

# Laboratório de Física Moderna

## EXPERIÊNCIAS HISTÓRICAS SOBRE RADIAÇÃO TÉRMICA

### LEI DE RADIAÇÃO DE PLANCK (Experiência B.4)

#### PRINCÍPIOS E OBJETIVOS

A lei da radiação térmica de Planck, popularmente conhecida como radiação de corpo negro, que descreve a distribuição de energia irradiada por um corpo em função do comprimento de onda e da temperatura é verificada experimentalmente, usando-se como fonte térmica um filamento de lâmpada incandescente. A lei de Wien, que descreve o deslocamento do pico exibido pela distribuição de radiação, é também investigada.

#### TÓPICOS RELACIONADOS

Radiação térmica, radiação de corpo negro, distribuição de Planck, lei do deslocamento de Wien, emissão e absorção de radiação, dispersão em um prisma.

#### EQUIPAMENTO

Lâmpada incandescente como fonte de radiação térmica. Espectrômetro Zeiss para medida da intensidade da radiação em função do comprimento de onda. Prisma de vidro tipo “*flint*” de bário, servindo como monocromador para a radiação térmica. Detector de radiação infravermelha e visível (fotodetector). Filtro infravermelho. Potenciômetro multivoltas, para conversão da posição angular do espectrômetro Zeiss em correspondente comprimento de onda.

#### TAREFAS EXPERIMENTAIS

##### *Distribuição espectral da radiação térmica*

1. Familiarizar-se com o espectrômetro Zeiss, cuja precisão de medidas é da ordem de 2 segundos de arco ( $\sim 0,0005^\circ$ ), aprendendo como medir ângulos de desvios, associados a respectivos comprimento de ondas (manual de operação, desenvolvido pela equipe, disponível no laboratório).
2. Calibrar o potenciômetro multivoltas utilizado nas medidas de ângulos de desvio no espectrômetro Zeiss, associando medidas de ângulos de desvio com respectivos valores de resistência elétrica.
3. Levantar a distribuição espectral da energia irradiada por uma lâmpada incandescente, suposta um corpo negro ideal, a diferentes temperaturas usando o espectrômetro Zeiss operando com prisma.

#### PROCEDIMENTOS EM LABORATÓRIO

##### Calibração do potenciômetro multivoltas:

1. Utiliza-se nesta etapa o espectrômetro Zeiss, já utilizado em prática anterior de Física Experimental IV. O espectrômetro está esquematizado na Fig. 1, sendo um prisma posicionado sobre a plata-

forma girante para dispersar a luz emitida pela lâmpada incandescente a ser analisada.

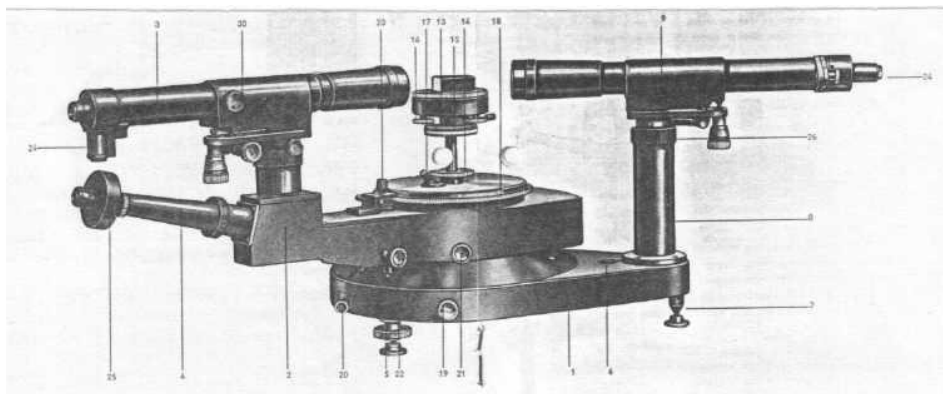


Fig. 1: Espectrômetro Zeiss.

