

Experimento II - Radiação Térmica

Resumo: A radiação térmica é aquela emitida por corpos em razão da sua temperatura. Esse experimento teve por objetivo estudar esse tipo de radiação em diferentes corpos, variando sua temperatura e também a distância do sensor à fonte. Os resultados obtidos avaliam as leis de Stefan - Boltzmann, a lei do inverso do quadrado da distância e outras características qualitativas da radiação térmica para diferentes superfícies.

Introdução:

Radiação térmica é a radiação emitida por um corpo devido à sua temperatura, e é emitida e absorvida por todos os corpos. Ela depende pouco do material particular do corpo e muito da temperatura, e mesmo à temperaturas de milhares de graus Kelvin, mais de 90% dessa radiação está na região do infravermelho do espectro.

No estudo da radiação térmica temos em especial os corpos negros. Esses corpos são ideais, e emitem espectros térmicos de caráter universal. Além disso, esses corpos absorvem toda a radiação térmica que incide sobre eles. Foi no estudo desses corpos que, em 1879, Stefan enunciou pela primeira vez a Lei de Stefan sob a forma de uma equação empírica:

$$R_T = \sigma T^4 \quad (1)$$

onde $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$ é a constante de Stefan - Boltzmann.

Outra relação importante é a Lei do Deslocamento de Wien, que relaciona a frequência na qual a irradiação é máxima ($\nu_{\text{máx}}$) e a temperatura (T):

$$\nu_{\text{máx}} \propto T \quad (2)$$

Essa relação mostra que, com o aumento da temperatura, o pico da intensidade de emissão do corpo também se desloca para frequências maiores.

Por fim, temos a equação que Max Planck apresentou para descrever a densidade de energia do espectro de um corpo negro $\rho_T(\nu)$ é:

$$\rho_T(\nu) d\nu = \left(\frac{8\pi \nu^2}{c^3} \right) \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} d\nu \quad (3)$$

em que ν = frequência da radiação emitida;

c = velocidade da luz ($c = 2,99 \cdot 10^8 \text{ m/s}$);

k = constante de Boltzmann ($k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$);

h = constante de Planck e

T = temperatura do corpo em Kelvin.

Objetivo

Esse experimento teve por objetivo estudar o processo de radiação térmica de diferentes corpos aquecidos e a relação entre a emissão e absorção de radiação com a temperatura e distância da fonte ao sensor. Foram utilizados corpos com características superficiais distintas e variação da temperatura.

Metodologia

Os materiais utilizados foram:

- Sensor de radiação do tipo Termopilha TD-8553;
- Voltímetro acoplado ao sensor de radiação;
- Cubo de radiação térmica TD-8554A, potenciômetro Variac;
- Termopar digital; Ventilador de resfriamento;
- Lâmpada de Stefan-Boltzmann TD-8555, fonte de alimentação, voltímetro e amperímetro para a fonte;
- Trilho com escala milimetrada, régua de 50 cm e paquímetro.

Procedimento experimental:

1. A irradiância é calculada a partir da tensão detectada pelo sensor, e a conversão é dada pela equação:

$$R = \frac{V}{A \cdot D} \quad (4)$$

em que: R = irradiância;

V = tensão medida no sensor;

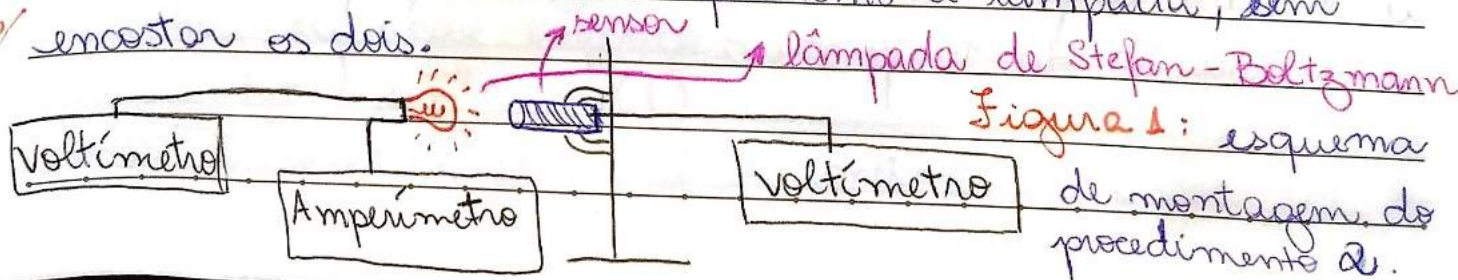
A = área sensível do detector

$$A = 4 \text{ mm}^2;$$

e $D = 18,9 \pm 3,8 \text{ V/W}$ é um fator de conversão de mV para mW fornecido pelo fabricante. Essa conversão foi utilizada em todas as medidas dessa prática experimental.

