

## A Radiação do Corpo Negro

Tiago Frederico, N°63422; Maria Vilelas, N°63438; Lúcia Carreira, N°63439

*Nesta actividade experimental pretende-se estudar a radiação de um corpo negro. Na primeira parte verificar-se-á experimentalmente a lei de radiação de Planck e a Lei do Deslocamento de Wien através do espectro de emissão de um modelo de corpo negro para diferentes temperaturas. Na segunda parte verificar-se-á a lei de radiação de Steffan através da variação da intensidade da radiação emitida pelo corpo negro em função da sua temperatura absoluta. Na terceira, e última parte, comparar-se-ão as emissividades de diferentes materiais para a mesma temperatura.*

### Introdução

#### I. RADIAÇÃO DO CORPO NEGRO

Num sistema há sempre trocas de energia sob a forma de calor, trabalho ou radiação, sendo da última que trata este trabalho experimental. Segundo a Lei de Planck para a Radiação Térmica, um corpo está sujeito à absorção e à emissão, se a sua temperatura for superior ao zero absoluto, de energia sob a forma de radiação. A energia da radiação (emitida ou absorvida) depende apenas da temperatura do corpo. Um corpo de temperatura superior à da vizinhança emite mais energia que aquela que absorve e vice-versa. No caso de se estabelecer o equilíbrio térmico, as trocas de energia não são interrompidas. As quantidades de radiação emitida e absorvida pelo corpo são iguais, logo a sua temperatura mantém-se constante.

É designado por corpo negro um corpo que emita e absorva tudo o que sobre ele incida. A sua visualização mais simples é a de um conjunto de osciladores electromagnéticos nas paredes de uma cavidade com uma pequena abertura por onde entra a radiação que é reflectida sucessivamente até ser completamente absorvida e reenviada para o exterior. O modelo do Corpo Negro tenta explicar o comportamento de um corpo enquanto emissor e absorvedor de radiação através de uma aproximação ao comportamento do corpo negro. A expressão (1) exprime o poder de absorção de um corpo e a expressão (2) a sua emissividade, ou seja, a facilidade de absorver ou emitir radiação, em relação ao corpo negro.

$$Q_C = \frac{E_{\text{absorvida}}}{E_{\text{incidente}}} \quad (1)$$

$$e = \frac{I_{\text{Corpo}}}{I_{\text{CorpoNegro}}}, \quad (2)$$

em que  $Q_C$  é o poder de absorção do corpo,  $E$  a energia,  $I$  é o poder emissivo e  $e$  a emissividade.

Pela Lei Kirchhoff da radiação observa-se que:

$$Q_C = e,$$

ou seja, a capacidade de um corpo para emitir e para absorver radiação são iguais. A emissividade varia para superfícies com diferentes características (ex: material), comportamento que pode ser observado num Cubo de Leslie.

A potência total radiada por unidade de área da superfície do corpo é expressa pela Lei de Stefan (3).

$$I_C = e\sigma T^4, \quad (3)$$

em que  $\sigma$  é a constante de Stefan e  $T$  a temperatura.

Por outro lado, a temperatura também pode ser relacionada com o comprimento de onda da radiação máxima emitida pelo corpo através da Lei Clássica de Rayleigh-Jeans (4). No entanto, a experiência mostra que, para  $\lambda$  pequenos, a temperatura atinge um ponto máximo e, em seguida, decresce com  $\lambda_{\text{máx}}$  em oposição ao modelo teórico, para o qual a temperatura tende para infinito. Esta ocorrência denomina-se Catástrofe do Ultravioleta. Para resolver este problema recorre-se ao Modelo de Planck para a radiação do corpo negro (fórmula (5) que se aproxima satisfatoriamente da realidade na zona de  $\lambda \rightarrow 0$ ). A aplicação deste modelo implicou a imposição das seguintes condições: a energia dos osciladores é proporcional à frequência da radiação incidente e as energias possíveis para cada nível de excitação estão definidas por *quanta* ( $E = h\nu$ ).

$$\mu_\nu = 8\pi k \frac{T}{c^3} \nu^2 d\nu, \quad (4)$$

em que  $\mu_\nu$  é a densidade de energia por unidade de comprimento de onda,  $k$  é a constante de Boltzmann e  $\lambda$  o comprimento de onda.

$$\mu_\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{\varepsilon_0}{e^{\frac{\varepsilon_0}{kT}} - 1}, \quad (5)$$

em que  $\nu$  é a frequência da radiação,  $c$  a velocidade da luz no vácuo e  $\varepsilon_0$  é a energia de um oscilador.