2. Por causa da variação contínua requerida nesse experimento, o ângulo de giro do braço móvel do espectrômetro será medido indiretamente com auxílio de um potenciômetro multivoltas, a ele acoplado através de um sistema mecânico feito de discos, polias e fio. Tente entender o funcionamento do sistema. O potenciômetro fornece uma resistência elétrica variável ( $R_{pot}$ ) que é relacionada ao ângulo de giro do braço móvel, em uma aproximação linear.
3. Para proceder à calibração do potenciômetro (ou seja, determinar a relação entre a resistência elétrica e o ângulo de giro), posicione inicialmente o braço móvel na posição não desviada e efetue o alinhamento do espectrômetro: com um feixe de luz na entrada do espectrômetro, vendo a imagem da fenda sobre a cruzeta de alinhamento/leitura, o espectrômetro deve indicar  $0^{\circ} 0' 0''$ .
4. Meça com um multímetro digital a resistência elétrica correspondente ao ângulo  $0^{\circ}$ .
5. Gire agora o braço móvel e registre as leituras de ângulo e de resistência elétrica a cada  $5^{\circ}$  aproximadamente, cobrindo a faixa até  $90^{\circ}$  e sempre mantendo o mesmo sentido de rotação do braço móvel (inclusive para os ajustes finos de rotação!).
6. Observe em qual lado foi feito o processo de calibração para posteriormente realizar as medidas sempre deste mesmo lado.
7. Retorne o espectrômetro para a posição  $0^{\circ}$  e repita as medidas acima mais duas vezes, procurando reproduzir os mesmos ângulos. Com esses conjuntos de dados será levantada a curva de calibração do potenciômetro multivoltas e será avaliada a incerteza nas leituras indiretas de ângulos de giro.
8. Para que as leituras de resistência elétrica ( $R_{pot}$ ) e ângulo de giro sejam reprodutíveis, é essencial que o movimento do braço móvel ocorra de forma solidária ao movimento das polias acopladas ao potenciômetro. Verifique com atenção se o sistema mecânico está funcionando perfeitamente.
9. Ainda para garantir essa reprodutibilidade, procure registrar sempre as leituras mantendo o mesmo sentido de rotação do sistema e evitando que seja atingido o fim de curso do potenciômetro.
10. Caso ocorra qualquer folga ou atraso entre o movimento do braço móvel e a rotação do eixo do potenciômetro (o que sempre ocorre no fim de curso do potenciômetro), será necessário repetir completamente o procedimento de calibração.

Medida da intensidade da radiação emitida pela lâmpada incandescente:

11. Conecte a lâmpada incandescente à fonte de alimentação montando um circuito que permita as medidas de tensão ( $V_{\text{lâmp}}$ ) e de corrente elétrica ( $I_{\text{lâmp}}$ ) nela. Inicie com uma tensão de 2 a 3 V.
12. Posicione a lâmpada diante da fenda de entrada no colimador do espectrômetro Zeiss, de forma que a luz irradiada possa ser observada na ocular do espectrômetro com o braço móvel na posição não desviada (ângulo de giro  $0^\circ$ ). Tome cuidado com a possibilidade de excesso de luz na ocular, o que pode causar incômodo ao observador, reduzindo se necessário a abertura da fenda.
13. Posicione o prisma sobre a plataforma giratória de modo que a luz da lâmpada seja refratada como indicado na Fig. 2. Observe que o braço móvel deve ser girado na visualização dos raios refratados para o mesmo lado utilizado no processo de calibração do potenciômetro multivoltas.

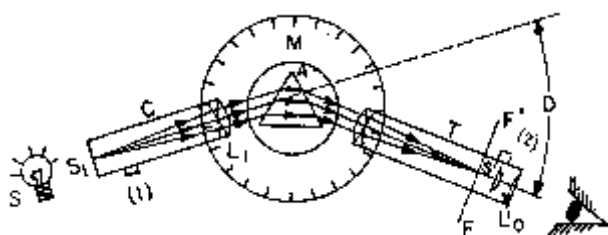


Fig. 2: Arranjo experimental para observação de raios refratados no prisma.

14. Localize os raios refratados com o telescópio de observação. Nessa situação deve ser possível a visualização do espectro contínuo colorido típico de uma fonte de luz branca. Ajuste o foco da lente colimadora para observação nítida dos raios refratados.
15. Gire a plataforma giratória de modo a variar o ângulo de incidência, acompanhando sempre os raios refratados com o telescópio de observação. Há um ponto em que, continuando a girar a plataforma no mesmo sentido, os raios refratados passam a se mover no sentido oposto. Esta é a situação de *desvio mínimo*. Para confirmar a condição de desvio mínimo, observe nas Figs. 2 e 3 que nessa situação os raios refratados são desviados simetricamente em relação ao vértice **A**.

