

Desenvolvimento em Ensino de Física

“Vendo o invisível”. Experimentos de visualização do infravermelho feitos com materiais simples e de baixo custo (“Seeing the invisible”. Low cost and ordinary materials experiments)

Daniel Neves Micha^{1,2,4}, Germano Maioli Penello^{2,4},
Rudy Massami Sakamoto Kawabata^{3,4} e Teo Camarotti^{3,4}

¹Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Petrópolis, RJ, Brasil

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

³Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

⁴Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Nanodispositivos Semicondutores, PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Recebido em 27/4/2009; Aceito em 9/11/2010; Publicado em 21/3/2011

Utilizando materiais e equipamentos simples e de fácil obtenção no dia a dia, apresentamos neste trabalho duas experiências com a intenção de auxiliar a introdução experimental ao espectro eletromagnético. Particular ênfase é dada à faixa espectral do infravermelho próximo e suas aplicações no cotidiano. A fim de visualizar essa região do espectro, uma *webcam* foi devidamente alterada de forma a tornar-se sensível a tal radiação. Na primeira parte deste trabalho, fazemos uma introdução sobre os emissores e sensores de radiação infravermelha. Na segunda parte, apresentamos os experimentos e os resultados obtidos.

Palavras-chave: infravermelho, espectro eletromagnético, câmera digital, *webcam*, ensino de física experimental.

By using ordinary and low cost equipments, we present in this work two experiments intending to improve the experimental introduction into the electromagnetic spectrum. Particular emphasis is given to the infrared range of the spectrum and its application in the daily life. In order to see the infrared, a digital camera was properly modified becoming sensitive to this particular range of the electromagnetic spectrum. In the first part of the work, we give a brief introduction on infrared sensors and emitter and in the second part we show the experiments and the results.

Keywords: infrared, electromagnetic spectrum, digital camera, webcam, teaching of experimental physics.

1. Introdução

Nossa percepção do mundo que nos cerca provém dos 5 sentidos que conhecemos: olfato, paladar, tato, audição e visão. Sendo que a visão é considerada o mais nobre dentre os 5, com tamanha complexidade que muitos opositores da teoria de evolução de Darwin utilizam-na como argumento favorável à teoria do design inteligente.²

Analisando com atenção o órgão responsável por esse sentido, podemos objetivamente defini-lo como um sensor de luz capaz de distinguir as cores. Contudo, aprenderemos mais a frente que a faixa que compreende a luz chamada visível (do violeta até o vermelho) constitui apenas uma pequena porção do espectro eletromagnético (Fig. 1). Tal espectro envolve as ondas das transmissões de rádio, as ondas que são utilizadas no

aparelho de microondas, o ultravioleta responsável pelo bronzeamento da nossa pele, e muitas outras, como a radiação infravermelha - o tópico central deste artigo.

Com relação à radiação infravermelha, descoberta em 1800 pelo astrônomo inglês William Herschel [1], as aplicações se dão, principalmente, na área de imageamento. As imagens de “visão noturna” e o mapeamento de temperaturas de um corpo (Fig. 2) são exemplos de aplicações utilizadas na área militar e na medicina, respectivamente. Além dessas, podemos citar outras aplicações como o controle remoto, sensores de presença, sensores de movimento em videogames, aparelhos para diagnóstico médico, células solares para geração de energia elétrica, telescópios capazes de ver astros distantes que não possuem luz visível própria, entre muitas outras [2].

¹E-mail: micha@if.ufrj.br; danielmicha@hotmail.com.

²A menção a esse fato pseudo-científico é apenas a título de curiosidade e não expressa a opinião dos autores sobre a questão.

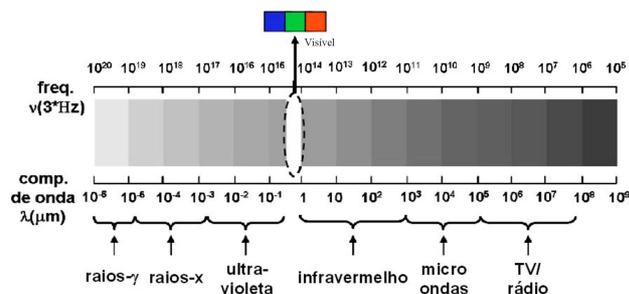


Figura 1 - Espectro eletromagnético.

