

RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA: DA PRÁTICA À TEORIA

Leandro Ribeiro Pinto¹ [leandorp@if.ufrj.br]

Vitorvani Soares² [vsoares@if.ufrj.br]

¹ Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro

² Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro

Resumo

Este trabalho foi baseado em minha monografia de final de curso ^[i] e aborda assuntos da física contemporânea que estão de acordo com alguns itens do artigo 43 da Lei de Diretrizes e Bases (LDB) ^[ii]. Queremos discutir com os alunos qual é a relação entre a radiação emitida por um corpo aquecido e sua temperatura. As aplicações e especulações deste tema são assuntos bem atuais e muito discutidos pela comunidade física do século 21, em uma tentativa de explicar fenômenos astronômicos, atmosféricos e da física de partículas elementares. Quando falamos em física contemporânea, fazemos referência às descobertas de aproximadamente cem anos atrás, o que para física é pouco tempo. A nossa intenção é estimular o conhecimento dos problemas do mundo atual que são pouco comentados na maioria das escolas no Brasil, de forma que os alunos do terceiro ano do ensino médio possam, pelo menos, acompanhar as notícias atuais sobre ciência e tecnologia. Para melhor entendimento do conteúdo, tentamos seguir as normas que os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN's) ^[iii] de física sugerem, tais como propor experimentos que permitam explorar os conceitos da física contemporânea, interligando-os com o cotidiano do aluno. Com isso, através da medição de algumas grandezas, podemos, por análise gráfica, verificar se existe alguma relação entre estas grandezas. A interpretação desta possível relação é importante para criar um modelo teórico na finalidade de explicar os fenômenos observados no experimento. Porém, alguns procedimentos utilizam aparatos experimentais comerciais de custo elevado, o que dificulta a aquisição deste material pelas escolas. Com isso, propomos também neste trabalho um experimento de baixo custo, de forma que possa ser implementado em colégios sem laboratórios ou com escassos recursos financeiros.

Palavras-chave: Radiação eletromagnética, lâmpada incandescente, corpo negro, física moderna, Ensino Médio.

1. Introdução

É muito comum o aluno de Ensino Médio reclamar da quantidade de fórmulas que precisa assimilar para resolver uma prova de física. Então uma alternativa encontrada pelo aluno é a famosa “decoreba”. Para evitar que ele decore a fórmula sem entendê-la, utilizamos um método que pretende melhorar a compreensão do aluno através de um experimento de baixo custo. A intenção é tornar a aula mais instrutiva e menos monótona, convidando o aluno a realizar o experimento com o professor e deixando que cada um tire suas conclusões, aguçando o poder crítico de todos. Através de uma análise gráfica, os alunos podem chegar nas equações e assim construir um conhecimento. Esse processo de desencadeamento de idéias é uma tentativa de mostrar ao aluno que a teoria pode

ser construída a partir de um experimento e uma análise gráfica. Se o aluno sabe como a equação foi obtida, a assimilação e compreensão da equação são dadas de forma mais eficiente e natural.

2. Metodologia

Quando nós construímos o aparato experimental que será mostrado a seguir, selecionamos certos passos que, como professores, nós poderíamos trilhar: apresentação, primeiro contato, experimento e conclusão. Esta é uma proposta que poderá ser seguida em sala de aula. Aachamos que o professor deverá adequar o conteúdo à turma em que trabalha da melhor forma possível, de modo que não prejudique o aprendizado do aluno. Então, vamos a nossa proposta.

O primeiro passo poderia ser a apresentação do aparato em sala de aula sem anunciar de início o tema da aula, gerando curiosidade entre os alunos. O aparato é composto principalmente por uma lâmpada incandescente acesa e por um objeto, que é de medição. Para esclarecer a curiosidade deles apresentaríamos o tema da aula: “Relação entre a potência total de um corpo aquecido e sua temperatura”. Nesta etapa consideramos que os alunos do terceiro ano do ensino médio já saibam o conceito de potência e temperatura, pois eles já aprenderam os conceitos básicos da termologia e da eletrodinâmica.

