

RADIAÇÃO TÉRMICA

RESUMO

O experimento realizado teve a função de verificar a validade da lei de Stefan-Boltzmann. Pode-se verificar que o experimento coincidiu com o que era esperado na teoria, com pequenos valores de erro. Entretanto, para baixas energias, viu-se que a lei de Stefan-Boltzmann não foi suficiente e obtivemos um valor discrepante do esperado.

OBJETIVO

Investigar os processos de emissão de radiação de corpos aquecidos. Alcançar um entendimento a cerca dos processos de absorção e emissão de corpos e a relação entre a emissão da radiação e a temperatura que o corpo se encontra.

INTRODUÇÃO

A radiação térmica é definida como ondas eletromagnéticas geradas pela oscilação das partículas carregadas que compõem os sólidos aquecidos. Ou seja, a radiação térmica é a radiação emitida por um corpo a sua temperatura e se origina devido ao movimento das cargas elétricas no interior dos corpos, sendo que todo corpo absorve e emite essa radiação acima de zero absoluto.

A energia irradiada por um sólido aquecido a uma temperatura T , em função da frequência ν , é descrita em termos de uma distribuição espectral ou radiância espectral de intensidade. Em geral, o espectro de radiação térmica emitido por um sólido aquecido depende da sua composição. Entretanto, definiu-se um sólido aquecido ideal que emite um espec-

tro de intensidade que independe da natureza do material, que é uma cavidade no interior de um sólido qualquer. Seja:

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

sendo $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}$ é a constante de Stefan-Boltzmann e a equação (1) a Lei de Stefan-Boltzmann para determinar a radiação espectral. Ademais, o orifício da cavidade dita anteriormente têm características de um corpo negro e a sua radiação emitida equivale a radiação do corpo negro.

Sendo que, corpo negro é um corpo que absorve toda a radiação incidida sobre ele.

Por conseguinte, esses fatos levaram Rayleigh e Jeans a teoria clássica da radiação de cavidade, que previa que a energia total média tem o mesmo valor para todas as ondas estacionárias na cavidade independente de sua frequência. O impasse foi que, para altos valores de frequência a densidade de energia tomava valores infinitamente altos, o que foi conhecido como Catástrofe do Ultravioleta.

Ademais, para altas temperaturas, os experimentos de Wien mostrava um decaimento exponencial para a densidade de energia. Assim, com o aumento da temperatura se deslocava para maiores frequências, fazendo com que o comprimento de onda correspondente a máxima radiação espectral emitida por um corpo negro é inversamente proporcional à sua temperatura.

$$\lambda_{\text{max}} \cdot T = cte \quad (2)$$

sendo $cte = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ mK}$ e a equação (2) a Lei de Deslocamento.

mento de Wien.

A explicação correta da radiação de corpo negro foi feita por Max Planck, o qual supôs que a energia média das ondas eletromagnéticas seja uma função da frequência, contrariando o princípio da equipartição de energia. A grande contribuição de Planck foi quando considerou que a energia deveria assumir somente valores discretos, e não mais contínuos. O espectro de corpo negro de Planck:

$$j(\nu, T) d\nu = \left[\frac{8\pi\nu^2}{c^3} \right] \cdot \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (3)$$

Em que ν é a frequência natural da radiação emitida em Hz, c é a velocidade da luz com valor $2,997 \cdot 10^8$ m/s, k é a constante de Boltzmann sendo $1,38 \cdot 10^{-23}$ m² Kg / K², h é a constante de Planck com valor $6,62 \cdot 10^{-34}$ m² Kg/s e T é a temperatura do corpo em Kelvin.

METODOLOGIA

No procedimento experimental foram utilizados um detector de radiação do tipo termopilha TD-8553, acoplado a um voltímetro para detectar os valores coletados de tensão da radiação térmica, um cubo de radiação térmica TD-8554A com um potenciômetro variac, um termopar digital, um ventilador de resfriamento, uma lâmpada de Stefan-Boltzmann TD-8555, uma fonte de alimentação e um trilho de escala milimétrica.

O voltímetro coletava a irradiância emitida por um corpo em valores de tensão V , e portanto era necessário converter este valor para W/m^2 para obter o valor real para a irradiância.