Tudo o que enxergamos ou é produto de interação da radiação com os corpos ou a própria emissão de radiação por eles. Geralmente, o que enxergamos é devido à reflexão. O espectro de emissão de radiação por um corpo depende de sua temperatura. À temperatura ambiente, os corpos não emitem radiação na região visível do espectro eletromagnético, mas sim na região do infravermelho. É esse efeito que torna possível o imageamento dos corpos com pouca luz visível, como no caso da Fig. 2(a) e o mapeamento da temperatura de um corpo, como no caso da Fig. 2(b).

Para tornar práticas as aplicações mencionadas anteriormente, faz-se necessário o estudo de sensores apropriados para a radiação infravermelha, uma vez que nossos olhos não são capazes de assim o fazer. São esses sensores que nos dão o poder de “ver o invisível”.

Este artigo foi então escrito com o intuito de apresentar esta radiação a todos os interessados no funcionamento dos aparelhos que utilizam esse tipo de radiação e relacioná-los aos conceitos de física do eletromagnetismo. Iremos explorar formas de provar a existência dessa radiação e a sua presença em diversos objetos do nosso dia a dia. Em particular, sugerimos a apresentação dos experimentos em salas de aula do Ensino Médio, onde os recursos experimentais no ensino da física são comumente escassos. Por utilizar somente materiais de baixo custo e fácil obtenção, os experimentos não trazem empecilhos de serem realizados por qualquer interessado, seja ele professor ou não, em qualquer lugar e para qualquer público.

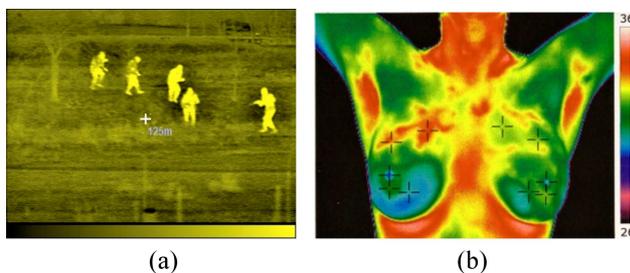


Figura 2 - Exemplos de aplicações da radiação infravermelha: (a) “visão noturna” de um campo de combate [3] e (b) mapeamento das temperaturas de um corpo feminino para detecção de tumores na região mamária [4].

2. Sensores e emissores de radiação infravermelha

2.1. Silício (Si)

Materiais semicondutores são muito utilizados para detectar a radiação infravermelha. Eles possuem a característica de modificar suas propriedades elétricas quando submetidos a esse tipo de radiação. Dentre os materiais semicondutores, o que mais se destaca por seu uso comercial é o silício (Si). Além de ter um custo baixo, ele é ideal para aplicações onde se deseja detectar a faixa de radiação do visível (400 nm a 700 nm) e do infravermelho próximo (700 nm a 1400 nm) por possuir absorção deste tipo de radiação, como pode ser visto na Fig. 3.

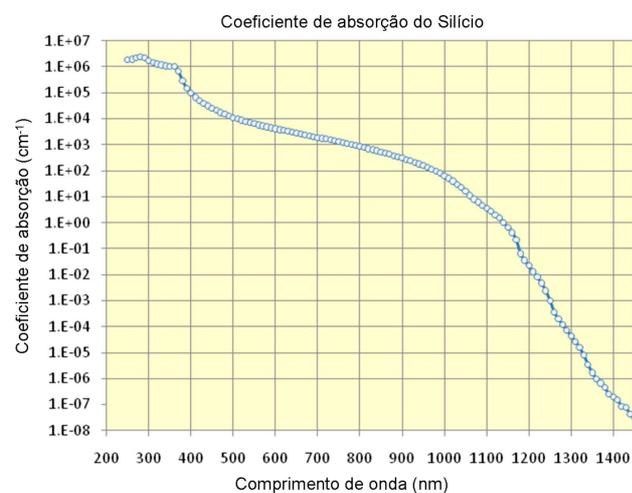


Figura 3 - Espectro do coeficiente de absorção do Silício (Si) [5].