Observa-se que para  $\lambda_{\text{máx}} \rightarrow \infty$  a fórmula de Rayleigh-Jeans é recuperada. A relação entre a temperatura e o comprimento de onda de máxima intensidade é dada pela Lei do Deslocamento de Wien (equação (6)).

$$\lambda_{\text{max}} = B \frac{1}{T}, \quad (6)$$

em que  $B$  é a constante de Wien.

#### II. ÍNDICE DE REFRAÇÃO

Um raio de luz, ao incidir na superfície de separação entre dois meios diferentes, sofre um desvio angular caracterizado pelo índice de refração do segundo meio (Lei de Snell-Descartes 7). Se o feixe de luz incidente for composto por uma gama de radiação e o índice de refração do segundo

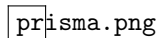
meio variar em função do comprimento de onda da radiação incidente, é possível decompor as diferentes radiações do feixe e atribuir a cada comprimento de onda um ângulo de desvio do raio. Admitindo que se faz incidir um feixe de luz sobre um prisma de índice de refração variável e analisando a trajetória de um raio (Esquema 1) calcula-se o índice de refração pela fórmula (8).

$$n = \frac{\sin \theta_{inc}}{\sin \theta_{refr}}, \quad (7)$$

em que  $n$  é o índice de refração,  $\theta_{inc}$  é o ângulo do raio incidente e  $\theta_{refr}$  é o ângulo do raio refractado.

$$n(\delta, \theta_1) = \sqrt{\sin^2 \theta_1 + \frac{(\sin(\delta - \theta_1 + \alpha) + \cos \alpha \sin \theta_1)^2}{\sin^2 \alpha}}, \quad (8)$$

cujas legendas são dadas no Esquema 1.

prisma.png

Esquema 1 - Ângulos de referência.

Legenda:

- 1:  $\theta$  - ângulo incidente no prisma;
- 2:  $\alpha$  - ângulo interno do prisma ( $60^\circ$ );
- 3:  $\delta$  - ângulo refractado.

## II. RESISTIVIDADE

A temperatura do filamento de uma lâmpada de incandescência pode ser determinada a partir do cálculo da resistência (9) e da resistividade do filamento (10), que varia com a temperatura, pelas fórmulas:

$$R = V/I \quad (9)$$

e

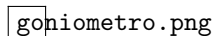
$$R(T) = \rho(T) \frac{l}{s},$$

a partir da qual é possível estabelecer a seguinte relação:

$$\frac{R(T)}{\rho(T)} = \frac{R(300)}{\rho(300K)}. \quad (10)$$

## Experiência Realizada

A montagem utilizada neste trabalho experimental é a evidenciada no Esquema 2.

goniometro.png

Esquema 2 - Montagem.

Legenda:

- 1: Lâmpada com filamento de tungstênio ligada a uma fonte de alimentação de tensão variável e um colimador;
- 2: Prisma de dispersão com índice de refração variável;
- 3: Termopilha com resposta uniforme para radiação entre 500nm e 2500nm.

Serão necessários, para além dos equipamentos evidenciados no Esquema 2 um goniómetro, tabelas de relação entre ângulos e comprimentos de onda e entre resistividades e temperaturas e um cubo de Leslie com sensores de

temperatura.

Na primeira parte da experiência alinha-se o prisma no goniómetro de modo a que o feixe incidente, proveniente da fonte de alimentação a 10V, coincida com a direcção da normal à face do prisma e mede-se o ângulo correspondente. Nota-se que se coloca uma resistência em série no circuito de modo a evitar sobrecargas, que permitirá que se determine a temperatura de funcionamento da lâmpada.

