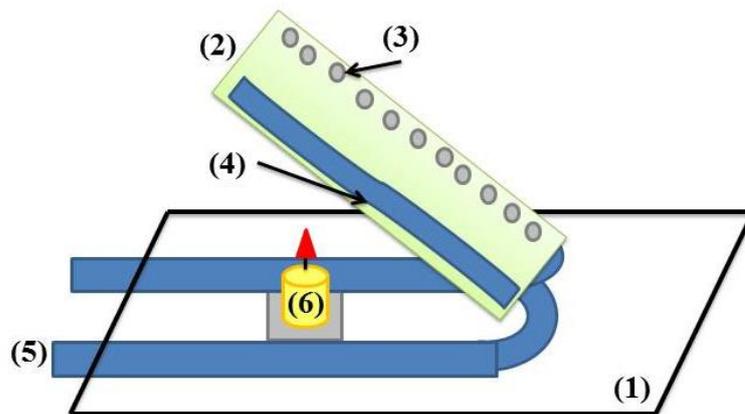
Uma vez que $\frac{Q_2}{Q_1} < 1$ temos que o rendimento da máquina térmica é sempre menor que 100%, ou seja, $\eta < 1$.

Vamos analisar agora o funcionamento do barquinho a vapor montado neste trabalho e verificar se o mesmo pode ser realmente tratado como uma máquina térmica. Na figura 2.2 apresentamos uma ilustração do barquinho montado com materiais simples e de fácil aquisição. A carcaça do barquinho é construída com uma placa de isopor, sua caldeira é feita com metal obtido de latinhas de refrigerante e os tubos de exaustão produzidos com dois canudinhos. A fonte quente é uma vela e a fonte fria é a água e a atmosfera que está na vizinhança do barquinho.

O barquinho *pop pop* é movido por um dispositivo muito simples, composto por uma pequena caldeira conectada a dois tubos de exaustão. A caldeira é inicialmente preenchida

com uma pequena porção de água. Quando a vela é acesa e energia térmica é transferida à caldeira através de calor, a água em seu interior evapora produzindo vapor. A expansão do vapor faz com que o mesmo seja expelido da caldeira através dos dois tubos de exaustão. A expulsão do vapor faz com que haja transferência de momento do barquinho para a água e pela terceira lei de Newton, uma reação é produzida, fazendo com que a água transfira momento para o barquinho propelindo o mesmo para frente. A saída de vapor se dá rapidamente provocando pequenas explosões, que é a origem do som *pop pop*.

Figura 2.2 – Esquema ilustrativo de montagem do barquinho *pop pop*. O sistema é composto por (1) prancha de isopor, (2) caldeira feita com o metal de latinhas de refrigerante, (3) é o gás formado no interior da caldeira após o aquecimento da água contida na mesma, (4) é a água que penetra no interior da caldeira, (5) são os tubos de exaustão construídos com canudinhos e (6) é a fonte quente do sistema feita com uma vela.

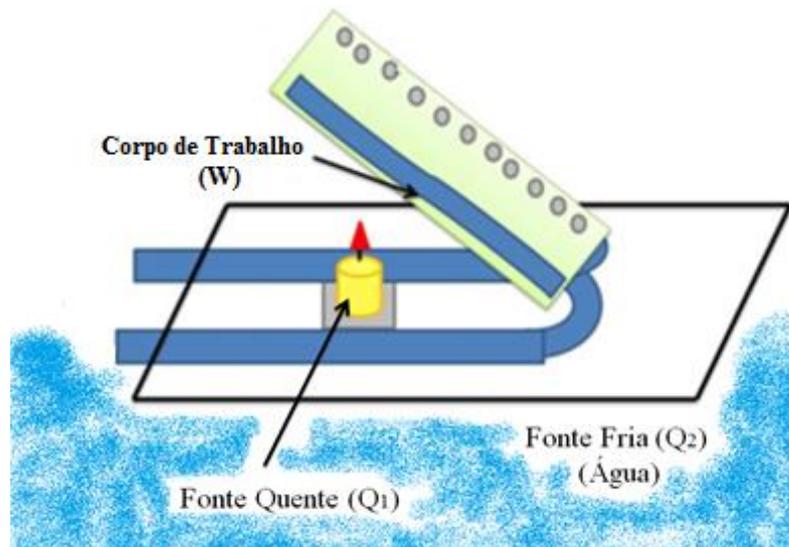


Fonte: Elaborada pelos autores.

Quando o vapor escapa pelos tubos forma-se vácuo na caldeira criando-se uma diferença de pressão entre a parte interna da caldeira e o lado de fora do barquinho, onde temos pressão atmosférica. Essa diferença de pressão faz com que água seja empurrada para dentro da caldeira para a produção de mais vapor fazendo com que o ciclo seja reiniciado. Portanto, a água fica oscilando periodicamente no interior da caldeira devido à geração de vapor, a expulsão do mesmo através dos tubos de exaustão e a diferença de pressão causada pela exaustão. A água é expelida pelos dois tubos do barquinho na primeira fase do ciclo e absorvida na segunda fase. Se a água fosse expelida por um tubo e absorvida pelo outro o barquinho ficaria girando na água e isso não ocorre. O barquinho se move sempre para frente enquanto a vela estiver acesa.