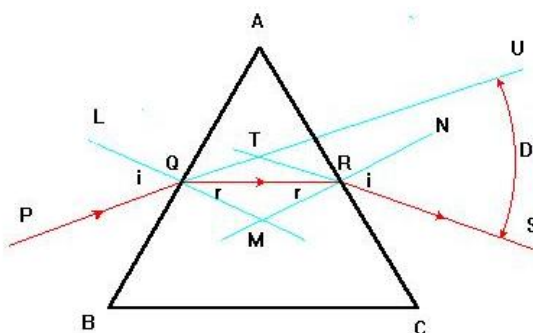


Fig. 3: Trajetória do feixe de luz através do prisma na condição de desvio mínimo ( $\delta_{\text{mín}} = D$ ).

16. Após achar a situação do desvio mínimo para o conjunto de raios refratados, fixe a plataforma giratória com o parafuso apropriado e não toque mais no prisma. Acople a seguir o detector de radiação infravermelha e visível, juntamente com o filtro de radiação infravermelha, diante da ocular do espectrômetro.

17. O detector de radiação é composto de 48 junções miniaturizadas, posicionadas na parte escurecida na frente do detector para absorver eficientemente qualquer radiação térmica. As junções de referência são mantidas à temperatura do invólucro do detector. A faixa espectral de funcionamento do detector é bastante larga, indo desde ultravioleta até o infravermelho distante. Um filtro de radiação infravermelha limita a faixa de operação a comprimentos de onda abaixo de 8.000 nm, o que evita a influência da radiação devida a objetos nas vizinhanças.
18. Com a plataforma giratória fixa, cubra a lente na entrada do telescópio de observação com um protetor apropriado e ajuste o zero do detector pressionando o botão denominado “TARE” e medindo a tensão de saída (denominada  $V_{\text{term}}$ ) com um voltímetro digital.
19. Com a entrada do telescópio de observação livre, observe a leitura da tensão de saída do detector na posição aproximada onde foi localizado o espectro contínuo. Ajuste o controle de ganho do detector e o fundo de escala do voltímetro de modo a otimizar a leitura da tensão proporcional à intensidade da radiação detectada. Pode se tornar conveniente aumentar a abertura da fenda na entrada do colimador para permitir incidência de maior quantidade de radiação sobre o prisma.
20. Faça agora uma varredura cuidadosa, girando o braço móvel do espectrômetro desde  $0^\circ$  até aproximadamente  $90^\circ$  e registrando as medidas de resistência elétrica do potenciômetro ( $R_{\text{pot}}$ ) e de tensão na saída do detector ( $V_{\text{term}}$ ). Registre em torno de 30 a 50 pontos experimentais, especialmente na região onde ocorrem as maiores variações de intensidade de radiação.
21. Mantenha sob observação a tensão ( $V_{\text{lâmp}}$ ) e corrente ( $I_{\text{lâmp}}$ ) na lâmpada, os quais deverão se manter aproximadamente constantes durante o registro completo do espectro. Anote os valores médios desses parâmetros e avalie as suas incertezas a partir de flutuações verificadas durante a varredura.
22. Após concluída a varredura, retorne o braço móvel para a posição inicial (ângulo de giro  $0^\circ$ ), aumente a tensão na lâmpada, confira a localização do ângulo de desvio mínimo, ajuste novamente o zero do detector e registre um novo espectro. Faça isso para tensões  $V_{\text{lâmp}}$  variando até 6 V.

## CUIDADOS QUE DEVEM SER TOMADOS EM LABORATÓRIO

1. O espectrômetro Zeiss é um equipamento delicado e preciso, cujo manuseio requer *atenção e cuidado* para evitar danos ao equipamento e prejuízo na qualidade das medidas efetuadas.
2. Igual cuidado deve ser tomado ao se manipular o prisma e o detector de radiação infravermelha, que são frágeis e não podem *em hipótese alguma* sofrer impactos. Jamais toque nas superfícies do prisma com as mãos; utilize um lenço de papel para evitar o contato com suas superfícies.
3. Tome cuidado ao observar a radiação emitida pela lâmpada incandescente através da ocular do espectrômetro, pois o excesso de radiação pode causar incômodos aos olhos do observador.
4. A lâmpada usada é de 6 V nominal, portanto não ultrapasse nunca o valor limite de 8 V. Com operações entre 6 e 8 V, evite que a lâmpada permaneça acesa por muito tempo (seja rápido).