① Lei de Stefan-Boltzmann

2. Posicionou-se o sensor próximo à lâmpada, semi-encostando os dois.

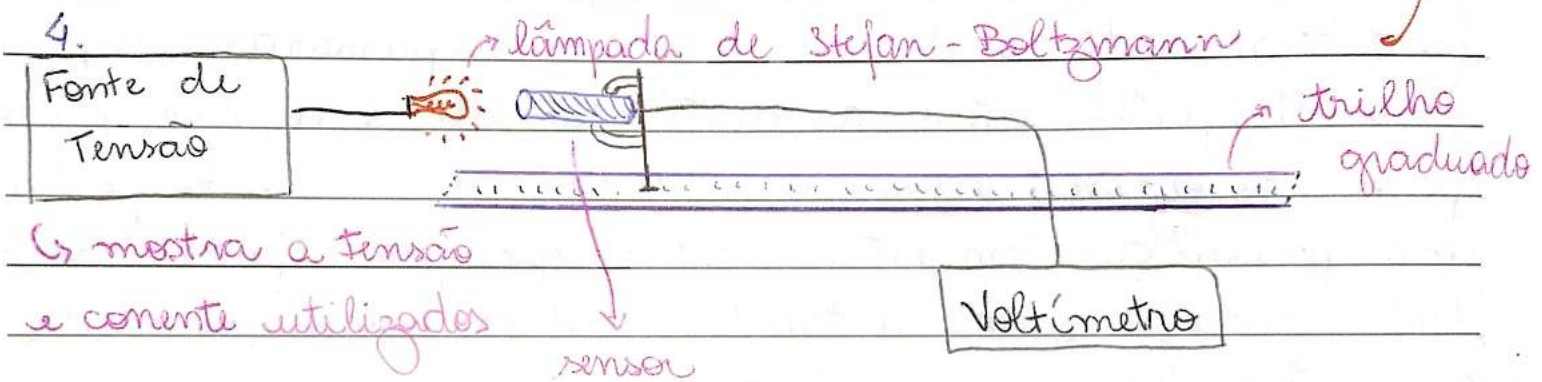


Foram obtidos os valores de tensão e corrente na lâmpada e de tensão no sensor. Mediu-se a temperatura ambiente e a resistência da lâmpada desligada.

3. Variou-se a tensão e corrente na lâmpada, alterando, conseqüentemente, sua temperatura, e então registrou-se os valores de tensão no sensor.

② Lei do Inverso do Quadrado da Distância.

4.



↳ mostra a tensão e corrente utilizadas

Figura. 2: Diagrama do experimento 2. O trilho graduado é importante pois agora varia-se a distância.

5. A tensão sobre a lâmpada foi fixada em 10V. Moveu-se o sensor sobre o trilho, variando a distância entre ele e a fonte para pontos entre 2 e 30 cm. Foram coletados 15 pontos e registrou-se a tensão no sensor em cada ponto.

③ Avaliação qualitativa da radiação térmica

6. Utilizando o cubo desligado, mediu-se a temperatura das 4 faces e a radiação emitida por elas.

7. O cubo foi aquecido empregando 10% da potência do potenciômetro e mediu-se a radiação emitida por suas

4 faces. Esse procedimento foi repetido para as porcentagens de potência de 30%, 50%, 70% e 100%.

8. A cada 10 min mediu-se a temperatura das 4 faces para ver se coincidiam. De resto, o termopar foi fixado em uma das faces.

④ Irradiância de uma fonte não pontual

9. Aqueceu-se o cubo com a potência máxima e foi determinada a tensão no sensor: primeiramente, para 11 pontos entre as distâncias de 1 à 2 cm, com passos de 0,1 cm; entre 2 e 10 cm, coletou-se 8 pontos com passos de 1 cm entre eles; e, por fim, foram coletados mais 6 pontos entre 10 e 40 cm, com passos de 5 cm. Em 40 cm a tensão do sensor foi nula, por isso esse foi o último ponto coletado. Essas distâncias foram aferidas com o paquímetro.

⑤ Lei de Stefan-Boltzmann para Baixas Temperaturas

10. O sensor foi posicionado encostado em uma das faces do cubo e a lâmpada interna ao cubo foi desligada. Na mesma face em que está o sensor, colocou-se o termopar. Dessa forma, mediu-se a tensão do sensor para cada queda de 1°C na temperatura, registrando 40 pontos entre 76°C e 37°C . Quando a queda de 1°C na temperatura demorou mais de 30 s, foi utilizado um ventilador para acelerar a coleta de dados.

⑥ Radiação do corpo humano

11. O sensor foi gentilmente encostado na pele e mediu-se

a tensão registrada por ele. No mesmo local, mediu-se também a temperatura do corpo. Esse procedimento foi feito no antebraço, pescoço e palma da mão de 3 pessoas.

Resultados e Discussões

Item 2

Primeiramente, foi calculada a equação da incerteza propagada no cálculo da Irradiação:

$$\text{Imos que: } R = \frac{V}{D \cdot A}, \quad A = 4 \text{ mm}^2 = 4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$
$$D = 18,9 \pm 3,8 \text{ V/W}$$

V é a tensão medida no sensor, portanto varia. Como sua medida é digital e a resolução é de $0,1 \text{ mV}$, essa é a incerteza experimental do instrumento $\Rightarrow \sigma_V = 0,1 \text{ mV}$.

Propagação de Incertezas:
$$\sigma_I = \sqrt{\left(\frac{\partial I}{\partial V} \cdot \sigma_V\right)^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial D} \cdot \sigma_D\right)^2}$$

$$\Rightarrow \sigma_I = \sqrt{\left(\frac{1}{DA} \cdot \sigma_V\right)^2 + \left(\frac{-V}{A \cdot D^2} \cdot \sigma_D\right)^2}$$

Substituindo valores, temos:
$$\sigma_I = \sqrt{1,74 + 7,07 \cdot 10^6 \cdot V^2}$$

Essa incerteza foi propagada para várias medidas e observou-se que ela é de cerca de 20% das medidas na maior parte. Em alguns casos, chegou a 30%, nos dados com tensões mais baixas, mas a incidência desse erro foi bastante pequena. Algumas exceções extrapolaram esse valor. Essa análise é para todos os experimentos realizados.

① Lei de Stefan-Boltzmann

Para calcular a temperatura do corpo a partir da tensão e corrente, foi necessário primeiro calcular a resistência do corpo como $R = \frac{V}{I}$. Em seguida, calcu-

lamos também a razão $\frac{R}{R_{300K}}$, sendo $R_{300K} = 0,2 \Omega$

Item 4 ↗

a resistência da lâmpada à temperatura ambiente.

Conhecendo esse valor, a temperatura foi calculada utilizando 2 métodos diferentes:

1. Pela fórmula fornecida para pequenas variações de temperatura:

$$T = \frac{R - R_{300K}}{\alpha R_{300K}} - T_{300K} \quad (5)$$

sendo $\alpha = 0,0045$ e $T_{300K} = 300 K$.