Vemos então que este é um excelente experimento para discussão de máquina térmica, pois é possível identificarmos a fonte quente, dada pela vela, o corpo de trabalho, dado pela caldeira e os tubos de exaustão, e a fonte fria dada pela água e atmosfera na vizinhança do barquinho, veja ilustração na figura 2.3.

Figura 2.3 – Esquema ilustrativo do barquinho *pop pop* representando as partes de uma máquina térmica de acordo com a figura 2.1.



Fonte: Elaborada pelos autores.

O funcionamento do barquinho a vapor é apresentado na HQ em uma situação problema, na qual nossos jovens aventureiros constroem um barco a vapor com os materiais disponíveis no local. Neste momento o professor pode explorar os conceitos e a funcionalidade do barquinho utilizando o experimento, o qual possui uma montagem fácil, barata e objetiva para o entendimento e discussão das leis da Termodinâmica.

Durante o funcionamento do barquinho é possível observar as transformações de energia no sistema e o processo de diferença de pressão causada pela exaustão através das ondulações na água, como mostra a foto do experimento na figura 2.4.

Como já mencionado, na HQ apresentamos uma situação problema que demanda a construção de barco a vapor pelas personagens através do conhecimento das Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica. Toda a discussão relacionada à Física do funcionamento do barco e a aquisição de materiais para sua construção é apresentada nas conversas das personagens nos quadrinhos.

Figura 2.4 – Experimento do barquinho a vapor em funcionamento. Note as ondulações na água, causadas pela exaustão da água da caldeira devido à diferença de pressão produzida pelo aquecimento da água na mesma.



Fonte: Elaborada pelos autores.

5.3. O Efeito do Espelho no Infinito: Estudando Óptica.

Na física a óptica é dividida em duas partes: óptica geométrica e óptica física. A diferença entre essas vertentes está no estudo fenomenológico do comportamento da luz.

O físico e matemático britânico James Clerk Maxwell (1831-1879) contribuiu de forma excepcional na demonstração da natureza clássica da luz. Através de sua teoria, proveniente de suas famosas equações, as equações de Maxwell, ele uniu eletricidade, magnetismo e óptica e mostrou que a luz é um efeito eletromagnético correspondendo à propagação de ondas elétricas e magnéticas. Nessa nova teoria, a luz seria apenas uma parte do espectro das ondas eletromagnéticas. A teoria de Maxwell era capaz de explicar todos os fenômenos ópticos até então conhecidos. Desde as leis da reflexão, da refração, até os fenômenos da difração e interferência da luz.

Na óptica geométrica consideramos que a luz se propaga através de feixes luminosos em linha reta podendo ser bloqueados ou desviados. Quando ocorre o bloqueio de um feixe luminoso observa-se a projeção de sombras, que são locais em que há ausência de luz. Para que haja o desvio da luz, os obstáculos devem possuir dimensões maiores que seu comprimento de onda. Estes obstáculos são conhecidos como espelhos ou lentes.

Para o estudo da óptica geométrica é necessário compreender três princípios básicos:

- **Princípio da propagação retilínea da luz:** a luz se propaga em linha reta através de um meio que possui as mesmas propriedades físicas.

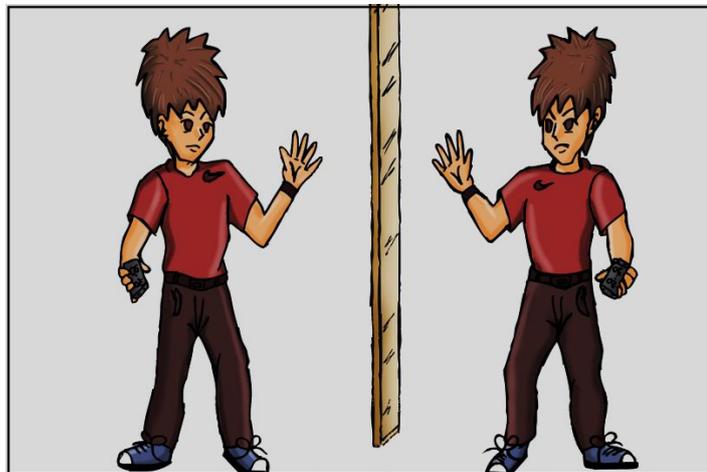
- **Princípio da independência dos raios luminosos:** dois raios ao se cruzarem seguem seus caminhos sem produzir qualquer interferência um no outro.

- **Princípio do caminho inverso:** o caminho de propagação da luz não se modifica quando o sentido de propagação se inverte.

Esses princípios são observados na produção de imagens no interior de um labirinto de espelhos em um parque de diversões, tema que abordamos na HQ, onde a luz entra pelas aberturas das portas de entrada e saída do labirinto ou são produzidas artificialmente.

Como o tema é o labirinto de espelhos nós discutimos sobre a formação de imagens em espelhos planos. Em um espelho plano sua imagem é idêntica ao objeto que está a sua frente, porém de forma simétrica. Isto significa que o espelho forma um plano de simetria entre o objeto e sua imagem, ou seja, todos os pontos do objeto e de sua imagem estão à mesma distância do espelho, veja ilustração na figura 3.1.