Para tensões de 12, 9 e 6 V, partindo da região verde do espectro visível da lâmpada de tungstênio e fazendo pequenos deslocamentos angulares, mede-se o ângulo de incidência para o qual a intensidade lida no microvóltmetro é máxima. Para diminuir o erro devido ao ruído térmico da vizinhança anula-se a leitura do microvóltmetro. Partindo da zona do verde, para cada tensão, realizam-se 3 leituras de intensidade para 20 ângulos com intervalos angulares de 20' e 40'. Desprezam-se e repetem-se as medidas cuja leitura no detector, ao anular-se o valor no microvóltmetro, for menor que 0V ou cuja medida entre leituras do mesmo ensaio seja superior a 0.3V. Faz-se corresponder os ângulos medidos a comprimentos de onda com as tabelas de conversão. Para diminuir o erro dessa correspondência faz-se uma aproximação linear com os valores superior e inferior mais próximos. Traça-se o espectro de emissão com base nos comprimentos de onda correspondentes a cada ângulo medido, para diferentes temperaturas. Determinam-se as temperaturas do filamento da lâmpada através da fórmula (10) e de tabelas de correspondência entre resistividade e temperatura. Por fim traçam-se gráficos  $I(\lambda)$  para cada temperatura do filamento da lâmpada e compara-se com a curva teórica dada pela expressão (11) que é equivalente à expressão (5), ambas normalizadas para o ponto de intensidade máxima. Traça-se um gráfico  $\lambda_{max}(\frac{1}{T})$  e calcula-se a constante B.

$$I_\lambda \Delta\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{\Delta\lambda}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1} \quad (11)$$

Na segunda parte da experiência, fixando o detector, fazem-se várias leituras de intensidade para tensões aplicadas à lâmpada de 5 a 12V com incrementos de 1V. Determinam-se as temperaturas do filamento correspondentes a cada tensão e, com os pares de valores obtidos, traça-se um gráfico logarítmico da intensidade em função do logaritmo da temperatura.

Na última parte da experiência seleccionam-se tensões máxima e 3/4 do máximo da tensão fornecida pela fonte de alimentação do cubo de Leslie e, no equilíbrio, fazem-se leituras de temperatura e da intensidade da radiação para todas as faces.

## Resultados Experimentais

I.

V(V)	I(A)	$e_V(V)$	$e_I(A)$
12,03	1,68	0,01	0,01
9,03	1,44	0,01	0,01
6,02	1,17	0,01	0,01

Tabela I.1 - Leituras das tensões e intensidades de cada experiência.

$\alpha(^{\circ})$	$\alpha(rad)$	$i^{\circ}$	$\theta(^{\circ})$	$\theta(rad)$	$e_{\delta(rad)}$
60	1,05	27,08	43,11	0,75	$1,67 \cdot 10^{-1}$

Tabela I.2 - Ângulos interno do prisma, de incidência normal e de incidência.

	$\delta(^{\circ})$	$I_{Leitura1}(V)$	$I_{Leitura2}(V)$	$I_{Leitura3}(V)$
1	309°40'0"	$0,13 \cdot 10^{-5}$	$0,09 \cdot 10^{-5}$	$0,08 \cdot 10^{-5}$
2	310°0'0"	$0,21 \cdot 10^{-5}$	$0,20 \cdot 10^{-5}$	$0,20 \cdot 10^{-5}$
3	310°40'0"	$1,60 \cdot 10^{-5}$	$1,64 \cdot 10^{-5}$	$1,66 \cdot 10^{-5}$
4	311°0'0"	$2,60 \cdot 10^{-5}$	$2,64 \cdot 10^{-5}$	$2,62 \cdot 10^{-5}$
5	311°40'0"	$5,52 \cdot 10^{-5}$	$5,54 \cdot 10^{-5}$	$5,53 \cdot 10^{-5}$
6	312°0'0"	$7,98 \cdot 10^{-5}$	$7,97 \cdot 10^{-5}$	$7,95 \cdot 10^{-5}$
7	312°40'0"	$15,57 \cdot 10^{-5}$	$15,52 \cdot 10^{-5}$	$15,50 \cdot 10^{-5}$
8	313°0'0"	$18,85 \cdot 10^{-5}$	$18,84 \cdot 10^{-5}$	$18,82 \cdot 10^{-5}$
9	313°40'0"	$19,22 \cdot 10^{-5}$	$19,21 \cdot 10^{-5}$	$19,21 \cdot 10^{-5}$
10	314°0'0"	$15,91 \cdot 10^{-5}$	$15,90 \cdot 10^{-5}$	$15,91 \cdot 10^{-5}$
11	314°40'0"	$8,64 \cdot 10^{-5}$	$8,59 \cdot 10^{-5}$	$8,55 \cdot 10^{-5}$
12	315°0'0"	$5,17 \cdot 10^{-5}$	$5,13 \cdot 10^{-5}$	$5,09 \cdot 10^{-5}$
13	315°40'0"	$1,51 \cdot 10^{-5}$	$1,45 \cdot 10^{-5}$	$1,45 \cdot 10^{-5}$
14	316°0'0"	$1,02 \cdot 10^{-5}$	$1,03 \cdot 10^{-5}$	$1,06 \cdot 10^{-5}$
15	316°40'0"	$0,16 \cdot 10^{-5}$	$0,16 \cdot 10^{-5}$	$0,17 \cdot 10^{-5}$
16	317°0'0"	$0,07 \cdot 10^{-5}$	$0,06 \cdot 10^{-5}$	$0,07 \cdot 10^{-5}$
17	317°40'0"	$0,07 \cdot 10^{-5}$	$0,06 \cdot 10^{-5}$	$0,03 \cdot 10^{-5}$