5. As medidas feitas com os detectores de radiação infravermelha são bastante sensíveis a alterações na temperatura ambiente, de modo que é conveniente mantê-los afastados de correntes de ar (principalmente provenientes de condicionadores de ar). Pelo mesmo motivo, não toque o invólucro do detector, utilizando sempre a haste cilíndrica para manuseá-lo.
6. Lembre-se que qualquer objeto dentro da área de iluminação do detector, e que esteja mais quente ou mais frio que ele, pode influenciar na medida de  $V_{\text{tér}}m$ . Evite assim a presença de qualquer fonte de calor (inclusive partes do seu corpo) nas vizinhanças do detector.
7. Aguarde sempre alguns minutos para permitir que o detector atinja o equilíbrio térmico após ser irradiada, de modo que possam ser obtidos valores estáveis e confiáveis de tensão.
8. Repita periodicamente o ajuste de zero do sinal registrado pelo detector.

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1. A radiância espectral  $R_T(\lambda)$ , definida de forma que  $R_T(\lambda)d\lambda$  represente a energia emitida por unidade de área e por unidade tempo de por um corpo negro no intervalo de comprimento de onda de  $\lambda$  a  $\lambda + d\lambda$ , é descrita em função da temperatura absoluta  $T$  do corpo negro através da famosa lei da radiação térmica de Planck, dada por

$$R_T(\lambda) = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/\lambda k_B T} - 1}, \quad (1)$$

onde  $c$  é a velocidade da luz,  $h$  é a constante de Planck e  $k_B$  é a constante de Boltzmann.

2. Da lei da radiação térmica de Planck, decorre ainda o fato de que o espectro de radiação térmica emitido por um corpo negro desloca-se para frequências mais altas (ou comprimentos de onda mais curtos) à medida que a temperatura  $T$  do corpo é elevada. Esse fenômeno é melhor verificado acompanhando-se o comprimento de onda  $\lambda_{\text{máx}}$  no qual a radiância espectral atinge seu valor máximo a uma dada temperatura, a assim conhecida lei de deslocamento de Wien, expressa por

$$\lambda_{\text{máx}} T \cong 0,2898 \text{ cm} \cdot \text{K}. \quad (2)$$

3. Os comprimentos de onda constituintes do espectro de emissão da lâmpada incandescente usada nesta prática são determinados utilizando o fenômeno da dispersão através de um prisma. O índice de refração  $n$  do material que constitui o prisma está relacionado com o ângulo de desvio mínimo  $\delta_{\text{mín}}$  e com o ângulo de abertura do prisma  $\hat{A}$  pela expressão a seguir:

$$n = \frac{\text{sen}[(\hat{A} + \delta_{\text{mín}})/2]}{\text{sen}(\hat{A}/2)}. \quad (3)$$

O prisma utilizado nesta prática possui uma base na forma de triângulo equilátero, assim  $\hat{A} = 60^\circ$ .

4. Como  $n$  em geral depende do comprimento de onda  $\lambda$  da radiação, então o ângulo de desvio mínimo  $\delta_{\text{mín}}$  passa a ser também função de  $\lambda$ :  $\delta_{\text{mín}} = \delta_{\text{mín}}(\lambda)$ .

5. A dependência de  $n$  em  $\lambda$  é usualmente expressa a partir de relações empíricas. Para vidros transparentes operando na faixa do visível, a mais conhecida dessas relações é a equação de Cauchy

$$n(\lambda) = B_1 + \frac{B_2}{\lambda^2}, \quad (4)$$

onde  $B_1$  e  $B_2$  são constantes determinadas experimentalmente, utilizando calibração com fonte de luz fornecendo componentes monocromáticas de comprimentos de onda conhecidos. Para o prisma utilizado, você pode usar o resultado  $B_1 = 1,689$  e  $B_2 = 1,390 \times 10^4 \text{ nm}^2$  (veja a Ref. 5).

## QUESTÕES E CONCEITOS A SEREM PREVIAMENTE COMPREENSOS

1. Explique o que você entende por corpo negro. Como se pode “produzir” um corpo negro em laboratório? Dê exemplos de corpos negros “reais”.
2. Demonstre como a lei do deslocamento de Wien (Eq. 2) pode ser obtida a partir da lei de radiação térmica de Planck (Eq. 1).
3. Esboce a distribuição espectral de energia irradiada por um corpo negro (gráfico de  $R_T(\lambda)$  em função de  $\lambda$ ) para vários valores de temperatura absoluta, indicando graficamente os deslocamentos da lei de deslocamento de Wien.
4. Utilize a lei de deslocamento de Wien para determinar numericamente o comprimento de onda onde ocorre o máximo de radiância espectral para os seguintes objetos (com suas respectivas temperaturas médias): corpo humano (36 °C), filamento de lâmpada incandescente (3.000 K), superfície do sol (6.000 K). Discuta em que faixas do espectro eletromagnético se encontram esses valores de comprimento de onda.
5. Utilize o esquema ilustrado na Fig. 3 para obter a Eq. 3, que relaciona  $n(\lambda) = n(\delta_{\min}(\lambda))$ .