Figura 3.1 – Se estendermos a mão direita em frente a um espelho plano observaremos nossa imagem de forma simétrica, com a mão esquerda estendida e vice-versa.

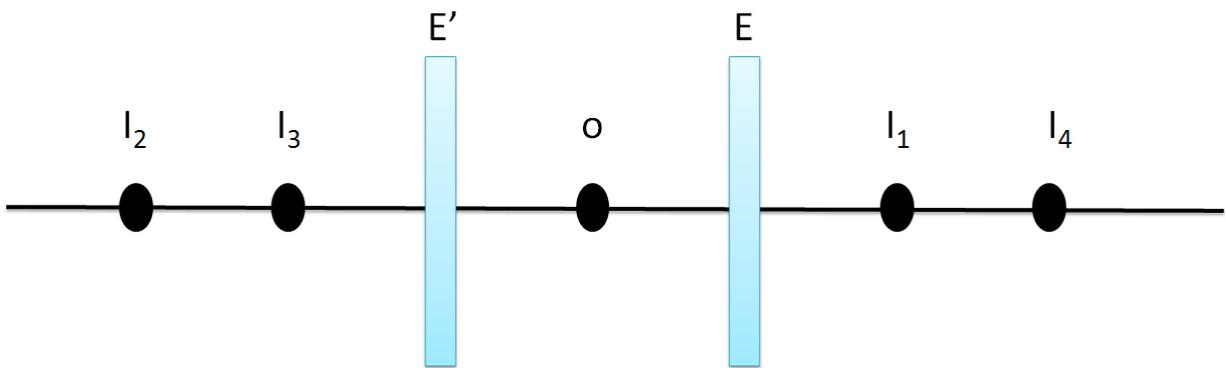


Fonte: Elaborada pelos autores.

A maior dificuldade em encontrar a saída do labirinto de espelhos no parque de diversões é devido à grande quantidade de espelhos em seu interior, dispostos em diferentes direções, com o intuito de confundir os visitantes. Estes diversos espelhos produzem imagens repetitivas criando ilusões de corredores que podem representar uma saída falsa do labirinto. Esse fenômeno é conhecido como efeito do espelho infinito e é produzido quando dois espelhos são colocados um de frente para o outro paralelamente. Para entendermos como isso

ocorre vamos utilizar a imagem apresentada na figura 3.2 onde temos dois espelhos paralelos um de frente para o outro.

Figura 3.2 – A imagem formada do objeto O no espelho E é dada por I₁. Essa imagem passa a ser um objeto para o espelho E', o qual produz a imagem I₂, a qual será um objeto para o espelho E, e assim por diante. Da mesma forma, a imagem de O em relação ao espelho E' é o ponto I₃, o qual será um objeto para E, produzindo a imagem I₄, e assim por diante. Desse modo, são formadas infinitas imagens.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Esse efeito é observado na foto apresentada na figura 3.3 onde colocamos um carrinho entre dois espelhos planos dispostos paralelamente um em frente do outro. Note o bonito efeito da imagem do carrinho se repetindo indefinidamente e alternando sua posição, mostrando a parte frontal e traseira do carrinho, por causa dos dois espelhos utilizados.

Podemos analisar e até quantificar esse fenômeno através do caminho óptico da luz, ou seja, a distância que a luz viaja em cada reflexão. Para isso vamos considerar uma pessoa em pé exatamente entre dois espelhos paralelos separados por uma distância d , ou seja, a pessoa está situada a uma distância $\frac{d}{2}$ de cada espelho, como mostra a ilustração da figura 3.4.

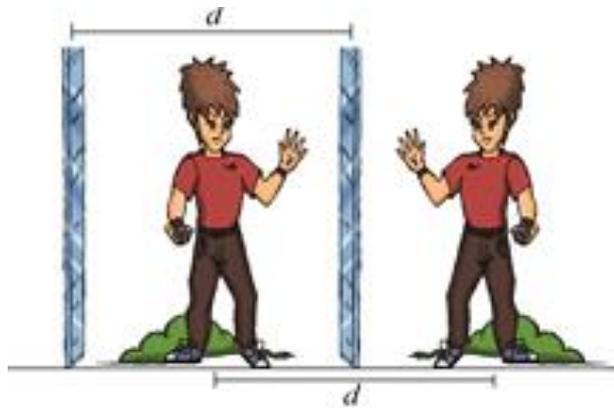
A primeira imagem do observador aparecerá à mesma distância $\frac{d}{2}$ do espelho que ele está observando, mas atrás deste espelho, ou a uma distância d do observador. A próxima imagem voltada para o observador será produzida pela reflexão da primeira imagem no espelho situado atrás dele. Como a primeira imagem está situada a $\frac{d}{2}$ do espelho de referência e os dois espelhos estão separados por uma distância d , ela estará a uma distância $\frac{d}{2} + d = 3\frac{d}{2}$ do espelho que está atrás do observador, como ilustrado na figura 3.5.

Figura 3.3 – Efeito do espelho infinito observado colocando-se um objeto entre dois espelhos planos dispostos paralelamente um de frente para o outro.