Tabela I.3 - Leitura das intensidades para 12,03V aplicados na lâmpada.

	$\delta(^{\circ})$	$I_{Leitura1}$	$I_{Leitura2}$	$I_{Leitura3}$
1	309°20'0"	$0,14 \cdot 10^{-5}$	$0,14 \cdot 10^{-5}$	$0,11 \cdot 10^{-5}$
2	310°0'0"	$0,12 \cdot 10^{-5}$	$0,13 \cdot 10^{-5}$	$0,17 \cdot 10^{-5}$
3	310°20'0"	$0,30 \cdot 10^{-5}$	$0,32 \cdot 10^{-5}$	$0,34 \cdot 10^{-5}$
4	311°0'0"	$1,04 \cdot 10^{-5}$	$1,06 \cdot 10^{-5}$	$1,03 \cdot 10^{-5}$
5	311°20'0"	$1,74 \cdot 10^{-5}$	$1,73 \cdot 10^{-5}$	$1,72 \cdot 10^{-5}$
6	312°0'0"	$4,05 \cdot 10^{-5}$	$4,02 \cdot 10^{-5}$	$4,02 \cdot 10^{-5}$
7	312°20'0"	$5,85 \cdot 10^{-5}$	$5,83 \cdot 10^{-5}$	$5,81 \cdot 10^{-5}$
8	313°0'0"	$10,80 \cdot 10^{-5}$	$10,80 \cdot 10^{-5}$	$10,76 \cdot 10^{-5}$
9	313°20'0"	$12,13 \cdot 10^{-5}$	$12,11 \cdot 10^{-5}$	$12,03 \cdot 10^{-5}$
10	314°0'0"	$10,68 \cdot 10^{-5}$	$10,66 \cdot 10^{-5}$	$10,69 \cdot 10^{-5}$
11	314°20'0"	$8,50 \cdot 10^{-5}$	$8,50 \cdot 10^{-5}$	$8,53 \cdot 10^{-5}$
12	315°0'0"	$3,84 \cdot 10^{-5}$	$3,83 \cdot 10^{-5}$	$3,84 \cdot 10^{-5}$
13	315°20'0"	$2,31 \cdot 10^{-5}$	$2,30 \cdot 10^{-5}$	$2,29 \cdot 10^{-5}$
14	316°0'0"	$0,73 \cdot 10^{-5}$	$0,71 \cdot 10^{-5}$	$0,70 \cdot 10^{-5}$
15	316°20'0"	$0,45 \cdot 10^{-5}$	$0,44 \cdot 10^{-5}$	$0,43 \cdot 10^{-5}$
16	317°0'0"	$0,09 \cdot 10^{-5}$	$0,09 \cdot 10^{-5}$	$0,08 \cdot 10^{-5}$
17	317°20'0"	$0,05 \cdot 10^{-5}$	$0,08 \cdot 10^{-5}$	$0,11 \cdot 10^{-5}$
18	318°0'0"	$0,08 \cdot 10^{-5}$	$0,10 \cdot 10^{-5}$	$0,13 \cdot 10^{-5}$

Tabela I.4 - Leitura das intensidades para 9,03V aplicados na lâmpada.