## PROCEDIMENTOS E CÁLCULOS A SEREM EFETUADOS NO RELATÓRIO

*Calibração do potenciômetro multivoltas:*

1. Organize em uma tabela as medidas de  $R_{\text{pot}}$  em função do ângulo de giro do braço móvel do espectrômetro. Utilize as diferentes medidas para obter valores médios com incertezas.
2. Faça um gráfico dos valores médios de  $R_{\text{pot}}$  (com incerteza) em função do ângulo de giro e obtenha por ajuste polinomial uma relação de calibração que forneça o ângulo de giro em função de  $R_{\text{pot}}$ . Não esqueça de fornecer as incertezas nos coeficientes do ajuste.

*Estudo da distribuição espectral da radiação térmica:*

3. A partir de  $V_{\text{lâmp}}$  e  $I_{\text{lâmp}}$  desse experimento, e utilizando a equação obtida no item 5 da seção “Procedimentos e Cálculos” do Experimento A.4 - Lei de Stefan-Boltzmann, aquela que relaciona temperatura absoluta do filamento  $T$  com o valor de  $R_{\text{lâmp}}$ , determine  $R_{\text{lâmp}}$  e obtenha os valores da temperatura do filamento ( $T$ ) da lâmpada utilizada nas medidas efetuadas com o espectrômetro.

4. Determine, para cada valor de  $R_{\text{pot}}$ , o valor correspondente do ângulo de desvio mínimo ( $\delta_{\text{mín}}$ ) e de sua incerteza, utilizando a relação de calibração encontrada no item 2.
5. Use as Eqs. 3 e 4 para obter, indiretamente, os valores de  $n$  e de  $\lambda$  para cada valor medido de  $R_{\text{pot}}$ . Utilize, para tal, algum software apropriado, como Excel ou Origin, ou algum software livre.
6. Organize em tabelas os valores medidos de  $R_{\text{pot}}$ ,  $\delta_{\text{mín}}$ ,  $n$ ,  $\lambda$  e  $V_{\text{térm}}$  medidos para cada temperatura  $T$  do filamento.
7. Monte gráficos de  $V_{\text{térm}}$  em função de  $\lambda$  para cada valor de  $T$ . Discuta as principais características desses gráficos, comparando-os com as previsões da lei da radiação térmica de Planck e da lei de deslocamento de Wien.
8. Determine os comprimentos de onda em que ocorrem os valores máximos de  $V_{\text{térm}}$  para cada valor de  $T$  e calcule os valores dos produtos  $\lambda_{\text{máx}} T$ , comparando-os com a previsão da lei de deslocamento de Wien.

## DISCUSSÕES ADICIONAIS

1. Discuta as principais fontes de erro envolvidas nesta prática, tais como: uso da Eq. 3 para caracterizar a dispersão do prisma, determinação da temperatura do filamento pelo método sugerido, etc. Em que essas aproximações influenciaram nos resultados obtidos?
2. Discuta o que seria alterado nesta experiência se o prisma fosse substituído por uma rede de difração (como feito em uma prática anterior), enumerando as vantagens e desvantagens dos métodos de espectroscopia com prisma e com rede de difração no que diz respeito às medidas realizadas.
3. Discuta a importância histórica da descoberta da lei da radiação térmica de Planck na evolução das idéias da Física moderna. Qual o problema que se procurava solucionar na época da descoberta de tal lei? Compare graficamente a distribuição de Planck com a previsão clássica (de Rayleigh-Jeans) e discuta o efeito conhecido como “catástrofe do ultravioleta”.
4. Discuta se a lei do deslocamento de Wien é apropriada para a determinação do comprimento de onda em que ocorre o máximo de radiação emitida (a) pelo sol, (b) por um vaga-lume (emitindo luz amarela), (c) por um laser vermelho, (d) por um LED verde, (e) por uma lâmpada incandescente, e (f) por uma lâmpada fluorescente. Nos casos em que a lei de Wien for aplicável, utilize valores razoáveis de comprimentos de onda para estimar as temperaturas correspondentes.
5. É comum se afirmar que lâmpadas incandescentes apresentam baixa eficiência porque grande parte do fluxo luminoso emitido não corresponde a luz visível (tipicamente 10% da emissão encontra-se na faixa visível). Explique esse efeito graficamente, esboçando a curva típica de distribuição espectral de uma lâmpada incandescente operando a 3.000 K (com máximo da radiância espectral determinado pela lei do deslocamento de Wien) e indicando no gráfico a porção de fluxo correspondente à faixa visível do espectro eletromagnético.