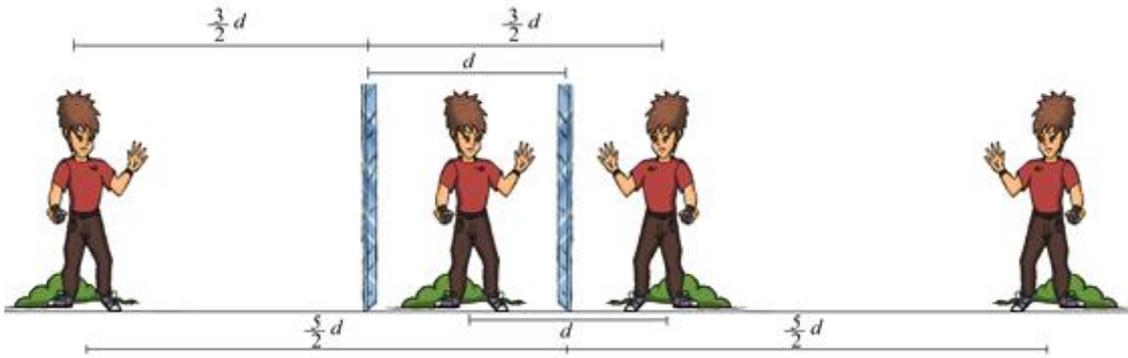
Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 3.4 – Imagem representando a situação de uma pessoa entre dois espelhos planos paralelos separados de uma distância d .



Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 3.5 – Sequência de imagens vista pelo observador.



Fonte: Elabora pelos autores.

Por sua vez, esta última estará a uma distância de $5\frac{d}{2}$ do espelho de referência formando a segunda imagem vista pelo observador. Continuando esse raciocínio é possível mostrar que as imagens formadas em ambos os espelhos obedecem a sequência de múltiplos ímpares de $\frac{d}{2}$, ou seja, $1\frac{d}{2}, 3\frac{d}{2}, 5\frac{d}{2}, 7\frac{d}{2}, \dots, n\frac{d}{2}$, para n ímpar crescendo indefinidamente. Esse fenômeno nos quadrinhos que produzimos é ilustrado através da formação de túneis falsos nos espelhos causando um efeito visual de um corredor sem fim.

Com isso podemos concluir que quando um objeto está localizado entre dois espelhos planos paralelos são formadas infinitas imagens decorrentes das reflexões das próprias imagens. Se tivermos apenas os espelhos um de frente para o outro é possível observar o efeito de um corredor infinito na sala de espelhos de um parque de diversões devido à reflexão de um espelho no outro.

É possível quantificar o número de imagens de um objeto formadas quando alguma associação de espelhos é realizada. Dependendo do ângulo θ formado entre os dois espelhos planos o número n de imagens é dado pela seguinte relação:

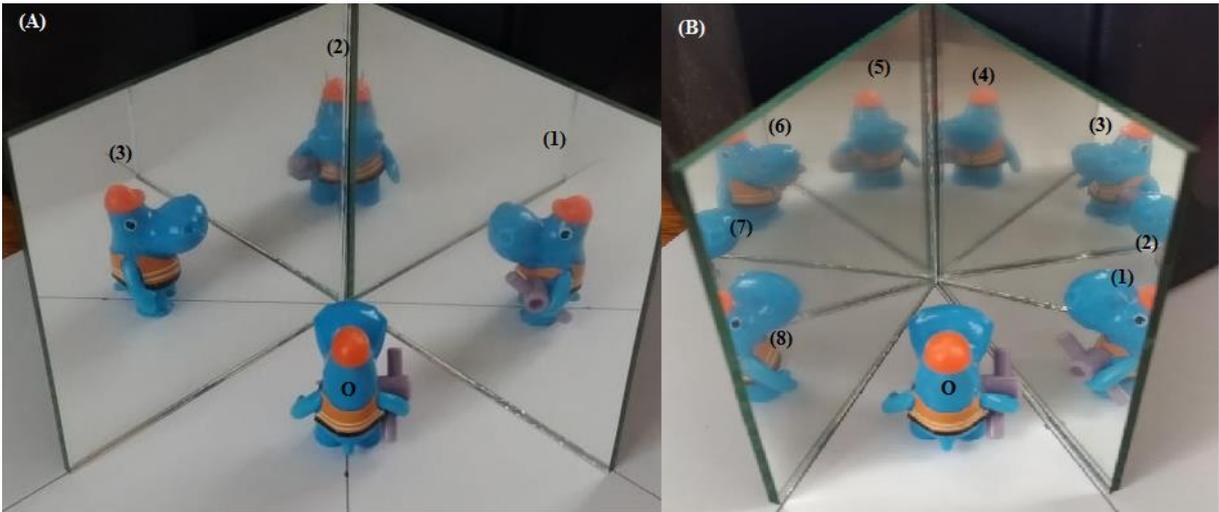
$$n = \frac{360^\circ}{\theta} - 1 \quad (11)$$

Essa expressão é válida quando n é dado por:

- Um número ímpar, para um objeto que está no plano bissetor de θ . O plano bissetor é um plano situado a 45° entre os planos vertical e horizontal. Para termos uma situação como esta, fizemos $\theta = 90^\circ$ na eq.(11) e posicionamos um boneco no plano bissetor, localizado a 45° de cada espelho. Pela eq.(11) devemos ter $n = 3$ imagens formadas. Isso é confirmado na figura 3.7(A).