O segundo passo poderia ser a explicação de que a lâmpada incandescente representa um corpo aquecido e o medidor, que no caso é o multímetro básico, faria a coleta de dados sobre a proposta do tema. Aproveitando esta etapa, nós tentaríamos chamar a atenção dos alunos, convidando-os a manter uma das mãos a certa distância fixa da lâmpada e nós aumentaríamos gradativamente a intensidade luminosa, através de um potenciômetro. Esperamos que a maioria dos alunos já experimentou esta sensação em casa, como por exemplo, na beira de um fogão a gás. Por analogia, o potenciômetro poderia ser o regulador da chama do fogão e a lâmpada seria a chama. Este exemplo pode ser apresentado em sala de aula para mostrar que o tema tem forte relação com o cotidiano do aluno e aumentar o seu raciocínio hipotético-dedutivo, porém alertando sobre os riscos de ficar próximo ao fogão.

Convidaríamos, posteriormente, os alunos para entenderem o conceito físico envolvido, realizando conosco o experimento, enquanto nós iríamos propor o que vai ser medido e de que forma.

Para finalizar, o quarto passo consiste na apreciação dos dados experimentais, mostrando que um corpo aquecido, como a lâmpada incandescente, pode ser reconhecido como uma definição já estabelecida na física.

3. Experimento

3.1. Objetivo

Pela percepção qualitativa, estimulando a criatividade e a imaginação dos alunos através de raciocínios hipotético-dedutivos, eles podem verificar que existe uma relação entre a potência que a lâmpada está dissipando e a sua temperatura. Então o objetivo deste experimento é mostrar, com o uso de uma abordagem matemática razoavelmente fácil, qual é esta relação.

3.2. Material utilizado

Como o nosso propósito é apresentar um aparato experimental simples e de baixo custo para verificar a relação entre a potência total que um corpo aquecido emite e a sua temperatura, nada mais barato do que uma lâmpada incandescente.

Pelo fato da lâmpada conter um bulbo de vidro que impede a entrada de um termômetro, não podemos medir a temperatura do filamento diretamente, por isso fazemos uso do multímetro, na tentativa de correlacionar uma grandeza que o multímetro possa medir com a temperatura. Esta grandeza é a resistência do filamento da lâmpada.

O circuito 1 é formado por um fio de $(15,00 \pm 0,05)$ cm de comprimento para ligar a lâmpada de 60 W ou 100 W em uma tomada, cuja voltagem será de 127 V, aproximadamente. Um potenciômetro será ligado em série com a lâmpada para controlar a corrente elétrica e, para medir os dados que queremos, utilizaremos um amperímetro e um volímetro (reunidos no multímetro).

Todos os componentes do circuito 1 foram reunidos em uma prancha de madeira reutilizada e pintada de $(20,50 \pm 0,05)$ cm de largura por $(21,00 \pm 0,05)$ cm de comprimento. Foram acrescentados conectores para facilitar a leitura dos medidores. Também pode ser visualizado na foto do circuito um fio que permite a leitura da corrente elétrica pelo multímetro. O valor da corrente é dado pela lei de indução de Faraday.

A prancha de madeira que contém o circuito 1 é sustentada por pés de madeira também reutilizadas e pintadas, com $(21,00 \pm 0,05)$ cm de comprimento por $(5,70 \pm 0,05)$ cm de altura.