	$I_{Leitura1}$	$I_{Leitura2}$	$I_{Leitura3}$	$Erro_I$
1	309°40'0"	$0,08 \cdot 10^{-5}$	$0,09 \cdot 10^{-5}$	$0,08 \cdot 10^{-5}$
2	310°0'0"	$0,13 \cdot 10^{-5}$	$0,10 \cdot 10^{-5}$	$0,09 \cdot 10^{-5}$
3	310°40'0"	$0,16 \cdot 10^{-5}$	$0,14 \cdot 10^{-5}$	$0,14 \cdot 10^{-5}$
4	311°0'0"	$0,28 \cdot 10^{-5}$	$0,26 \cdot 10^{-5}$	$0,21 \cdot 10^{-5}$
5	311°40'0"	$0,68 \cdot 10^{-5}$	$0,70 \cdot 10^{-5}$	$0,68 \cdot 10^{-5}$
6	312°0'0"	$1,19 \cdot 10^{-5}$	$1,18 \cdot 10^{-5}$	$1,19 \cdot 10^{-5}$
7	312°40'0"	$2,97 \cdot 10^{-5}$	$2,95 \cdot 10^{-5}$	$2,93 \cdot 10^{-5}$
8	313°0'0"	$4,44 \cdot 10^{-5}$	$4,45 \cdot 10^{-5}$	$4,45 \cdot 10^{-5}$
9	313°40'0"	$5,90 \cdot 10^{-5}$	$5,89 \cdot 10^{-5}$	$5,89 \cdot 10^{-5}$
10	314°0'0"	$5,51 \cdot 10^{-5}$	$5,53 \cdot 10^{-5}$	$5,53 \cdot 10^{-5}$
11	314°40'0"	$3,27 \cdot 10^{-5}$	$3,30 \cdot 10^{-5}$	$3,31 \cdot 10^{-5}$
12	315°0'0"	$2,17 \cdot 10^{-5}$	$2,19 \cdot 10^{-5}$	$2,18 \cdot 10^{-5}$
13	315°40'0"	$0,90 \cdot 10^{-5}$	$0,89 \cdot 10^{-5}$	$0,93 \cdot 10^{-5}$
14	316°0'0"	$0,43 \cdot 10^{-5}$	$0,44 \cdot 10^{-5}$	$0,40 \cdot 10^{-5}$
15	316°40'0"	$0,13 \cdot 10^{-5}$	$0,13 \cdot 10^{-5}$	$0,11 \cdot 10^{-5}$
16	317°0'0"	$0,08 \cdot 10^{-5}$	$0,09 \cdot 10^{-5}$	$0,08 \cdot 10^{-5}$
17	317°40'0"	$0,09 \cdot 10^{-5}$	$0,07 \cdot 10^{-5}$	$0,09 \cdot 10^{-5}$

Tabela I.5 - Leitura das intensidades para 6,02V aplicados na lâmpada.

$Erro_{\delta(^{\circ})}$	$Erro_I(V)$
10'	0,03

Tabela I.6 - Erros de leitura.

II.

	Tensão(V)	$I_{entrada}(A)$	$I_{saída}(V)$
1	5	1.07	$1.33 \cdot 10^{-2}$
2	6	1.17	$1.82 \cdot 10^{-2}$
3	6.99	1.26	$2.30 \cdot 10^{-2}$
4	8.01	1.36	$2.81 \cdot 10^{-2}$
5	8.99	1.44	$3.52 \cdot 10^{-2}$
6	9.99	1.52	$4.18 \cdot 10^{-2}$
7	11	1.6	$4.88 \cdot 10^{-2}$
8	12.01	1.67	$5.64 \cdot 10^{-2}$

Tabela II.1 - Variação da intensidade com a tensão aplicada na lâmpada.

III.

Tensão(V)	T(°C)	$I_{Ciz}(10^{-3}V)$	$I_{Esp}(10^{-3}V)$	$I_{Pre}(10^{-3}V)$	$I_{Bra}(10^{-3}V)$
3/4	86	12,91	1,37	13,1	3,84
máx	100	16,42	1,55	17,32	4,4

Tabela III.1 - Intensidades da radiação emitida pelas faces do Cubo de Leslie.

## Análise de Resultados

O ângulo de incidência medido,  $\theta$  era de 0,75 rad. Observa-se que utilizando este valor no cálculo das grandezas a estudar, não é possível fazer a conversão de índices de refração em comprimentos de onda. Logo, através da Lei de Wien, calcularam-se novos ângulos de incidência que foram utilizados em todos os cálculos que se apresentam em seguida.

$$R(292,35K)=0,4911(\Omega)$$

$R(T)(\Omega)$	$e_{R(T)}(\Omega)$	$\frac{R(T)}{R(292,35K)}$	T(K)	$e_T(K)$
7,16	$4,9 \cdot 10^{-2}$	14,581	2416	5,83
6,26	$5,1 \cdot 10^{-2}$	12,755	2189	6,52
5,15	$5,3 \cdot 10^{-2}$	10,477	1886	7,31

Tabela I.7 - Cálculo da temperatura de funcionamento da lâmpada de tungstênio.