Para isso, utilizamos a equação:

$$\dot{R}_{\text{rad}} = \frac{V}{DA} \quad (4)$$

sendo V a tensão coletada pelo voltímetro, D é uma constante de conversão de valor $(18,9 \pm 3,8) \text{ V/W}$ e A é a área do sensor de radiação.

O experimento se dividiu em seis procedimentos:

1) Lei de Stefan-Boltzmann

Nesta parte foi estudada a validade da lei de Stefan-Boltzmann para altas temperaturas. Posicionava-se o sensor perto da lâmpada, em uma distância fixa, para determinar a radiação emitida em função da intensidade (temperatura) da lâmpada, com diferentes valores de tensão. A lâmpada de Stefan-Boltzmann se aproxima de uma fonte pontual. A temperatura do filamento pode ser obtida através da resistência do filamento, onde para pequenas variações de temperatura temos a relação:

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

em que R é a resistência do filamento, obtida pela lei de Ohm coletando tanto a corrente quanto a voltagem respectiva da lâmpada, R_{ref} é a resistência e T_{ref} a temperatura de referência, onde para $25^\circ\text{C} \approx 300\text{K}$ temos $0,2 \Omega$ (dados do fabricante) e α é uma constante de valor $0,0045$.

2) Lei do inverso do quadrado da distância

Nesta etapa, foi estudada a validade da equação (1) para a radiação térmica de uma fonte pontual (lâmpada de Stefan-Boltzmann). O procedimento consistiu-se em variar a posição do sensor em relação à lâmpada, com uma tensão fixa em 10V, e verificar os valores de irradiância em função da distância entre o sensor e a lâmpada, graficamente, buscando uma função de ajuste que comprovava a dependência ao quadrado.

3) Avaliação qualitativa da radiação térmica

Nesta etapa, foi utilizado o cubo com quatro faces de alumínio com diferentes materiais a envolvendo (escura, branca, lisa e opaca). Dentro do cubo havia uma lâmpada para aquecê-lo. O procedimento consistiu em aquecer o cubo com diferentes porcentagens de potência da lâmpada (10, 30, 50, 70 e 100%) de forma a aquecer o ~~cubo~~ cubo e então coletar sua irradiância nas quatro faces. Foi utilizado o termopar em uma das faces para ajustar as temperaturas e observá-las. Verificou-se a relação da irradiância de cada face em função da temperatura do cubo.

4) Irradiância de uma fonte não pontual

Nesta parte, utilizando o cubo com a potência máxima da lâmpada, observou-se a relação entre irradiância em função da distância.

5) Lei de Stefan-Boltzmann

Nesta etapa utilizou-se o ventilador para resfriar o cubo. Conforme a temperatura caía, coletava-se os dados de irradiância, em que se analisava os dados um em função do outro.

6) Radiação de corpo humano

Nesta etapa, foram coletados dados da irradiação do corpo de pessoas diferentes, levando em conta que a área da pele tem um valor próximo de $1,2 \text{ m}^2$.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

1) Lei de Stefan-Boltzmann

Com o sensor fixo a uma distância de 6 cm do filamento da lâmpada, coletou-se os valores de corrente e tensão da lâmpada, determinando sua resistência pela relação $V = R \cdot i$ e a sua temperatura, e assim, pela equação (4), tivemos a irradiação da lâmpada pelo sensor. Os dados obtidos estão na tabela 1 e o esquema experimental está na figura 1.

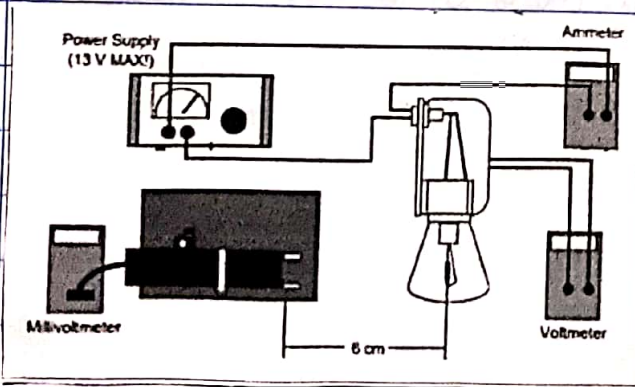


FIGURA 1: Diagrama experimental para a verificação da lei de Stefan-Boltzmann para altas temperaturas;