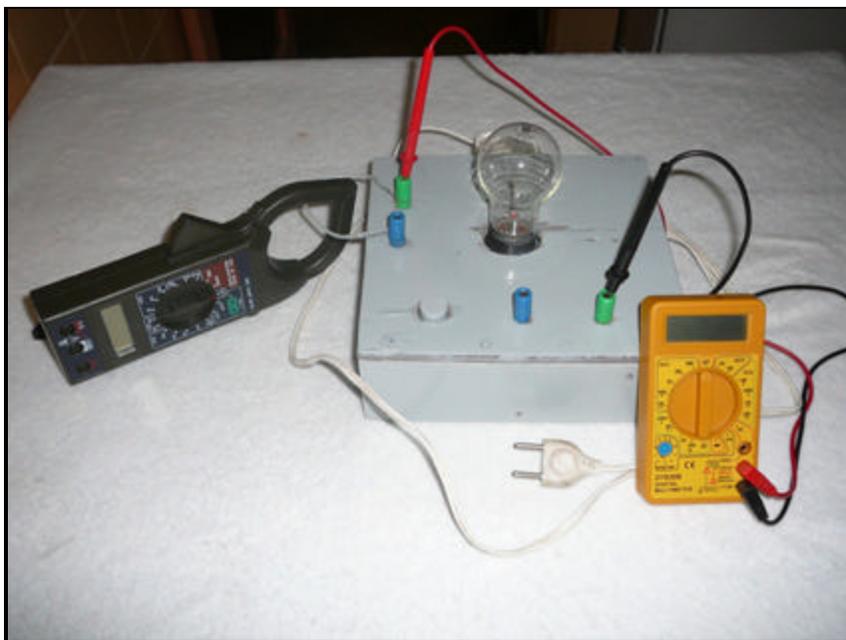


Figura 01 : Imagem do circuito, em que se observa o uso de um amperímetro que mede a corrente por indução, à esquerda na foto.

3.3. Descrição da experiência

Inicialmente a temperatura ambiente foi medida com um termômetro, enquanto que a resistência do filamento de tungstênio, nesta temperatura, e a ddp na tomada foram medidos com o multímetro. Com estes dados iniciais que constam no Quadro 01 poderemos calcular os parâmetros que desejamos.

Todos os dados medidos do circuito 1 são valores médios, pois a corrente e a voltagem da tomada são alternadas.

Quadro 01: Dados experimentais iniciais do circuito 1.

$T_0 = (298 \pm 1) \text{ K}$
$R_0 = (19,5 \pm 0,2) ?$
$V_{TOMADA} = (125 \pm 2) \text{ V}$

Como estamos interessados em verificar a dependência da potência com a temperatura do filamento da lâmpada, devemos encontrar estes valores correlacionados.

Para calcular o valor da potência dissipada no filamento, podemos girar o botão do potenciômetro, variando a resistência do circuito e conseqüentemente, a corrente elétrica que passa pela lâmpada. Assim, para cada valor de corrente lido no multímetro, teremos um valor de voltagem. Se multiplicarmos estas duas grandezas teremos os valores da potência dissipada na lâmpada.

$$P = Vi. \quad (1)$$

Podemos repetir os passos anteriores para as lâmpadas que alcançam potências máximas diferentes, que no caso deste experimento foram usadas lâmpadas de 60 W e 100 W (potências fornecidas pelo fabricante em uma determinada tensão e corrente elétrica).

Para calcularmos o valor da temperatura no filamento, primeiro mensuramos o valor da resistência. Para isso, vamos verificar o comportamento da voltagem na lâmpada em função da corrente elétrica em um gráfico.

Pelo gráfico da Figura 02, nota-se que a relação entre voltagem e corrente não é linear. Mas os pontos deste gráfico estão em temperaturas diferentes, assim não tem cabimento nós conceituarmos o filamento de ser ôhmico ou não, para este procedimento. Então para verificarmos isto, deveríamos manter a temperatura constante à medida que aumentássemos a corrente elétrica no filamento. Como este procedimento pode fugir da nossa proposta inicial de fazermos um experimento simples de ser realizado, nós verificamos na referência [iii] que o filamento de tungstênio pode ser ôhmico para cada temperatura.

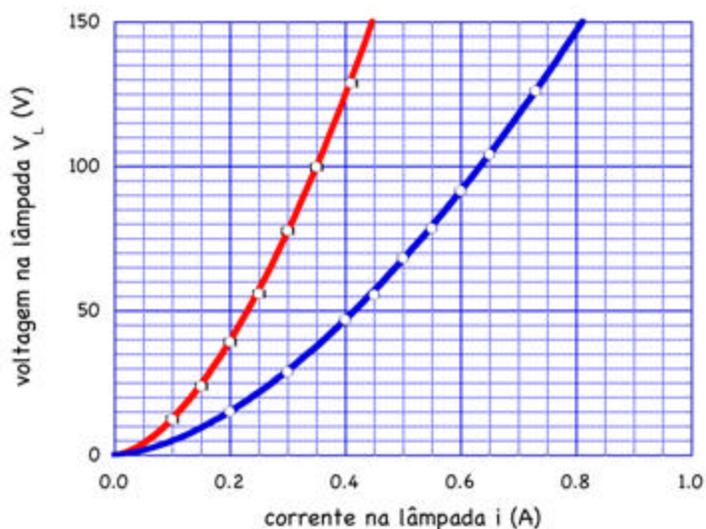


Figura 02: Gráfico da voltagem vs. a corrente elétrica no filamento. A curva em vermelho representa a lâmpada de 60 W, enquanto que a curva em azul representa a lâmpada de 100 W.