2.2. Outros materiais

Além do silício, existem diversos materiais que tornam possível a detecção da radiação infravermelha. Ainda dentro dos materiais semicondutores, encontramos o germânio (Ge), o arseneto de gálio (GaAs), o fosfeto de índio (InP), etc. Cada um desses materiais tem uma faixa específica de absorção de radiação, o que faz com que cada um sirva a uma aplicação específica.

2.3. Câmeras portáteis

O fato de o silício possuir as características mencionadas na seção 2.1 faz dele o material mais indicado a ser implementado em sistemas fotográficos digitais. A construção de uma imagem digital requer dividi-la em pequenas partes denominadas *pixels*. Cada *pixel* traz informações espaciais da intensidade e da cor da luz em um determinado ponto da imagem. Portanto, cada *pixel* deveria ser um sensor isolado de Si, o que tornaria o processo muito mais caro, apesar de factível. Porém,

uma ideia revolucionária, que rendeu a seus descobridores o prêmio Nobel de 2009[6], resolveu esse problema. A invenção do *CCD* (*Charge-Coupled Device*) [7] tornou possível a produção de câmeras digitais portáteis mais baratas e acessíveis.

Como o objetivo das câmeras portáteis, como a *webcam*, é produzir uma imagem na região espectral do visível, um filtro de infravermelho é colocado entre o objeto a ser imageado e o sistema óptico da câmera. Desta forma, o infravermelho não atinge o sensor de silício e a imagem gerada contém apenas o espectro da região visível (em algumas câmeras esse filtro não é tão eficaz e um pouco do infravermelho ainda é observado).

2.4. Fontes térmicas

Como já mencionado na introdução deste artigo, a emissão de radiação por um corpo depende de sua temperatura. Emissores ideais são os corpos negros, corpos que absorvem toda a radiação que neles incide. Na Fig. 4 podem-se ver exemplos de espectros de corpos negros a diferentes temperaturas.

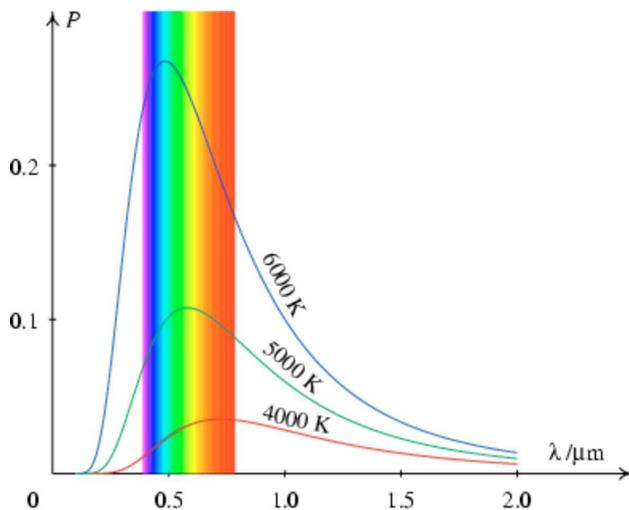


Figura 4 - Espectro de emissão para corpos negros a diferentes temperaturas. O gráfico representa a emitância de um corpo em função do comprimento de onda da radiação por ele emitida.

Nota-se que quanto menor a temperatura, o pico de emissão desvia-se para comprimentos de onda maiores e que a curva de emissão afasta-se da região espectral do visível. À temperatura ambiente (300 K), o pico de emissão está por volta de $10 \mu\text{m}$ e a curva possui pouca contribuição da região visível. O desvio da curva de emissão para comprimentos de onda menores com o aumento da temperatura fica claramente evidenciado no aquecimento de um pedaço de carvão. Notamos que à temperatura ambiente o carvão é negro, ou seja, a emissão é somente de radiação na faixa do espectro eletromagnético não visível pelo olho humano. À medida que é aquecido, vemos o carvão incandescer numa coloração avermelhada. Isso indica que o espectro de

emissão começou a entrar na região visível do espectro. Podemos, dessa forma, estimar sua temperatura. Existe uma série de programas de simulação computacional disponíveis na internet [8] onde é possível visualizar a mudança da curva de emissão em função da mudança de temperatura de um corpo negro.