Tensão Lâmpada (V)	Tensão sensor (mV)	Corrente Lâmpada (A)	R (ohms)	R/R300K	T (K) Equação	T (K) Interpolação	Potencia (W/m ²)
1,0	0,00	0,87	1,15	5,75	755	1249	0,00
2,0	0,30	1,10	1,82	9,09	1498	1840	3,97
3,0	1,10	1,28	2,34	11,72	2082	2278	14,55
4,0	2,40	1,47	2,72	13,61	2501	2582	31,75
5,0	4,20	1,66	3,01	15,06	2824	2811	55,56
6,0	6,40	1,83	3,28	16,39	3121	3016	84,66
7,0	8,70	1,98	3,54	17,68	3406	3209	115,08
8,0	11,20	2,13	3,76	18,78	3651	3372	148,15
9,0	13,60	2,24	4,02	20,09	3942	3506	179,89
10,0	16,60	2,38	4,20	21,01	4146	3520	219,58

TABELA 1: Referente aos dados coletados das grandezas da lâmpada;

Obs. Há na tabela 1 dois valores de temperatura, um determinado pela equação (5) e o outro determinado por meio de interpolação (analisados em referência a tabela presente no retiro).

A partir dos valores obtidos na tabela 1, foi feito um gráfico de irradiância em função da temperatura. Os valores foram ajustados para a equação $y = A(x - x_c)^p + y_0$, que seria uma relação para determinar os valores de coeficiente que comprovasse a Lei de Stefan-Boltzmann (equação 1).

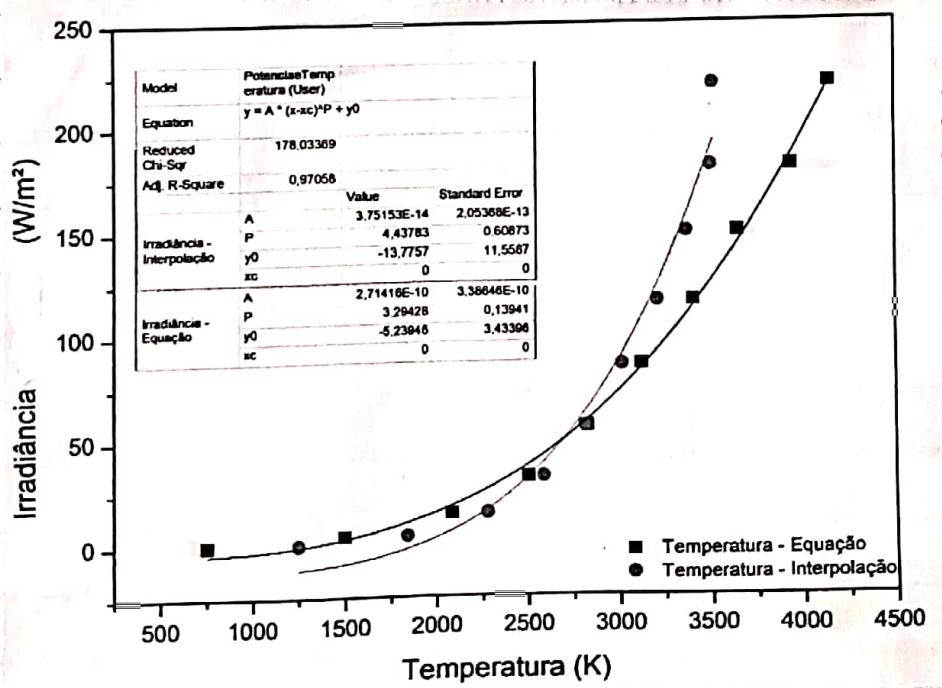


FIGURA 2: Gráfico da irradiância em função da temperatura;

Com o ajuste feito no gráfico, obtivemos valores para o expoente da temperatura (o usado é 4), sendo $(4,44 \pm 0,61)$ para o método usando interpolação, com uma diferença de 10% do valor esperado; e $(3,29 \pm 0,14)$ para o método da equação, com

uma diferença de 22% do valor esperado. Comprovando que, de maneira aproximada, a Lei de Stefan-Boltzmann é válida. E, através do gráfico, vemos que a irradiância cresce com o aumento da temperatura.

2) Lei do inverso do quadrado da distância

Tendo a lâmpada com uma tensão fixa de 10V, variando a distância do sensor até a lâmpada e assim coletada o valor da irradiância. Foi feito um gráfico da irradiância em função da distância. Os valores foram ajustados para a equação $y = A(x - x_c)^p + y_0$ para que fosse possível verificar a Lei do inverso do quadrado da distância.