Logo, pela lei de Ohm, para cada medida de potência podemos encontrar uma medida de resistência, em uma dada temperatura. Assim, para cada valor de resistência podemos correlacionar com um valor aproximado de temperatura do filamento, através da seguinte equação:

$$T \approx T_0 + \frac{1}{\alpha} \left(\frac{R}{R_0} - 1 \right), \quad (2)$$

onde α é o coeficiente de temperatura da resistividade para o tungstênio, cujo valor é $5,3 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1} [\text{W}]$.

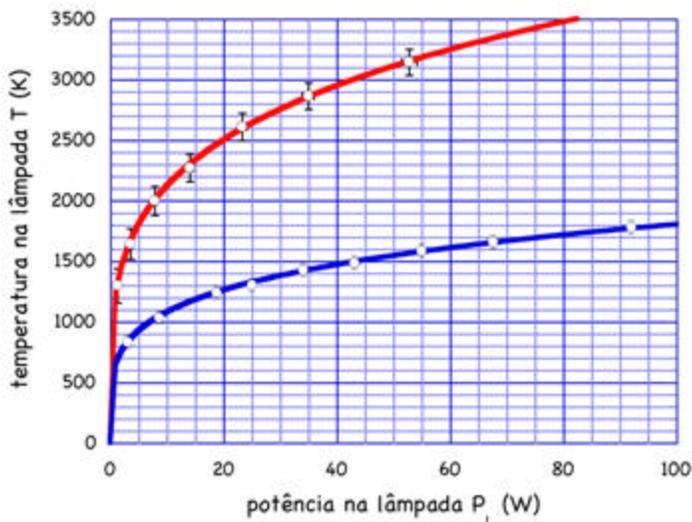


Figura 03: Gráfico da temperatura vs. potência do filamento. A curva em vermelho representa a lâmpada de 60 W, enquanto que a curva em azul representa a lâmpada de 100 W.

Como podemos verificar pelo gráfico da Figura 03, a potência da lâmpada não tem uma dependência linear com a temperatura. Logo, para descobirmos o valor desta dependência, podemos utilizar um gráfico log-log, contido na Figura 04. Como geralmente o gráfico log-log não é utilizado pela maioria dos professores de ensino médio, uma alternativa proposta por nós é transformar os dados experimentais contidos em uma tabela para outra tabela com seus valores na escala logarítmica. Assim, a partir desta nova tabela, podemos produzir um gráfico na escala normal, só que com o logaritmo dos dados. Esta proposta também é uma forma do aluno usar o conteúdo aprendido em matemática aplicando na física.

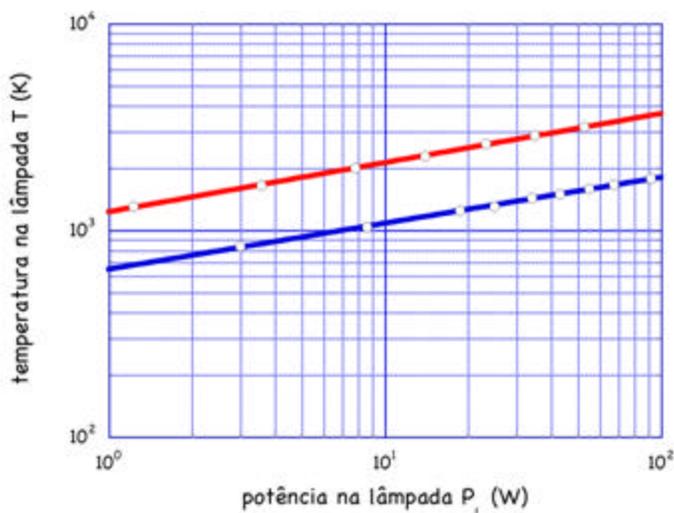


Figura 04: Gráfico do logaritmo da temperatura vs. logaritmo da potência da lâmpada. A curva em vermelho representa a lâmpada de 60 W, enquanto que a curva em azul representa a lâmpada de 100 W.