- Um número par, para qualquer objeto colocado em qualquer ponto entre dois espelhos. Para verificar isto consideramos o ângulo entre os dois espelhos de $\theta = 40^\circ$. Pela eq.(11) devemos ter $n = 8$ imagens, como mostra a figura 3.7(B);

Figura 3.7 – (A) Quando colocamos um objeto a 45° (plano bissetor) de dois espelhos separados por 90° observa-se um número ímpar de imagens formadas, $n = 3$. (B) Quando o objeto é colocado entre dois espelhos separados por 40° observa-se a formação de um número par de imagens, $n = 8$, comprovando as condições em que a eq.(11) é válida.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Quando essas duas condições não são satisfeitas, o número de imagens formadas é simplesmente dado por:

$$n = \frac{360^\circ}{\theta} \quad (12)$$

Tanto a eq.(11) quanto a eq.(12) podem ser utilizadas para representar a situação em que temos dois espelhos paralelos, ou seja, $\theta = 0$. Como a divisão por zero não existe precisamos realizar uma operação chamada de o limite de uma função para calcular o número de imagens formadas nesta situação. Sendo $n = n(\theta)$, uma função de θ , podemos tomar a eq.(11) e calcular o seguinte limite,

$$\lim_{\theta \rightarrow 0} n(\theta) = \lim_{\theta \rightarrow 0} \left(\frac{360^\circ}{\theta} - 1 \right)$$

Usando a propriedade de limites, $\lim_{x \rightarrow a} [f(x) \pm g(x)] = \lim_{x \rightarrow a} f(x) \pm \lim_{x \rightarrow a} g(x)$, que pode ser encontrada em qualquer livro de cálculo diferencial e integral obtemos:

$$\lim_{\theta \rightarrow 0} \frac{360^\circ}{\theta} - \lim_{\theta \rightarrow 0} 1 = \infty - 1 = \infty \quad (13)$$

Este resultado mostra que se θ for um número muitíssimo pequeno, o mais próximo de zero possível teremos 360 dividido por este número que é quase zero, mas não é zero. Isso nos fornece um número muitíssimo grande. Isso pode ser melhor entendido se fizermos a operação para $\theta = 0,1$, fornecendo o resultado de $n = 3.599$. Se considerarmos θ cada vez menor, como por exemplo, $\theta = 0,01$; $0,001$; $0,0001$, obteremos os respectivos resultados para o número de imagens formadas $n = 35.999$; 359.999 ; $3.599.999$. Note que quanto menor θ maior será n de modo que quando θ tender a zero o número de imagens tenderá a infinito. Como mostrado na eq.(13) se subtrairmos 1 de um número muito grande continuaremos com um número muito grande. É importante lembrar que o símbolo infinito ∞ não representa um número e sim um processo de sempre aumentar um número ou grandeza por uma unidade indefinidamente. Uma vez que podemos diminuir θ indefinidamente podemos aumentar n indefinidamente, sendo este processo representado por ∞ .

Decidimos fazer tal análise para mostrar que é sempre possível utilizar algum formalismo matemático para explicarmos e entendermos fenômenos físicos. A matemática é indissociável da física e o seu uso deve sempre ser incentivado de alguma forma quando estamos ministrando aulas de física.

5.4. Pensando no Experimento da Dupla Fenda no Brinquedo de Tiro ao Alvo.

No decorrer do século XVIII vários pesquisadores se debruçaram sobre o problema de explicar a natureza da luz. Apesar das diferentes concepções existentes a maioria dos estudiosos defendiam a teoria corpuscular da luz devido à óptica newtoniana. Com a descoberta de novos fenômenos como a dupla refração da luz, a teoria corpuscular começa a perder forças, pois esta não era suficiente para fornecer explicações para tais fenômenos. No início do século XIX há o surgimento de obras que fazem com que a teoria ondulatória da luz ganhe mais espaço, como a explicação qualitativa e quantitativa de fenômenos ópticos importantes como os anéis de Newton, a polarização e a difração da luz (OLIVEIRA, MARTINS e SILVA, 2018).

Os trabalhos sobre difração e interferência de Thomas Young e Augustin Fresnel forneceram a base principal para a aceitação de uma nova teoria ondulatória da luz por praticamente todos os estudiosos até as três primeiras décadas do século XIX.

Neste trabalho, nós consideramos o experimento da dupla fenda de duas formas: realizados com partículas macroscópicas, como rolhas ou bolinhas de gude, e depois considerando um feixe de luz coerente como um laser. Estes dois efeitos são tratados em nossa HQ quando nossos personagens estiverem se divertindo no brinquedo de tiro ao alvo, em que eles disparam rolhas com uma espingarda de pressão nos alvos compostos por macaquinhos.