2. Pela interpolação de valores utilizando a tabela 1 abaixo. Para facilitar o cálculo, foi desenvolvida uma expressão em função da razão R/R_{300K} , de R_1 , R_2 e T_1 : $R_1 = \frac{R}{R_{300K}}$ na tabela e se refere ao valor mais

próximo e inferior a $\frac{R}{R_{300K}}$ experimental. R_2 é o valor mais próximo e superior. T_1 é a temperatura referente à R_1 . Assim, a equação é: $T = 100 \frac{\left(\frac{R}{R_{300K}} - R_1\right)}{(R_2 - R_1)} + T_1$

Os valores obtidos foram registrados na Tabela 2 como T (fórmula) e T (interpolação), respectivamente.

R/R_{300K}	$T(K)$	R/R_{300K}	$T(K)$	R/R_{300K}	$T(K)$	R/R_{300K}	$T(K)$
1,0	300	5,48	1200	10,63	2100	16,29	3000
1,43	400	6,03	1300	11,24	2200	16,95	3100
1,87	500	6,58	1400	11,84	2300	17,62	3200
2,34	600	7,14	1500	12,46	2400	18,28	3300
2,85	700	7,71	1600	13,08	2500	18,97	3400
3,36	800	8,28	1700	13,72	2600	19,66	3500
3,88	900	8,86	1800	14,34	2700	20,35	3600
4,41	1000	9,44	1900	14,99	2800		
4,95	1100	10,03	2000	15,63	2900		

Tabela 1: Dependência da resistência com a temperatura do filamento de tungstênio, usada para o cálculo da temperatura por interpolação.

↑ Item 3 e 5

Ponto	Tensão Lâmpada (V)	Tensão Sensor (mV)	Corrente Lâmpada (A)	R (ohms)	R/R300K	T (K) (fórmula)	T (K) (interpolação)	Irradiância (W/m ²)
1	1,0	0,0	0,87	1,149	5,75	757	1249	0,0
2	2,0	0,3	1,1	1,818	9,09	1500	1840	4,0
3	3,0	1,1	1,28	2,344	11,72	2084	2280	14,6
4	4,0	2,4	1,47	2,721	13,61	2503	2582	31,7
5	5,0	4,2	1,66	3,012	15,06	2826	2811	55,6
6	6,0	6,4	1,83	3,279	16,39	3123	3016	84,7
7	7,0	8,7	1,98	3,535	17,68	3408	3209	115,1
8	8,0	11,2	2,13	3,756	18,78	3653	3372	148,1
9	9,0	13,6	2,24	4,018	20,09	3944	3506	179,9
10	10,0	16,6	2,38	4,202	21,01	4148	3620	219,6

Tabela 2: Dados coletados e calculados na seção 1 do experimento. Nota-se as duas temperaturas calculadas e a irradiância.

Pela Tabela 2, podemos perceber uma grande divergência entre as temperaturas calculadas pelos 2 métodos. Pelo gráfico 1 colocado a seguir, e que mostra a relação entre a Irradiância e a temperatura no filamento, vemos que as temperaturas calculadas por interpolação se ajustam melhor à Lei de Stefan-Boltzmann. O ajuste foi feito com uma função $R = (SB) \cdot (T^4)$, em que

R = Irradiância, T = temperatura e SB = constante de Stefan-Boltzmann.