2.5. Diodos emissores de luz (*LEDs* – *Light Emitting Diodes*)

Assim como são capazes de detectar a radiação infravermelha, os materiais semicondutores também o são de emití-la. Os *LEDs* são junções de materiais semicondutores que, quando submetidos a uma diferença de potencial, luminescem. O espectro de emissão de um *LED* possui uma largura de banda mais estreita que a das fontes térmicas, e, por isso, são utilizados em casos onde há necessidade de maior seletividade da radiação a ser estudada.

Além das fontes térmicas e dos *LEDs*, existem outras fontes de radiação infravermelha. Pode-se citar o *LASER* (*Light Amplificator by Stimulated Emission of Radiation*), cujo espectro de emissão é ainda mais estreito que o de um *LED*.

2.6. Controle remoto

Para realizar o controle de um aparelho remotamente, emissores e sensores de infravermelho também são utilizados. O controle remoto de uma televisão, por exemplo, possui um *LED* de infravermelho em sua extremidade, enquanto o aparelho de televisão possui um sensor desse tipo de radiação. Quando um botão do controle é acionado, um pulso de radiação infravermelha é enviado ao aparelho de televisão, que através do sensor decodifica o sinal e recebe a informação, realizando a operação desejada.

3. Experimentos

Com o intuito de demonstrar experimentalmente a existência da radiação infravermelha, elaboramos dois experimentos simples realizados com material de fácil obtenção. O experimento 1 ajuda a demonstrar ao aluno que apesar da radiação infravermelha não ser muito conhecida fora dos meios técnicos, é bastante utilizada em seu cotidiano. Já o experimento 2 demonstra a existência da radiação infravermelha presente em fenômenos naturais, tais como o arco-íris, porém demonstrada com meios artificiais análogos.

3.1. Experimento 1: “Enxergando a luz invisível de um *LED*”

Através desse experimento consegue-se demonstrar a luz infravermelha emitida por um *LED*. Como já dis-

cutido anteriormente, a luz infravermelha é invisível ao olho humano, o que faremos para poder enxergá-la é apontar um dispositivo sensível a essa radiação que a traduzirá em informação compreensível a nós. Isso será feito com uma *webcam* modificada e a informação processada aparecerá na tela de um computador, permitindo que vejamos o invisível.

Para que a *webcam* seja sensível tanto ao visível quanto à radiação infravermelha, o filtro de infravermelho foi retirado (um guia de como fazer essa etapa é apresentado no *box 1*) [9-11]. Ela é conectada ao computador via porta USB. Após instalação dos *drivers*, ela imageia como uma câmera de vídeo. Neste momento, a câmera já é sensível ao infravermelho, mas a imagem observada é dada muito mais pelo visível. Por esse motivo, colocamos na frente da câmera um filtro de luz visível. Materiais que podem ser utilizados para tal fim são o material magnético de um disquete *floppy* 3,5" ou um negativo revelado de filme de máquina fotográfica. Os materiais utilizados para a montagem dessa experiência podem ser vistos na Fig. 5



Figura 5 - Materiais utilizados na montagem do experimento 1: computador, *webcam* modificada, interior de disquete e controle remoto.

Ao acionar um diodo emissor de luz (*LED*), como se faz ao pressionar um botão de um controle remoto, gera-se radiação na faixa espectral do infravermelho. Quando visualizado por nós, aparentemente nada acontece, já que não enxergamos a radiação emitida pelo *LED*. Estamos diante de uma radiação invisível. Porém, quando apontamos o mesmo *LED* para a *webcam* com o filtro, vemos a fonte de radiação acionada, como pode ser visto na Fig. 6. Estamos, então, “vendo o invisível”. Na verdade, o sensor de Si está nos traduzindo esta radiação invisível, tornando-a visível através da conversão dessa radiação em um sinal elétrico que é enviado ao computador e depois transformado em imagem.

3.2. Experimento 2: “Enxergando a luz invisível além do vermelho”

3.2.1. Material utilizado

Com esse experimento, demonstra-se a continuidade do espectro eletromagnético após a última cor visível - o vermelho. Ao separar o espectro de cores de uma fonte de luz branca, como uma lanterna de filamento, por exemplo, através de um fenômeno dispersivo (refração, difração), observa-se as cores do arco-íris. O interessante é que após o vermelho existe mais radiação [12], mas não a vemos. Nesse experimento, utilizamos um DVD para dispersar as diversas componentes de uma fonte de luz branca, como num arco-íris artificial, e através da *webcam* modificada percebemos a radiação não visível ao olho humano. Os materiais utilizados na montagem dessa experiência são vistos na Fig. 7.