## BIBLIOGRAFIA

1. D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, Fundamentos de Física, Vols. 3 e 4, LTC, 4<sup>a</sup> ed., Rio de Janeiro, 1993.
2. M. W. Zemansky, Calor e Termodinâmica, Ed. Guanabara Dois S. A., Rio de Janeiro, 1978.
3. R. Eisberg, R. Resnick, Física Quântica, Ed. Campus, Rio de Janeiro, 1979.
4. Laboratory Experiments in Physics, 3.5.01, Phywe Systeme GmbH, Göttingen, 1999.
5. Black body light source for the OS-8539 educational spectrophotometer, Manual de instruções – PASCO Scientific, 1999.
6. F. Reif, Fundamentals of Statistical and Thermal Physics, McGraw Hill, Singapore, 1985.
7. Sérgio M. Rezende, A Física dos Materiais e Dispositivos Eletrônicos. Ed. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 1996.
8. F. A. Jenkins, H. White, Fundamentals of Optics, McGraw Hill, Singapore, 1976.
9. J. Goldemberg, Física Geral e Experimental, 3<sup>o</sup> Vol, Ed. da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1973.
10. D. MacIsaac, G. Kanner, G. Anderson, “Basic physics of the incandescent lamp (lightbulb)”, *The Physics Teacher*, Vol. 37, pp. 520-525, 1999.

Redação: Prof. Jair C. C. Freitas e Rogério N. Suave.



## FOLHA DE DADOS

*Distribuição espectral da radiação térmica (Lei de Radiação de Planck)*

Calibração do potenciômetro multivoltas:

Ângulo de giro (°)	$R_{pot}$ ( _____ )		
	1ª medida	2ª medida	3ª medida

Medida da intensidade da radiação emitida pela lâmpada incandescente:

$V_{\text{lâmp}} = \text{_____} \pm \text{_____} (\text{____})$

$I_{\text{lâmp}} = \text{_____} \pm \text{_____} (\text{____})$

$R_{\text{pot}}$ (____)	$V_{\text{térn}}$ (____)

$R_{\text{pot}}$ (____)	$V_{\text{térn}}$ (____)

$R_{\text{pot}}$ (____)	$V_{\text{térn}}$ (____)

$R_{\text{pot}}$ (____)	$V_{\text{térn}}$ (____)

$V_{\text{lâmp}} = \text{_____} \pm \text{_____} (\text{____})$

$I_{\text{lâmp}} = \text{_____} \pm \text{_____} (\text{____})$

$R_{\text{pot}}$ (____)	$V_{\text{térn}}$ (____)

$R_{\text{pot}}$ (____)	$V_{\text{térn}}$ (____)

$R_{\text{pot}}$ (____)	$V_{\text{térn}}$ (____)

$R_{\text{pot}}$ (____)	$V_{\text{térn}}$ (____)

Medida da intensidade da radiação emitida pela lâmpada incandescente:

$$V_{\text{lâmp}} = \text{_____} \pm \text{_____} (\text{___})$$

$$I_{\text{lâmp}} = \text{_____} \pm \text{_____} (\text{___})$$

$R_{\text{pot}}$ (___)	$V_{\text{térn}}$ (___)

$R_{\text{pot}}$ (___)	$V_{\text{térn}}$ (___)

$R_{\text{pot}}$ (___)	$V_{\text{térn}}$ (___)

$R_{\text{pot}}$ (___)	$V_{\text{térn}}$ (___)

$$V_{\text{lâmp}} = \text{_____} \pm \text{_____} (\text{___})$$

$$I_{\text{lâmp}} = \text{_____} \pm \text{_____} (\text{___})$$

$R_{\text{pot}}$ (___)	$V_{\text{térn}}$ (___)

$R_{\text{pot}}$ (___)	$V_{\text{térn}}$ (___)

$R_{\text{pot}}$ (___)	$V_{\text{térn}}$ (___)

$R_{\text{pot}}$ (___)	$V_{\text{térn}}$ (___)