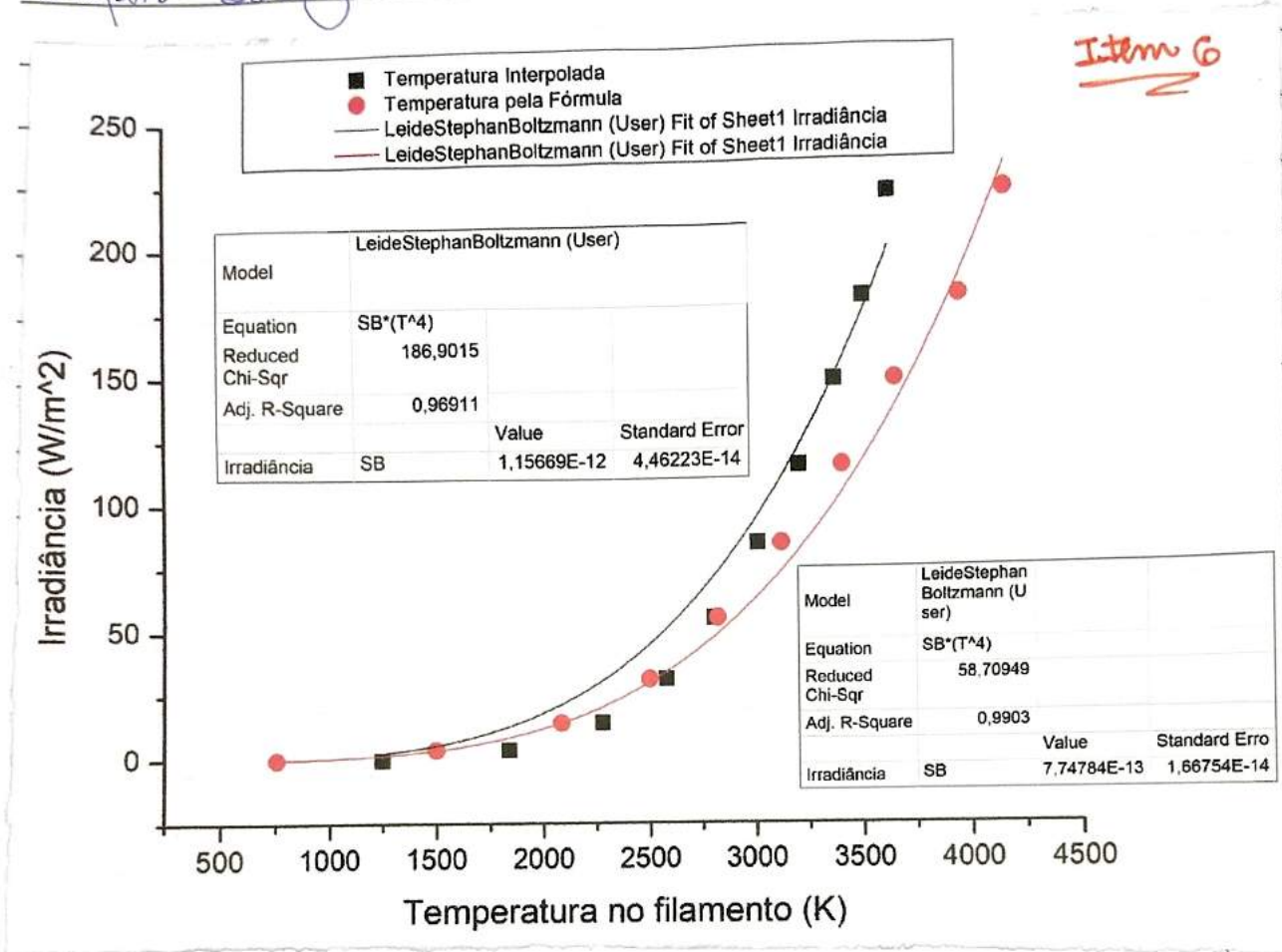


Gráfico 1: Dados de Irradiância em função da temperatura. Em preto temos os dados das temperaturas por interpolação e em vermelho, pela fórmula (5).

Os valores obtidos para a constante de Boltzmann foram $SB = 1,16 \cdot 10^{-12} \frac{W}{m^2 K^4}$ com a temperatura interpolada e $SB = 7,75 \cdot 10^{-13} \frac{W}{m^2 K^4}$ com a temperatura obtida pela equação (5). Como o valor teórico da constante é de $5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$, vemos que os dois valores obtidos ficaram longe do esperado, mas foi melhor com os dados da Temperatura por interpolação.

Essa diferença entre os valores obtidos e esperado é devida ao fato de a constante ter sido calculada para corpos negros, o que não é o caso do nosso experimento. Também estão associadas as incertezas da medição.

② Lei do Inverso do quadrado da distância

Os dados coletados de tensão no sensor, de distância do sensor à fonte e a irradiância calculada foram colocados na Tabela 3 abaixo:

Ponto	Distância (cm)	Tensão (mV)	Irradiância (W/m ²)	Distância (m)
1	2	50,5	668,0	0,02
2	4	19,2	254,0	0,04
3	6	8,7	115,1	0,06
4	8	6,1	80,7	0,08
5	10	3,6	47,6	0,1
6	12	2,5	33,1	0,12
7	14	1,8	23,8	0,14
8	16	1,4	18,5	0,16
9	18	1,1	14,6	0,18
10	20	0,9	11,9	0,2
11	22	0,7	9,3	0,22
12	24	0,6	7,9	0,24
13	26	0,5	6,6	0,26
14	28	0,4	5,3	0,28
15	30	0,4	5,3	0,3

~ 1 km 8

Tabela 3: Dados da seção 2 do experimento.

① gráfico de Irradiância \times Distância foi feito 2 vezes: uma contendo todos os valores e outra descartando os 3 primeiros pontos. Esse gráfico, Gráfico 2 e Gráfico 3, respectivamente, foram colocados a seguir:

Item 9

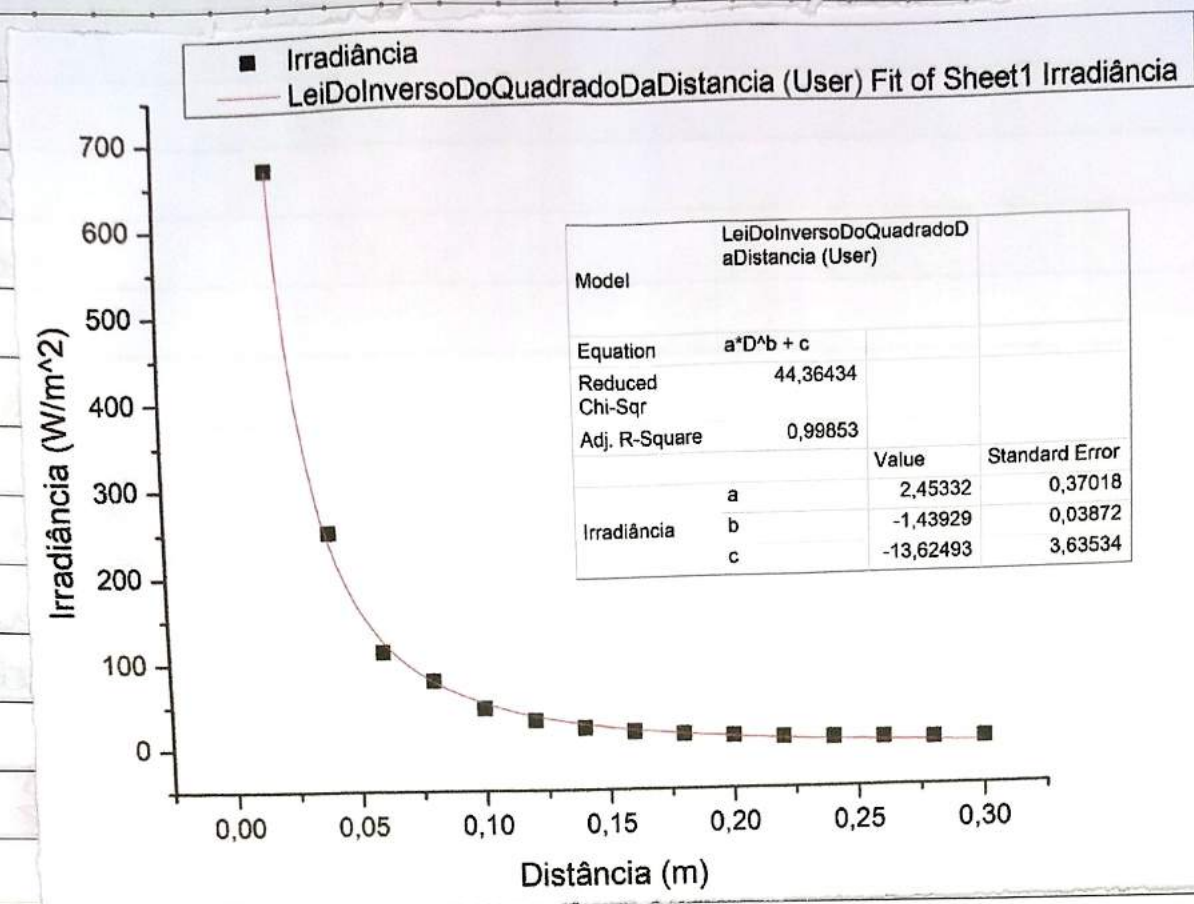


Gráfico 2: Dados de Irradiância em função da distância para todos os pontos.

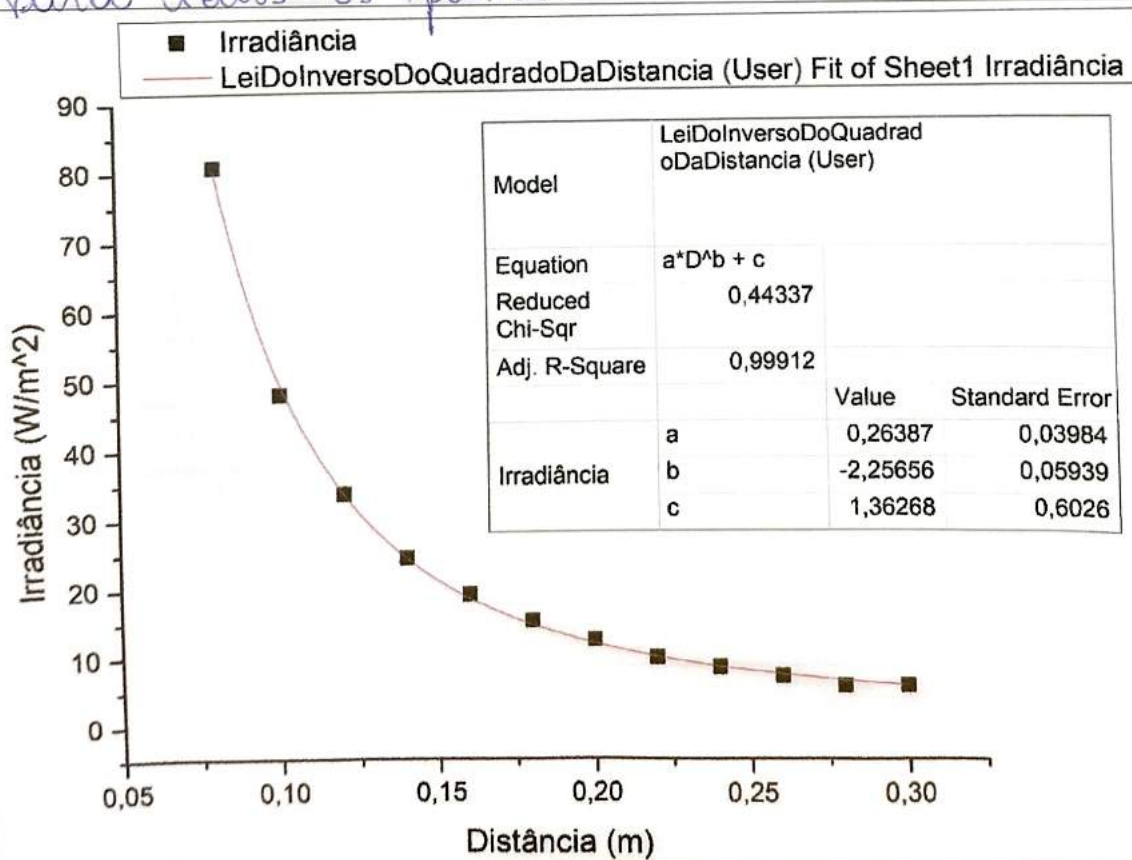


Gráfico 3: Dados da Irradiância pela Distância descartando os 3 primeiros pontos.

Podemos perceber que ambos os gráficos fornecem o expoente da distância como negativo, o que prova sua inversibilidade. O termo, que deveria ser quadrático, foi igual a $b = -1,44$ no Gráfico 1 e $b = -2,15$ no Gráfico 2. Portanto, o gráfico que descarta os 3 primeiros pontos apresenta maior exatidão, o que indica que houve maior incerteza nesses dados iniciais. Com base nisso, podemos afirmar que a lei da inverso do quadrado da distância foi comprovada, com um erro de cerca de 7% da medida mais exata.

(3) Avaliação qualitativa da radiação térmica

Item 10

A temperatura das faces se mostrou igual em todas as medições feitas, portanto o termopar foi fixado em apenas uma delas.

Os valores coletados nessa seção, para as 4 faces do cubo, foram colocados na Tabela 4: (Itens 11 e 12)

Porcentagem da potência	Temperatura (°C)	Tensão (mV)				Irradiância (W/m ²)			
		Preta	Lisa	Branca	Rugosa	Preta	Lisa	Branca	Rugosa
10%	27	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
30%	29	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
50%	36	0,6	0,0	0,5	0,3	7,9	0,0	6,6	4,0
70%	46	1,8	0,2	1,8	1,1	23,8	2,6	23,8	14,6
100%	62	3,8	0,6	3,8	2,3	50,3	7,9	50,3	30,4

Tabela 4: Dados de tensão do sensor e irradiância para as 4 faces do cubo.