V(V)	T(K)	$\lambda_{m\acute{a}x}(m)$	n	$\theta_{proposto}(rad)$
12	2416	$1.19950 \cdot 10^{-6}$	1.59644	0.8464
9	2189	$1.32389 \cdot 10^{-6}$	1.59481	0.8106
6	1886	$1.53659 \cdot 10^{-6}$	1.59251	0.81523

Tabela I.8 - Cálculo de novos ângulos.

$e_{\lambda_{m\acute{a}x}}(m)$	$e_n$
$5.96 \cdot 10^{-16}$	$7.54 \cdot 10^{-12}$
$8.01 \cdot 10^{-16}$	$1.23 \cdot 10^{-11}$
$1.25 \cdot 10^{-15}$	$1.52 \cdot 10^{-11}$

Tabela I.9 - Erro das grandezas calculadas na Tabela I.8.

$$e_{\theta_{proposto}} = 5 \cdot 10^{-5} \text{rad}$$

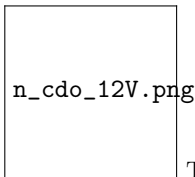


Tabela I.10 - Índices de refração de cada ensaio e comprimentos de onda correspondentes para 12,03V.

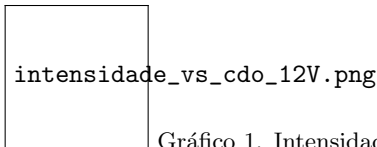


Gráfico 1. Intensidade em função do comprimento de onda com tensão de 12,03V.

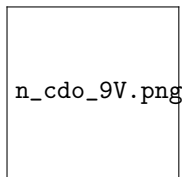


Tabela I.11 - Índices de refração de cada ensaio e comprimentos de onda correspondentes para 9,03V.

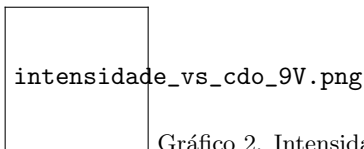


Gráfico 2. Intensidade em função do comprimento de onda com tensão de 9,02V.

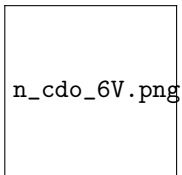


Tabela I.12 - Índices de refração de cada ensaio e comprimentos de onda correspondentes para 6,02V.

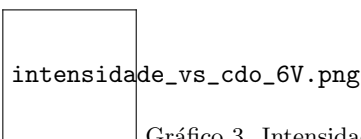


Gráfico 3. Intensidade em função do comprimento de onda com tensão de 6,02V.

Ajuste da expressão teórica (11) para cada tensão com parâmetros de ajuste  $a$  e  $T$  com o programa *Gnuplot*.

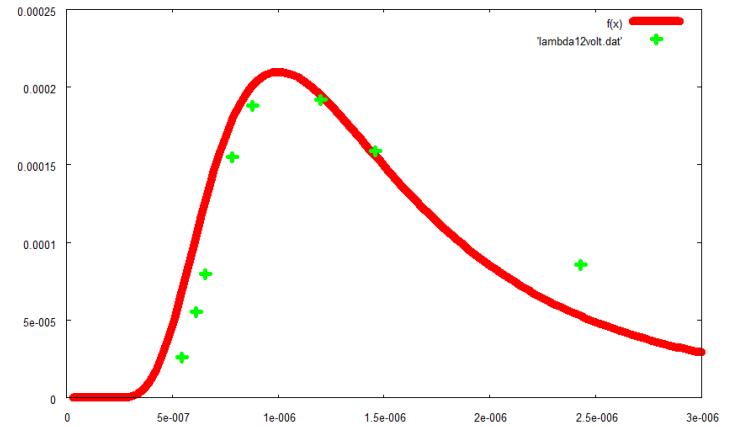


Gráfico 4. Ajuste da curva teórica para uma tensão de 12,03V.