4. Conclusão

Como foi visto no gráfico da Figura 04, pela inclinação das retas, à medida que aumentamos a potência da lâmpada incandescente, a sua temperatura também aumenta. Isto porque, à medida que aumentamos a corrente elétrica que passa pelo filamento, o efeito Joule se torna mais intenso, fazendo com que mais elétrons colidam com as resistências do filamento e assim, dissipem mais energia na forma de luz e calor, como observado no cotidiano.

A relação entre temperatura e potência na lâmpada, de acordo com o gráfico da Figura 04, pode ser escrita desta forma:

$$\log(T) = \log(A) + X \cdot \log(P) \quad (3)$$

Aplicando as regras do logaritmo na equação anterior:

$$\log(T) = \log(A) + \log(P^X) \quad (4)$$

ou, ainda, que

$$\log(T) = \log(A.P^X) \quad (5)$$

Da Figura 04, chegamos a seguinte relação entre a temperatura T da fonte luminosa e a sua potência emitida P :

$$T = A.P^X \quad (6)$$

Com isso, pela análise gráfica, podemos deduzir que o expoente da temperatura em relação a potência da lâmpada é de aproximadamente 0,25. Porém, para obtermos um resultado mais preciso para o coeficiente X , podemos utilizar o método dos mínimos quadrados para determinar o coeficiente angular das retas.

Tabela 01: Resultados da análise da Figura 04.

Parâmetros	Lâmpada de 60 W	Lâmpada de 100 W
log (A)	3,089 ± 0,003	2,810 ± 0,004
X	0,237 ± 0,002	0,223 ± 0,003

Outra observação clara que podemos verificar da Figura 04, é que as duas retas não se sobrepõem. Ou seja, para uma mesma temperatura, a potência nas duas lâmpadas é diferente.

$$T = A_1.P_1^{X_1} = A_2.P_2^{X_2} \quad (7)$$

em que os índices 1 e 2 representam as lâmpadas de 60 W e 100 W, respectivamente.

Como já foi mencionado, quanto maior for a temperatura na fonte, maior será sensação luminosa que agora podemos comparar com a intensidade luminosa (I). Esta grandeza é definida como potência (P) por unidade de área (S). Assim, se tivermos a mesma temperatura (T) na lâmpada, é provável que haja a mesma intensidade luminosa. Para que isto aconteça, os parâmetros A_1 e A_2 deverão estar relacionados com as áreas dos filamentos da seguinte forma:

$$A = \frac{c}{S^X} \quad (8)$$

onde c é uma constante. Então, podemos dizer que:

$$T = c \left(\frac{P}{S} \right)^X \quad (9)$$

ou, ainda, que:

$$T = c(I)^x \quad (10)$$

A equação (10) é interessante porque não depende da geometria da lâmpada, ou seja, para qualquer área do filamento, esta equação é válida. Assim, as duas curvas apresentadas no gráfico da Figura 04 ficariam sobrepostas, se fizéssemos um gráfico de temperatura por intensidade luminosa.

Como não pretendemos encontrar o valor de c neste experimento, não será preciso obter experimentalmente as áreas dos filamentos de tungstênio, o que seria um passo para a continuação deste trabalho. Porém, podemos verificar visualmente que a área do filamento da lâmpada de 60 W é menor do que o filamento da lâmpada de 100 W. Por isso, para uma mesma temperatura, a lâmpada de 60 W deve ter a potência menor do que a lâmpada de 100 W. Conseqüentemente terão a mesma intensidade luminosa.

Se invertermos a equação (10), poderemos compará-la com o resultado histórico de Stefan:

$$I = \left(\frac{1}{c} T \right)^{\frac{1}{x}} \quad (11)$$

Tabela 02: Comparação dos expoentes para a temperatura na lâmpada.