A partir desses dados foi feito um gráfico que relaciona a Irradiância e a Temperatura:

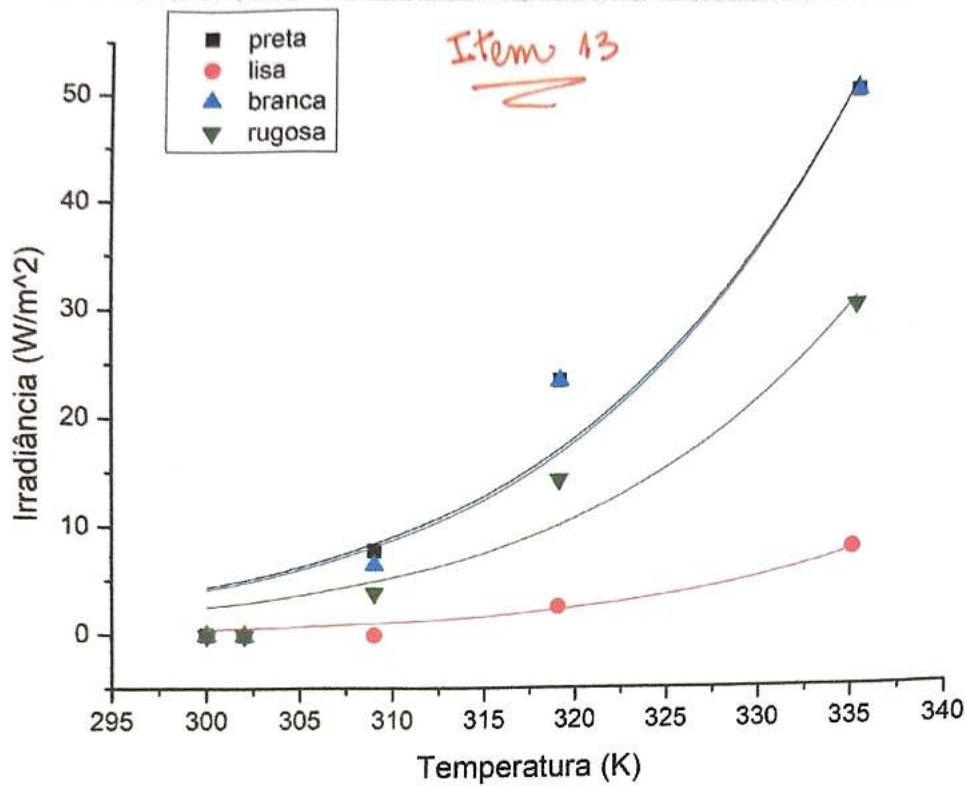


Gráfico 4: Dados de Irradiância \times Temperatura para as 4 faces do cubo, com um ajuste para avaliar a proximidade com a Lei de Stefan-Boltzmann.

Podemos avaliar que os dados não se ajustaram bem com a Lei de Stefan-Boltzmann. Além disso, o termo exponencial da temperatura foi da ordem de 22, muito distante do valor esperado de 4. Isso pode ser explicado por 2 principais motivos: primeiramente, o cubo não pode ser considerado um corpo negro; o segundo ponto é que as temperaturas usadas foram baixas e a variação entre elas também, por isso o gráfico obtido mostra um comportamento quase linear.

Item 14
Além disso, devemos notar uma diferença entre o comportamento de cada face. As faces branca e preta apresentam um comportamento muito parecido, ao contrário do esperado, pois como a face preta absorve todas as

Item 23

freqüências do espectro visível, era esperado que sua irradiância fosse maior. No entanto, como o sensor detecta a radiação infravermelha, essa diferença não foi aparente.

Quanto às superfícies lisa e rugosa, sabemos que a superfície rugosa possui uma área maior de superfície, o que permite que ela absorva mais radiação e, portanto, emita mais também. Em compensação, a superfície lisa reflete mais, absorvendo menos.

④ Irradiância de uma fonte não pontual

Item 15

Para fontes não pontuais não esperamos observar a lei do inverso do quadrado da distância, pois apesar de observar a inversibilidade (visto que a irradiância de fato diminui com o aumento da distância) isso não ocorre com um fator quadrático, já que o sensor observará radiação advinda de arredor da área captada em uma fonte pontual. Portanto, há uma relação de decaimento da tensão no sensor (consequentemente, da irradiância) mas não é possível saber previamente a que fator.