$$a = 8.00284 \cdot 10^{-17} \pm 1.435 \cdot 10^{-18}$$

$$T = 2900$$

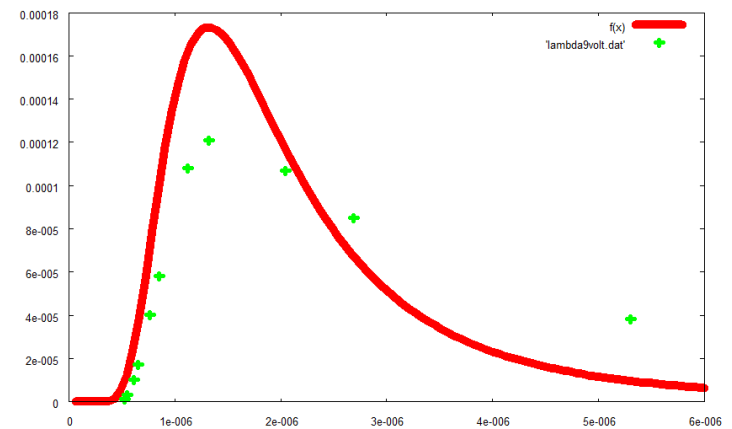


Gráfico 5. Ajuste da curva teórica para uma tensão de 9,03V.

$$a = 2.63114 \cdot 10^{-16} \pm 4.013 \cdot 10^{-17}$$

$$T = 2200$$

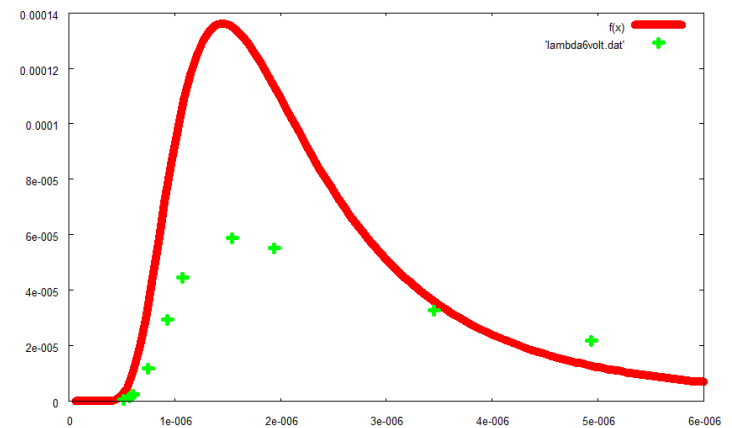


Gráfico 6. Ajuste da curva teórica para uma tensão de 6,02V.

$$a = 3.32819 \cdot 10^{-16} \pm 8.253 \cdot 10^{-17}$$

$$T = 2000$$

Erro utilizado para o cálculo do índice de refração:

$$\varepsilon_n = \frac{\frac{\cos[\alpha+\delta-\theta]\cos[\alpha]^2(\sin[\alpha+\delta-\theta]+\cos[\alpha]\sin[\theta])}{\sqrt{\sin[\theta]^2+\cos[\alpha]^2(\sin[\alpha+\delta-\theta]+\cos[\alpha]\sin[\theta])^2}}e_\delta + \frac{(2\cos[t]\sin[t]+2(-\cos[\alpha+\delta-\theta]+\cos[\alpha]\cos[\theta])\cos[\alpha]^2(\sin[\alpha+\delta-\theta]+\cos[\alpha]\sin[\theta]))}{2\sqrt{\sin[\theta]^2+\cos[\alpha]^2(\sin[\alpha+\delta-\theta]+\cos[\alpha]\sin[\theta])^2}}e_\theta}{e_\theta}$$

No que diz respeito à verificação da Lei de Radiação de Stefan, foram encontrados as seguintes temperaturas para os diferentes valores de tensão da tabela II.1:

	R(T) (Ω)	R(T)/R(292.35)	T(K)
1	4.67	9.52	1751.6
2	5.13	10.44	188,7
3	5.55	11.30	1998.0
4	5.89	12.00	2090.4
5	6.24	12.71	2183.6
6	6.57	13.38	2268.6
7	6.88	14.00	2345.2
8	7.20	14.64	2423.9

Tabela II.2. Valores de temperatura para as diferentes tensões.

Pode-se observar na tabela II.2 que à medida que a resistência do filamento de tungsténio aumenta a sua temperatura absoluta também aumenta. Uma vez que a resistência foi calculada através da Lei de Ohm,  $v = Ri$ , pode-se concluir que a temperatura do filamento é directamente proporcional à tensão aplicada.