A brincadeira na HQ começa com as personagens tentando dificultar o número de acertos no tiro ao alvo colocando um obstáculo composto por duas fendas estreitas em frente à espingarda que dispara rolhas. As fendas são feitas em uma caixa de pizza. É interessante o professor iniciar a discussão considerando uma das fendas descoberta, digamos a fenda 1, e a outra fenda (2) coberta, para facilitar a explicação de que as rolhas se acumulam em uma região, logo após a fenda que está descoberta. Falamos região porque como as rolhas são disparadas por diferentes pessoas e podem se desviar ao colidir nas fronteiras da fenda, será muito difícil as rolhas se acumularem em um único ponto, por mais estreita que seja as fendas. Esse procedimento nos permite representar o resultado observado pelas nossas personagens através da introdução do conceito de probabilidade, em que teremos a função de distribuição das rolhas $P_1(x)\Delta x$ que nos fornece a probabilidade de uma rolha que passa pela fenda 1 acertar um macaquinho localizado no intervalo entre x e $x + \Delta x$.

Ao supor que a fenda 1 é coberta e a fenda 2 é descoberta a mesma discussão pode ser conduzida, com as rolhas se acumulando em uma região logo após a fenda dois, permitindo introduzir de forma análoga a função $P_2(x)$. Dessa forma, as curvas $P_1(x)$ e $P_2(x)$ fornecem a densidade de probabilidade de uma rolha passar pelas fendas 1 e 2, respectivamente, e acertar um macaquinho localizado na posição x .

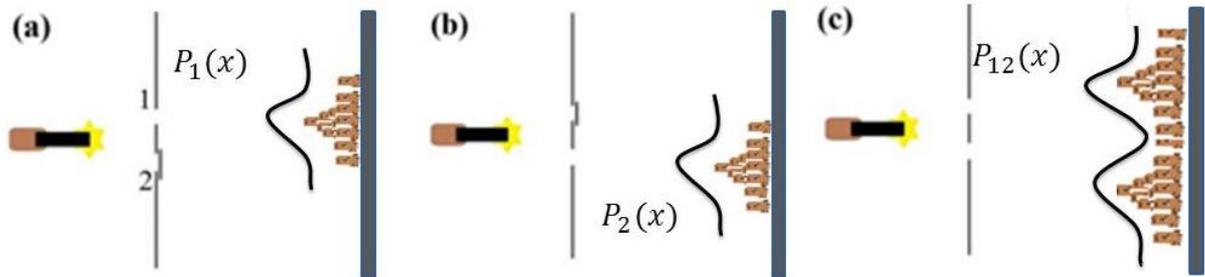
Considerando as duas fendas descobertas e com alguns dos atiradores atirando a esmo em direção à fenda dupla, as outras personagens observariam as rolhas atravessando algumas vezes a fenda 1 e outras vezes a fenda 2, variando entre as possibilidades de maneira aleatória. O resultado é a produção de duas pilhas de rolhas, logo atrás de cada fenda, de uma forma que a curva que descreve tal distribuição de rolhas, dada por $P_{12}(x)$, é simplesmente a soma dos resultados quando apenas uma das fendas estava descobertas, ou seja,

$$P_{12}(x) = P_1(x) + P_2(x) \quad (14)$$

Os resultados são ilustrados na figura 4.1.

Portanto, somente os macaquinhos que estiverem localizados na região dada por $P_{12}(x)$ serão derrubados.

Figura 4.1 – Experimento da dupla fenda realizado com uma espingarda que dispara rolhas maciças mostrando em (a) somente a fenda 1 descoberta, em (b) somente a fenda 2 descoberta e em (c) ambas as fendas descobertas. As curvas $P_1(x)$, $P_2(x)$ e $P_{12}(x)$ mostram a forma como as rolhas estão distribuídas na região logo atrás das fendas para as configurações (a), (b) e (c), respectivamente.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Se no lugar da espingarda de rolhas utilizarmos uma espingarda que dispara um feixe luminoso cuja fonte é um laser, a descrição do experimento será no contexto de ondas e não de partículas. Neste caso as ondas passam pelas fendas e atingem um anteparo onde é possível medir a intensidade das ondas como função da posição ao longo do anteparo. Para que o experimento possa ser contextualizado no parque de diversões as personagens deverão adaptar detectores de luz nos macaquinhos para que os mesmos forneçam alguma resposta quando forem atingidos por alguma intensidade luminosa. Como os fenômenos envolvidos são difração e interferência da luz é interessante o professor discutir o porquê de escolhermos um laser, que é uma fonte de luz coerente, e que a distância entre as fendas tem que ser da ordem do comprimento de onda λ da luz utilizada.