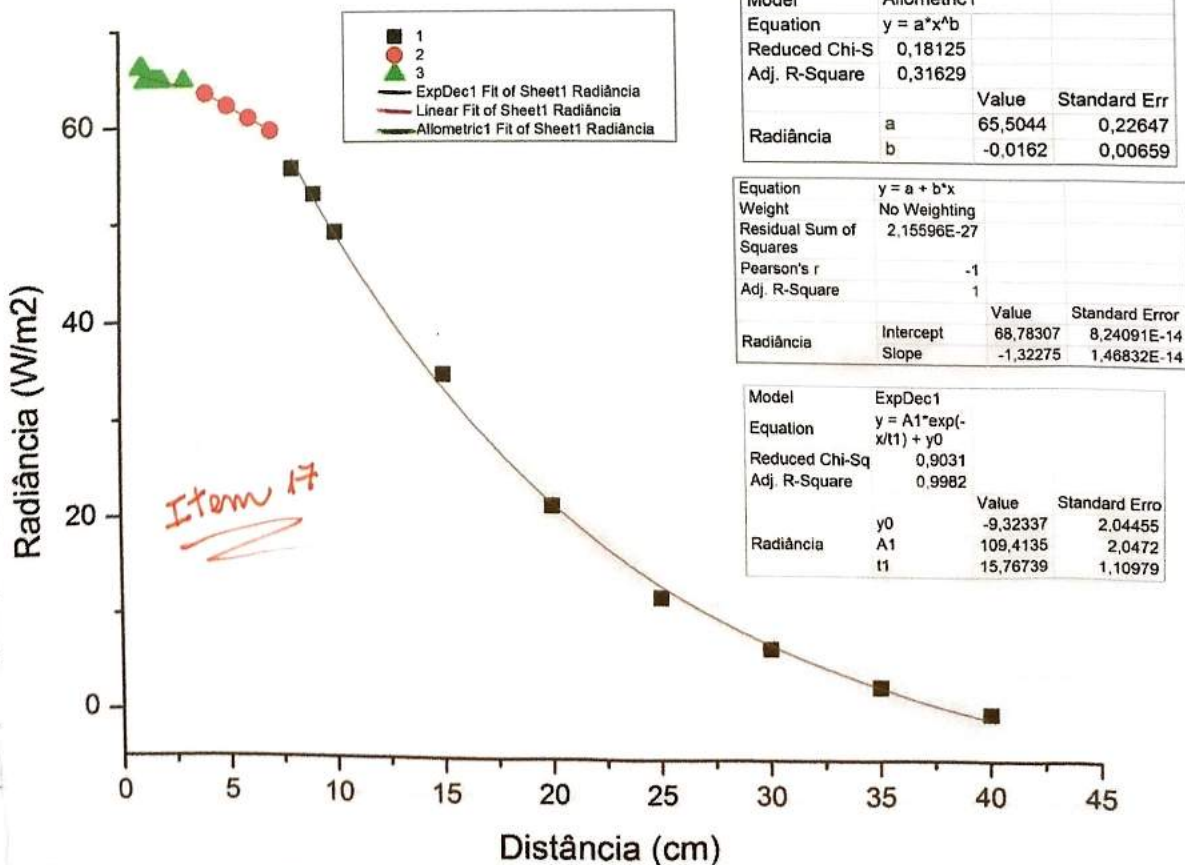
Os dados coletados nessa seção experimental foram colocados na tabela 5 a seguir. A partir dos dados, foi feito um gráfico de Irradiância em função da distância, que foi dividido em 3 seções e se aplicou diferentes ajustes a cada seção. Isso foi feito pois para distâncias pequenas a variação observada é mínima, enquanto que para as distâncias maiores o comportamento se aproxima mais do de uma fonte pontual. Esse gráfico foi colocado após a tabela, como Gráfico 5:

Distância (cm)	Temperatura (°C)	Tensão no sensor (mV)	Potência por área (W/m ²)
1	74	5	66,1
1,1	74	5	66,1
1,2	74	4,9	64,8
1,3	74	4,9	64,8
1,4	74	4,9	64,8
1,5	74	4,9	64,8
1,6	74	4,9	64,8
1,7	74	4,9	64,8
1,8	74	4,9	64,8
1,9	74	4,9	64,8
2	75	4,9	64,8
3	75	4,9	64,8
4	75	4,8	63,5
5	75	4,7	62,2
6	75	4,6	60,8
7	75	4,5	59,5
8	75	4,2	55,6
9	75	4	52,9
10	75	3,7	48,9
15	76	2,6	34,4
20	76	1,6	21,2
25	76	0,9	11,9
30	76	0,5	6,6
35	76	0,2	2,6
40	76	0	0,0

Item 16

Tabela 5: Dados para o experimento com fontes não pontuais

Gráfico 5: Relação da Irradiância em função da distância para fonte não pontual.



Observamos pelo gráfico que distâncias pequenas tem um comportamento aproximado alométrico, as distâncias médias seguem um ajuste linear e então a irradiância decai exponencialmente.

⑤ Lei de Stefan - Boltzmann para Baixas Temperaturas

Item 18

Com o sensor encostado em uma das ~~faces~~ faces do cubo, registrou-se o valor da irradiância conforme o resfriamento do cubo. Os valores obtidos foram colocados na Tabela 6 abaixo. Com os dados coletados foi feito

Temperatura (°C)	Tensão sensor (mV)	Radiância (W/m ²)
76	5,4	71,4
75	5,3	70,1
74	5,2	68,8
73	5,0	66,1
72	4,9	64,8
71	4,8	63,5
70	4,6	60,8
69	4,4	58,2
68	4,3	56,9
67	4	52,9
66	3,9	51,6
65	3,7	48,9
64	3,6	47,6
63	3,4	45,0
62	3,2	42,3
61	3,1	41,0
60	3	39,7
59	2,9	38,4
58	2,8	37,0
57	2,7	35,7
56	2,5	33,1
55	2,4	31,7
54	2,3	30,4
53	2,2	29,1
52	2	26,5
51	1,9	25,1

um gráfico de Irradiância pela Temperatura, em que observa-se um comportamento aproximadamente linear, já que a faixa de temperatura foi pequena e não é suficiente para observar a Lei de Stefan - Boltzmann.

Tabela 6: Dados de temperatura e irradiância da resfriação do cubo.

Temperatura (°C)	Tensão sensor (mV)	Radiância (W/m ²)
76	5,4	71,4
75	5,3	70,1
74	5,2	68,8
73	5,0	66,1
72	4,9	64,8
71	4,8	63,5
70	4,6	60,8
69	4,4	58,2
68	4,3	56,9
67	4	52,9
66	3,9	51,6
65	3,7	48,9
64	3,6	47,6
63	3,4	45,0
62	3,2	42,3
61	3,1	41,0
60	3	39,7
59	2,9	38,4
58	2,8	37,0
57	2,7	35,7
56	2,5	33,1
55	2,4	31,7
54	2,3	30,4
53	2,2	29,1
52	2	26,5
51	1,9	25,1
50	1,8	23,8
49	1,7	22,5
48	1,5	19,8
47	1,4	18,5
46	1,4	18,5
45	1,3	17,2
44	1,2	15,9
43	1	13,2
42	0,9	11,9
41	0,8	10,6
40	0,7	9,3
39	0,6	7,9
38	0,5	6,6
37	0,5	6,6