Linearizando a expressão (3) onde T corresponde aos valores da temperatura absoluta da tabela II.2 e I são os valores de  $I_{saída}$  da tabela II.1 pode-se construir um gráfico de  $\ln(I)$  em função de  $\ln(T)$ .

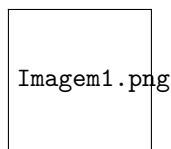


Gráfico 4. Verificação da Lei de Stefan.

Verifica-se facilmente através da linearização de (3) que o declive da recta do gráfico 4 deverá ser 4. Experimentalmente obteve-se

$$m = 4.47 \pm 0.05$$

Verifica-se que este valor se afasta ligeiramente do valor teórico. Tal se pode justificar tendo em conta que  $I \propto T^4$ . Uma vez que as temperaturas foram calculadas através de uma interpolação, é normal que venham com erro. Tendo  $T^4$  chega-se à conclusão que o declive da recta vai ser mais influenciado pelo erro das temperaturas mais elevadas do que pelas mais baixas.

Tirar graficos 1, 2 e 3 se nao houver espaço

### Discussão e Crítica

Na primeira parte da experiência ocorreu um erro de leitura nos ângulos que permitem calcular  $\theta$ , o ângulo de incidência no prisma. Esse erro afectou de tal forma o cálculo

dos índices de refração que estes se encontravam fora do intervalo da tabela de conversão para comprimentos de onda. De modo a que se pudesse prosseguir com a análise dos dados calcularam-se novos ângulos de incidência para os quais a intensidade da radiação fosse máxima em cada ensaio. Esses ângulos foram determinados através da expressão (6) e da conversão, através das tabelas, do comprimento de onda correspondente ao máximo de intensidade calculado. Os resultados da temperatura de funcionamento do filamento da lâmpada foram de 2416K para 12V, 2189K para 9V e 1886K para 6V. Com estes resultados determinaram-se os índices de refração e os ângulos de incidência que são apresentados na Tabela I.8.

Com os novos ângulos traçaram-se os espectros para cada temperatura. Observa-se que foram bastante satisfatórios qualitativamente, ou seja, observa-se perfeitamente um aumento abrupto de intensidade, uma pequena gama de máximos e, por fim, uma diminuição suave da intensidade à medida que o comprimento de onda aumenta. No entanto, quando comparados às curvas teóricas respectivas verifica-se que, em geral, a intensidade das medições experimentais é inferior. Este facto pode ser explicado pelo percurso do feixe de luz desde a lâmpada até ao detector, visto que tem de atravessar várias lentes que podem reflectir uma parte da radiação. Para melhorar a aproximação dos resultados experimentais às curvas teóricas foi necessário alterar os valores de  $T$ , a temperatura do filamento, e de  $a$  (que devia ser 1). É de notar, ainda, que apesar de os ajustes se adaptarem bem aos comprimentos de onda mais pequenos, o mesmo não acontece para os maiores. Para que a intensidade da curva teórica nesses pontos fosse superior teria de se fazer um ajuste diferente no qual o máximo estaria demasiado deslocado para a direita dos gráficos, o que não corresponde ao resultado desejado. Nestas condições, os ajustes apresentados são os melhores que foi possível realizar.

Partes 1 e 2 Na segunda parte do trabalho obteve-se um gráfico bastante satisfatório. O valor obtido para a constante de Boltzmann pelo declive da recta do gráfico foi de com um erro de .

Na última parte, experiência do cubo de Leslie, procurou-se estudar a emissividade das diferentes faces do cubo. Verificou-se que a face preta e a face branca (lacada) são as que emitem mais, como a sua emissividade é maior, são as que também mais absorvem. A face espelhada representa um corpo branco já que emite muito pouco na região do detector (500-25000 nm). A face cinzenta emite muito pouco devendo também por isso absorver muito pouco.

Verificou-se um aumento da intensidade de radiação emitida, em todas as faces, com o aumento da temperatura, como, de acordo com a Lei de Stefan, era de esperar.

## Referências

- [1] Gerthsen, Kneser, Vogel, *Física*, Fundação Calouste Gulbenkian, 1998.
- [2] Deus, J. D., Pimenta, M., Noronha, A., Peña, T., Brogueira, P., *Introdução à Física*, McGrawHill, 2000.

- [3] Figueirinhas, João, *Apontamentos das aulas teóricas*, 2009.