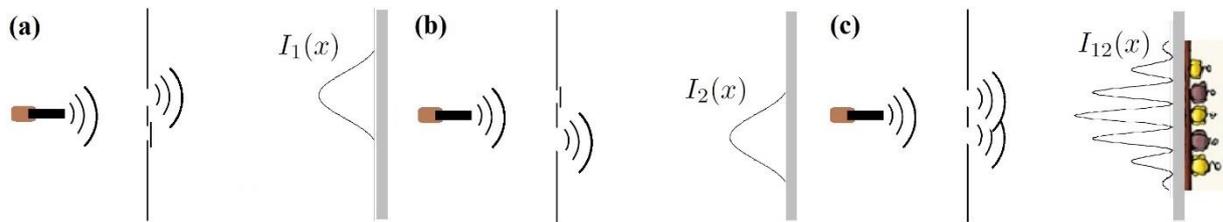
A luz coerente é importante para que haja interferência dos feixes que saem das duas fendas. A diferença de caminho óptico percorrido pelos dois feixes será responsável pela interferência construtiva e destrutiva da luz. Portanto, precisamos de uma fonte luminosa monocromática, mesma frequência, e que tenha uma relação de fase constante entre si, ou seja, uma luz coerente como o laser. A exigência de que a distância entre as fendas tem que ser da ordem de λ é justificada pelo fenômeno de difração, uma vez que esse efeito faz com que as fendas possam ser tratadas como fontes pontuais de luz fazendo com que haja interferência entre os feixes espalhados pela fenda.

Se realizarmos o experimento mantendo uma das fendas cobertas e a outra fechada, a distribuição da intensidade da luz resultante será semelhante ao resultado obtido para o caso

das rolhas, com o pico de intensidade máxima logo atrás da posição da fenda descoberta. Vamos chamar a intensidade proveniente da fenda 1 de $I_1(x)$, a qual é dada pelo quadrado da amplitude da onda incidente em x originada na fenda 1. Neste caso as fendas 1 e 2 são tratadas como fontes luminosas. Para a fenda 2 temos então $I_2(x)$. Os dois resultados estão ilustrados na figura 4.2 (a) e (b).

Com as duas fendas descobertas temos a intensidade resultante dada por $I_{12}(x)$, a qual apresenta um comportamento bem diferente com relação ao experimento com rolhas. Esta oscila entre máximos e mínimos de intensidade, formando um padrão de interferência, como mostrado na figura 4.2(c).

Figura 4.2 – Realizando o experimento da dupla fenda com um feixe luminoso observa-se as curvas (a) $I_1(x)$ e (b) $I_2(x)$, as quais fornecem as intensidades das ondas passando pelas fendas 1 e 2, respectivamente, quando somente uma das fendas está descoberta. Em (c) observamos o padrão usual de interferência da fenda dupla com a intensidade resultante $I_{12}(x)$ apresentando um comportamento oscilatório devido ao fenômeno de interferência construtiva e destrutiva dos feixes provenientes das fendas 1 e 2.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Pela teoria de interferência de ondas é possível demonstrar que,

$$I_{12}(x) = I_1(x) + I_2(x) + 2\sqrt{I_1(x)I_2(x)} \cos(\delta), \quad (15)$$

em que $\delta = \frac{2\pi d \sin(\theta)}{\lambda}$ é a diferença de fase entre as ondas provenientes das duas fendas chegando ao ponto x do anteparo a um ângulo θ com a direção de propagação das ondas, dada por uma linha horizontal que passa entre as duas fendas na figura A.4.2. Para observarmos o padrão de interferência a diferença de caminho óptico dos dois feixes luminosos, dada por $d \sin(\theta)$, precisa ser um múltiplo inteiro do comprimento de onda $n\lambda$ para interferência construtiva (faixas claras) e um múltiplo ímpar de meio comprimento de onda $(2n + 1)\frac{\lambda}{2}$ para interferência destrutiva (faixas escuras), para $n = 0, 1, 2, \dots$, de modo que tenhamos $\cos(\delta)$ igual a 1 e -1, respectivamente, na eq.(15).

É interessante salientar que o detector no anteparo não registra a chegada de acumulados ou “bolas” de energia das ondas. A intensidade de energia pode ter qualquer valor ao longo do anteparo.

Na nossa HQ as personagens discutem sobre as possibilidades de terem mais ou menos acertos utilizando os dois procedimentos descritos acima, com partículas e ondas. Pelos quadrinhos fica evidente que o experimento com a espingarda laser aumentaria a probabilidade de mais macaquinhos serem acertados, uma vez que os fenômenos de difração e interferência permitem que regiões mais afastadas da linha de tiro da espingarda, limitada pela dupla fenda, possam ter alguma intensidade luminosa.

REFERÊNCIAS

ANDRAUS, G. A história em quadrinhos como literatura imagética: para um reconhecimento da importância cultural das histórias em quadrinhos e código de linguagem imagético-literário. 2007. Tese (Doutorado em Interfaces Sociais da Comunicação) – Escola de Comunicações e Artes, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

AQUINO, F.F.; FIORUCCI, A. R.; BENEDETTI-FILHO, E. & BENEDETTI, L.P.S. Elaboração, aplicação e avaliação de uma HQ sobre conteúdo de história dos modelos atômicos para o ensino de química. Revista Orbital, v.7, n.1, p. 53-58, 2015.

CALICCHIO, S. R. & BATISTA, F. A contribuição do lúdico nos processos de ensino e de aprendizagem. Revista Eletrônica Científica, Inovação e Tecnologia, v. 8, n 17, p. 6, 2017.

CARVALHO, D. A educação está no gibi. São Paulo: Papyrus, 2006.

CHICORÁ, T., & CAMARGO, S. As histórias em quadrinhos no Ensino de Física. “Disponível em”: <http://abrapecnet.org.br/enpec/xipenc/anais/resumos/R0592-1.pdf>. Acesso em 30 mar. 2018.