Figura 6 - Experimento mostrando a existência de luz invisível (radiação infravermelha). O *LED* de um controle remoto, cuja radiação não pode ser enxergada pelos olhos humanos, é identificado por uma *webcam*.



Figura 7 - Equipamentos utilizados na montagem do experimento 2: lanterna com lâmpada de filamento, DVD, *webcam* modificada, computador, anteparo e filme fotográfico revelado.

Apontando a luz branca da lanterna para um DVD, observa-se seu espectro devido ao fenômeno da difração. Na região onde se visualiza o espectro decomposto, coloca-se um anteparo para uma melhor visualização. A olho nu as cores visíveis são observadas dispersas como em um arco íris. Um exemplo pode ser visto na Fig. 8.



Figura 8 - Decomposição da luz branca de uma lanterna por um DVD através do fenômeno da difração. Fotografia obtida com uma câmera convencional cujo filtro de infravermelho não foi removido.

Após o vermelho nenhuma cor é observada a olho nu no espectro da luz branca. Porém, nessa região existe

radiação, o infravermelho, que não pode ser vista pelo olho humano. A *webcam* alterada é apontada para essa região. Na Fig. 9a podemos ver que surge um clarão branco após a cor vermelha. Esta é a radiação infravermelha emitida pela lanterna e que está sendo capturada pela *webcam*. É a luz invisível que agora podemos enxergar. Para não deixar nenhuma dúvida de que este clarão é radiação infravermelha, fizemos uma sequência de fotos inserindo um filtro de luz visível, o negativo revelado de um filme fotográfico, na frente da lanterna. Na Fig. 9 podemos ver a sequência da inserção do filtro de luz visível no caminho óptico do feixe de luz e a consequente imagem que é formada. A sequência mostra que a radiação visível é cortada pelo filtro, mas, ainda assim, o clarão branco após a cor vermelha continua existindo. Cabe ressaltar que não conseguimos fazer esse experimento com o interior do disquete, por ele ter uma transmissão muito baixa para o infravermelho e que no experimento 1 este pode ser substituído pelo filme fotográfico revelado. Outro detalhe é o fato de necessitarmos de um ambiente bastante escuro para que a luz ambiente não se sobreposse à luz da lanterna.

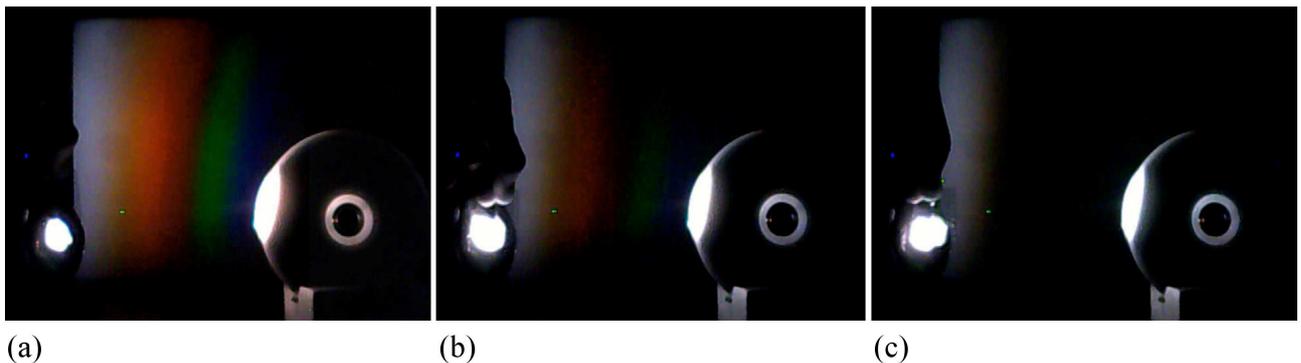


Figura 9 - Sequência de fotografias do experimento 2 retiradas com a *webcam* “alterada”: Luz branca de uma lanterna é difratada por um DVD gerando a divisão de seu espectro visualizada no anteparo. (a) feixe de luz sem filtragem, (b) parte do feixe passando pelo filtro (c) feixe de luz passando totalmente pelo filtro.