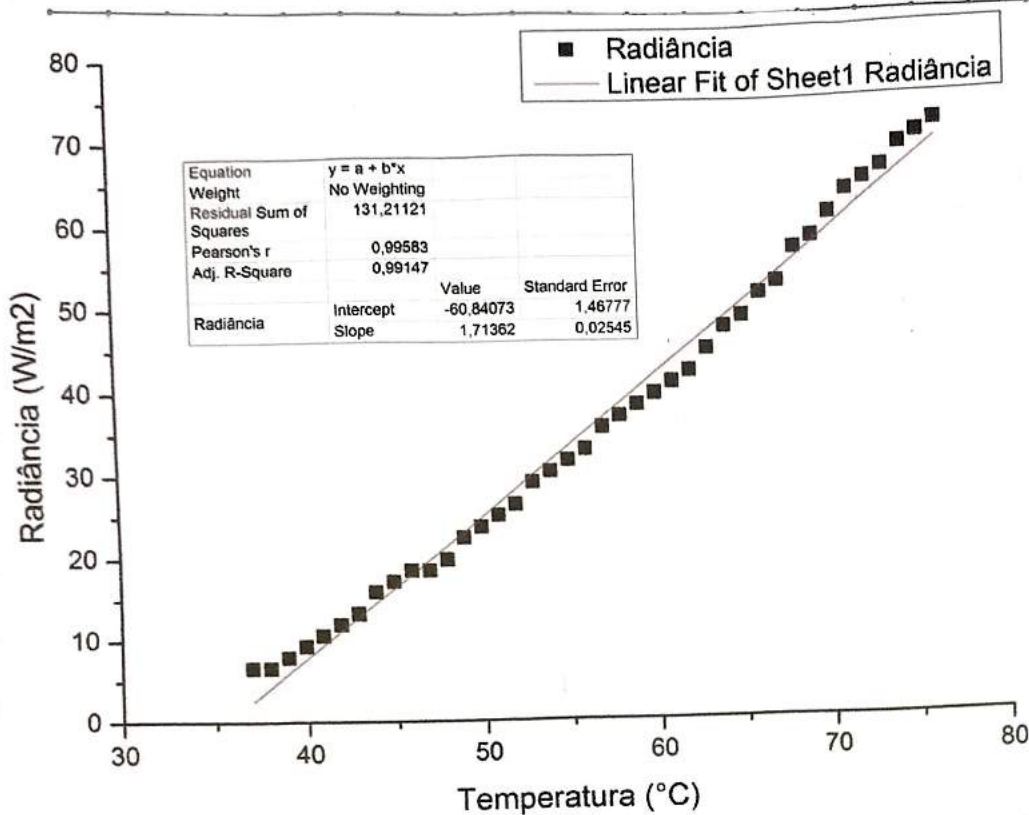


Gráfico 6: Dados da Irradiância pela Temperatura para baixas temperaturas.

⑥ Radiação do Corpo Humano

Os dados coletados de tensão e a irradiância calculada para as 3 pessoas (A, B e C) foram registrados na Tabela 7 abaixo: Item 19

Parte do Corpo / Medidas	Sensor em A (mV)	Radiância A (W/m²)	Sensor em B (mV)	Radiância B (W/m²)	Sensor em C (mV)	Radiância C (W/m²)
Antebraço	0,40	5,29	0,30	3,97	0,20	2,65
Pescoço	0,50	6,61	0,40	5,29	0,40	5,29
Palma da mão	0,40	5,29	0,40	5,29	0,10	1,32

Tabela 7: Dados relativos à radiação emitida pelo corpo humano para 3 pessoas e 3 partes do corpo.

Item 20

Observamos uma discordância entre esses valores medidos e os esperados pela literatura, que indica que a potência emitida pelo corpo humano é próxima a 90 W e a nossa pele possui uma área de $1,2 \text{ m}^2$.

aproximadamente. Usando essa área e a irradiância obtida na Tabela 7, podemos calcular uma potência experimentalmente como $P = I \cdot A$, sendo $P =$ potência e $I =$ irradiância. Fazendo isso, obtemos:

Membro (Parte do corpo) / Pessoa	A	B	C
	Potência (W)	Potência (W)	Potência (W)
Antebraço	6,3	4,8	3,2
Pescoço	7,9	6,3	6,3
Palma da mão	6,3	6,3	1,6
média	6,9	5,8	3,7

Como podemos ver, os valores obtidos estão muito distantes do esperado de 90 W. Isso pode estar associado à precisão do sensor, em partes, para medir irradiância do corpo humano. Além disso, devemos considerar as partes do corpo que foram medidas, pois a mão e o antebraço são regiões mais periféricas, e portanto possuem temperatura mais baixa. A própria tabela deixa isso perceptível pois o pescoço é a região de maior radiação emitida. Se fizéssemos isso para todo o corpo, obteríamos resultados diferentes.

Comentários gerais

Item 2.2

Portanto, podemos perceber que, das faces do cubo, a face preta foi a que melhor emitiu radiação, seguida pela face branca, rugosa e, por último, a face lisa, como já justificado anteriormente:

Item 24 Também percebeu-se que para baixas temperaturas a Lei de Stefan-Boltzmann é mais difícil de ser aplicada, pois os pontos ficam aproximadamente lineares.

Item 25 Além disso, a lei é para corpos negros, que são ideais, o que faz com que ela não seja suficientemente precisa para outros corpos.

Item 26 O corpo humano, assim como outros corpos, tem sua maior intensidade de radiação na faixa do infravermelho, ou seja, aproximadamente acima de 700nm .

Conclusão

O experimento permitiu avaliar a absorção e emissão de radiação térmica por diferentes corpos e superfícies e verificar a Lei de Stefan-Boltzmann, que é válida para todas as temperaturas mas difícil de se observar nas baixas temperaturas. Pudemos também averiguar o comprimento da lei do inverso do quadrado da distância e a radiação do corpo humano, que foi bastante imediata.

Referências

- Eisberg, R. & Resnick, R. - Física Quântica: átomos, moléculas, sólidos, núcleos e Partículas. (1979)