EUZÉBIO, G. J., ADINEIA PACHECO, T. & MEDEIROS SCARABELOT, D.(s.d.) Fazendo uma aula diferente: Histórias em quadrinhos como ferramenta no ensino de astronomia. 2018.

GALLAS, R. MÁRCIA. Coerência. “Disponível em:” <http://www.if.ufrgs.br/~marcia/coerencia.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2019.

GOMES, C. T; GIORGI, G. A. C., RABONI, C. DE A. P. Física e Pintura: Dimensões de uma relação e suas potencialidades no ensino de Física. Revista Brasileira de Ensino de Física, v.33, n. 4, 2011.

GORNICK, LARRY. The Cartoon Guide to Physics. Reprint. Amazon, 1991.

IFSP.(21 de março de 2018). Instituto Federal de São Paulo. Acesso em 30 de março de 2018, disponível em Campus do IFSP recebem livros pedagógicos em formato de mangá: <https://www.ifsp.edu.br/noticias/481-campos-do-ifsp-recebem-livros-pedagogicos-em-formato-de-manga>

LOPES, E. M. e LABURÚ, C. E. Diâmetro de um Fio de Cabelo por Difração (Um Experimento Simples). Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v.21, n. especial, p.258-264, 2004.

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO ESPORTO. Parâmetros curriculares nacionais para o ensino médio. Brasília/DF.: MEC – Secretaria de Educação Média e Tecnológica (SEMTEC), 1999.

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO ESPORTO. Parâmetros curriculares nacionais para o ensino médio PCN+. Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros

Curriculares Nacionais – Ciências Humanas e suas Tecnologias. Brasília/DF: MEC – Secretaria de Educação Média e Tecnológica (SEMTEC), 2002.

MOREIRA, M. A. & MASINI, E. F. S. Aprendizagem significativa: A teoria de David Ausubel. São Paulo: Editora Moraes, 1982.

MOREIRA, M. A. Aprendizagem Significativa. Brasília: Editora UNB, 1999.

OLIVEIRA, J. G. Física em Tirinhas: Uma Proposta para a Sala de Aula. 2005. 79 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

OLIVEIRA, L. D. A Super-Física dos Super-heróis: Projeto, Física e Super-poderes, 2005.

OLIVEIRA, de R. Divulgação Científica em HQs. São José dos Campos, 2005.

OLIVEIRA, R. A., MARTINS, A. F. P. e SILVA, A. P. B. Thomas Young e a teoria ondulatória da luz no início do século XIX: aspectos conceituais e epistemológicos. Revista Brasileira de Física, v. 41, n. 2, e20180141, 2019.

PAIXÃO, S., PELICER, E. e SANTOS, S. Plataforma do Letramento. Bate-papo: HQ na Educação. “Disponível em”: <https://www.youtube.com/watch?v=feJ-sGK8wb4&t=70s>. Acesso em: 14 fev. 2019.

PLATAFORMA DO LETRAMENTO. RIBEIRO, P. R. AS Histórias em Quadrinhos como Elementos de Interação Social: Contribuição à Educação Inclusiva. “Disponível em:” http://www.uefs.br/vcbei/AS_HISTORIAS_EM_QUADRINHOS_COMO_ELEMENTOS_D_E_INTERACAO_SOCIAL_CONTRIBUICOES_A_EDUCACAO_INCLUSIVA.pdf. Acesso em: 10 jan. 2019.

RAMA, A.; VERGUEIRO, W.; BARBOSA, A.; RAMOS, T. & VILELA, T. Como usar as histórias em quadrinhos na sala de aula. Editora contexto : São Paulo, 2004.

SANTOS, T. C. & PEREIRA, E. G. C. Histórias em quadrinhos como recurso pedagógico. Revista Práxis, v.5, n.9, p.51-56, 2013.

TESTONI, L. A., & ABIB, M. L. (s.d.) Histórias em Quadrinhos e o Ensino de Física: Uma Proposta Sobre o Ensino de Inércia. “Disponível em:” <http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/epf/ix/sys/resumos/T0229-1.pdf>. Acesso em: 31 mar. 2018.

VERGUEIRO, WALDOMIRO. As Histórias em Quadrinhos e seus gêneros parte 1 (2001a). “Disponível em:” <http://omelete.uol.com.br/quadrinhos/as-historias-emquadrinhos-e-seus-generos-parte-1/>. Acesso em: 13 ago. 2018.

VERGUEIRO, WALDOMIRO. A linguagem dos quadrinhos: uma “alfabetização necessária”. In: RAMA, ANGELA; VERGUEIRO, Waldomiro (org). Como usar os quadrinhos na sala de aula? São Paulo: Editora Contexto, 2004.

VERGUEIRO, WALDOMIRO. Uso das HQs no Ensino. São Paulo: Editora Contexto, 2004.

VERGUEIRO, W. & RAMOS, P. Quadrinhos na educação. São Paulo : Editora Contexto, 2009.

ZANETIC, J. Física e Arte: Uma ponte entre duas culturas. Instituto de Física – Universidade São Paulo. 2006.