<i>Lâmpada</i>	<i>60 W</i>	<i>100 W</i>
Expoente da Temperatura	4,21 ± 0,04	4,49 ± 0,06

Na literatura podemos encontrar o conceito de corpo negro ou corpo cinza que se comportam de maneira análoga à lâmpada incandescente. Para isso devemos definir o que é corpo negro ou cinza.

Para entendermos o conceito de corpo negro, devemos saber, “à priori”, que todos os corpos podem emitir radiação. Esta radiação pode ter vários comprimentos de onda, inclusive na faixa do visível, como se vê em um metal bem aquecido, como um filamento de lâmpada, ou um carvão em brasa que podem emitir radiação visível, na forma de luz vermelha.

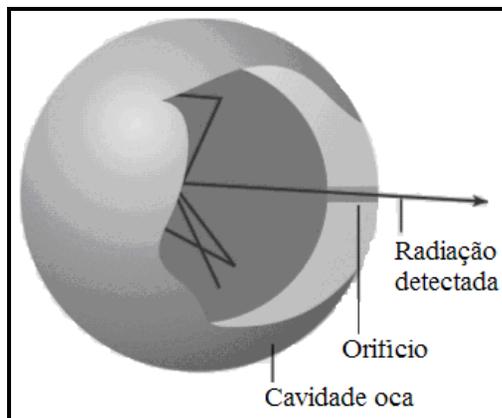


Figura 05: Ilustração de um corpo negro emitindo radiação devido a sua temperatura.

Os corpos negros por definição são aqueles que absorvem toda energia (radiação) que incide em suas paredes. A radiação térmica emitida pelo corpo negro é chamada de radiação de corpo negro. Uma visualização bem conhecida (Figura 05) é um recipiente metálico oco com as paredes da cavidade escurecidas e com um orifício pequeno em uma das paredes.

Quando as paredes do recipiente estiverem aquecidas e for atingido o equilíbrio térmico na cavidade, a radiação que sai pelo pequeno orifício pode ser considerada como radiação emitida pelas paredes da cavidade do corpo negro, devido à temperatura.

Como os corpos negros são idealizações, o mais comum é encontrarmos na natureza corpos “cinza”, isto é, corpos cujas superfícies possuem coeficiente de absorção menor que um (também pode refletir a radiação, havendo uma pequena perda na absorção) e independente do comprimento de onda. Assim, teve-se a idéia de que qualquer corpo aquecido poderia emitir radiação e que essa estaria relacionada com a sua temperatura e não com o material que compõe o corpo.

É importante nesta etapa salientar que um corpo negro ou cinza não tem necessariamente a forma de uma caixa como mencionado anteriormente. Ele pode ser representado pelo Sol da nossa galáxia, por uma explosão de uma estrela (Supernova), ou simplesmente por um filamento de lâmpada incandescente ou um carvão em brasa.

A experiência de Stefan demonstra que a energia emitida pelo corpo negro por unidade de tempo e por unidade de área é proporcional à quarta potência da temperatura do corpo (na escala absoluta) ^[v]:

$$E_R = s T^4, \quad (12)$$

onde $s = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ é a constante de Stefan-Boltzmann. Isto quer dizer que a lâmpada incandescente de gás argônio e o filamento de tungstênio podem ser uma boa aproximação de um corpo cinza, visto que o valor do expoente da temperatura é aproximadamente igual a 4.

Referências

- [i] Pinto, Leandro R., *Radiação eletromagnética: da prática à teoria*. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Física, 2008. (Monografia de licenciatura em Física).
- [ii] Brasil, Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional – 9.394/96 (LDB), Brasília, 1996.
- [iii] BRASIL. Secretaria de Educação Fundamental. “Parâmetros curriculares nacionais”. Brasília, MEC/SEF, 1998; BRASIL. Ministério da educação. Secretaria de Educação Média e Tecnológica. “Parâmetros curriculares nacionais – Ensino Médio”. Brasília, SEMTEC/MEC, 2000.
- [iv] Bolton, W., *Mechatronics: Electronic Control Systems in Mechanical and Electrical Engineering*, Longman, Londres, 1999.
- [v] Guimarães, Paulo Sérgio, “Radiação de Corpo Negro”, *Rev. Bra. Ens. Fís.*, **21**, 2 (1999) 291-297.