4. Conclusão

Através destes simples experimentos demonstra-se a existência da radiação infravermelha de uma maneira bem ilustrativa. Acreditamos serem esses métodos interessantes para mostrar ao estudante a existência de outros tipos de radiação fora da faixa espectral que enxergamos, uma vez que nada é melhor do que “ver o invisível” para acreditar nele. Os experimentos foram realizados com materiais de fácil obtenção e de baixo custo.

Os autores (Fig. 10) gostaríamos de agradecer à coordenadora do Laboratório de Semicondutores (Lab-Sem) da PUC-Rio e do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Dispositivos Semicondutores (DISSE) Patrícia Lustoza de Souza, ao pesquisador e amigo Maurício Pamplona Pires e aos colegas de laboratório

pela ajuda no trabalho. À CAPES e à FAPERJ pelo suporte financeiro.



Figura 10 - Rudy, Daniel e Germano sob a luz de um LED infravermelho captada pela *webcam* “alterada” com o filtro de luz visível.

Box 1 - Guia para retirada do filtro de infravermelho de uma *webcam* [12].

Retirar o filtro de infravermelho de uma *webcam* é bem simples, mas requer alguns cuidados para não prejudicar o sensor CCD nem o alinhamento das lentes. O primeiro passo é abrir a *webcam*, isolando a placa do circuito elétrico impresso que contém o CCD e as lentes (Fig. 11(a)). Feito isso, as lentes ópticas podem ser removidas girando-as da mesma forma que se ajusta o foco da câmera (Fig. 11(b)). Atenção, o sensor CCD ficará exposto! Qualquer sujeira que grudar ou objeto que bater no sensor, prejudicará a imagem final. Cubra o sensor e mantenha-o assim até o momento da remontagem.

Agora, com muito cuidado, as lentes podem ser retiradas do conjunto lentes/suporte. Como fazer isso dependerá da *webcam* utilizada. Em algumas das marcas testadas basta desrosquear o sistema de lentes, já em outras este vem colado ao suporte e a desmontagem requer a habilidade de cortar ou serrar o suporte de maneira que seja possível remontá-lo novamente. Este passo requer muita cautela, pois as lentes, o filtro de infravermelho e os espaçadores podem se soltar no momento em que se desmonta o conjunto. Ao abri-lo (Fig. 11(c)), memorize a posição e a ordem de cada lente e espaçador para fazer a remontagem. Se apenas uma lente for colocada no sentido errado, a *webcam* não formará uma imagem nítida. Para finalizar, separe o filtro de infravermelho e remonte o conjunto relembando a ordem em que as lentes e suportes foram retirados (Fig. 11(d)).



Figura 11 - Sequência de retirada de filtro IR: (a) desmontagem da *webcam*, (b) remoção do sistema de lentes, (c) separação do filtro de IR e (d) remontagem do sistema de lentes.

Referências

- [1] W. Herschel, Philosophical Transactions of the Royal Society of London **90**, 284 (1800).
- [2] vídeo de divulgação das tecnologias em infravermelho. Disponível em <http://www.cetuc.puc-rio.br/~jcelio/video/Infravermelho.mov>.
- [3] Sítio de divulgação: <http://www.imaging1.com/thermal/specterIR.html>.
- [4] Sítio de divulgação: http://www.thermographyclinic-kw.com/Site/Clinical_Thermography.html.
- [5] M.A. Green e M. J. Keevers, Progress in Photovoltaics: Research and Applications **3**, 189 (1995).
- [6] Sítio da Fundação Nobel: http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2009/illpres.html.
- [7] G.E. Smith e Boyle, W.S., Bell Syst. Tech. Journal. **49**, 587 (1970).
- [8] Sítio da universidade de Colorado: <http://phet.colorado.edu/en/simulation/blackbody-spectrum>.
- [9] N.A. Gross, M. Hersek e A. Bansil, American Journal of Physics **73**, 986 (2005).
- [10] K.P. Mollmann e M. Vollmer, European Journal of Physics **28**, S37 (2007).
- [11] Z. Bochnicek, Physics Education **43**, 51 (2008).
- [12] Disponível em <http://www.hoagieshouse.com/IR/>.