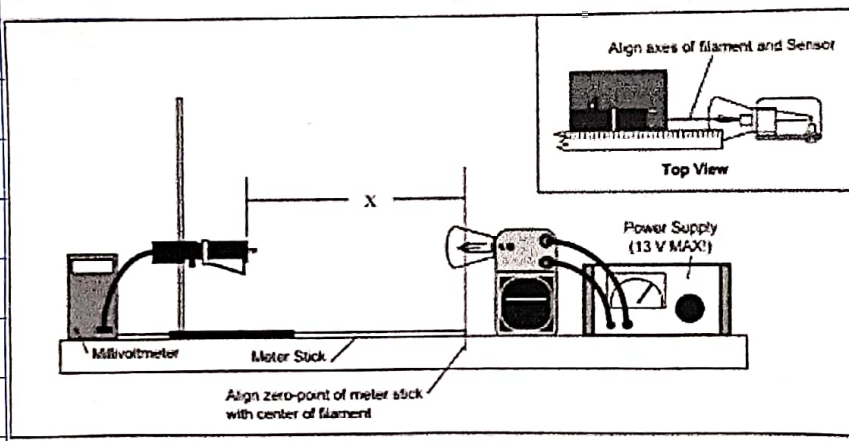


FIGURA 3: Diagrama experimental para a verificação da lei do inverso do quadrado da distância;

Distância (m)	Tensão (mV)	Potência/Área (W/m ²)
0,02	50,50	667,99
0,04	19,20	253,97
0,06	8,70	115,08
0,08	6,10	80,69
0,10	3,60	47,62
0,12	2,50	33,07
0,14	1,80	23,81
0,16	1,40	18,52
0,18	1,10	14,55
0,20	0,90	11,90
0,22	0,70	9,26
0,24	0,60	7,94
0,26	0,50	6,61
0,28	0,40	5,29
0,30	0,40	5,29

TABELA 2: Referente aos dados coletados para diferentes valores de distância.

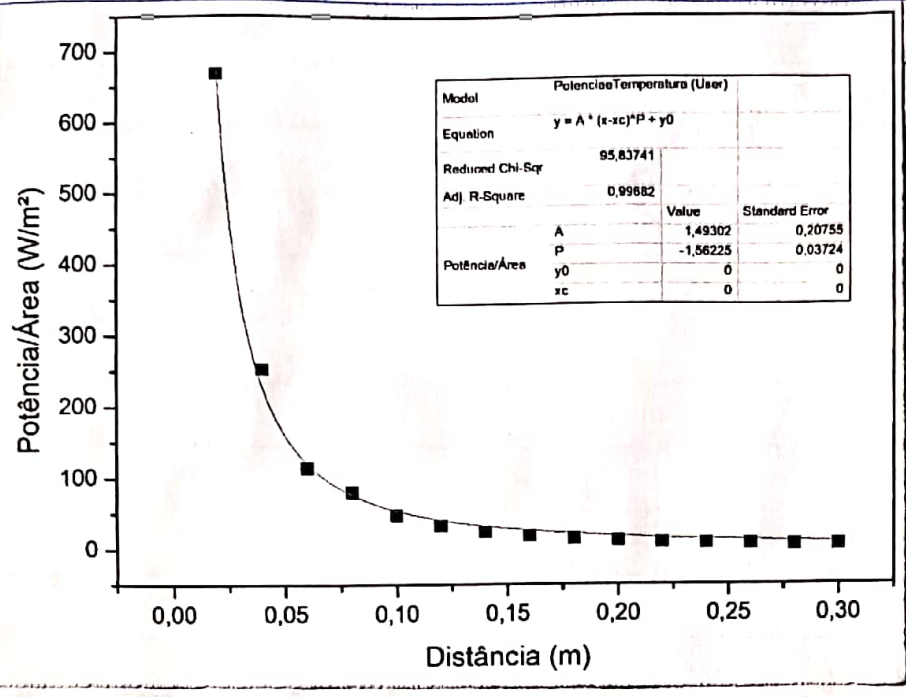


FIGURA 4: Gráfico da irradiância em função da distância entre o sensor e a lâmpada;

Aplicamos a função logarítmica nos valores do gráfico da figura 4 e tiramos:

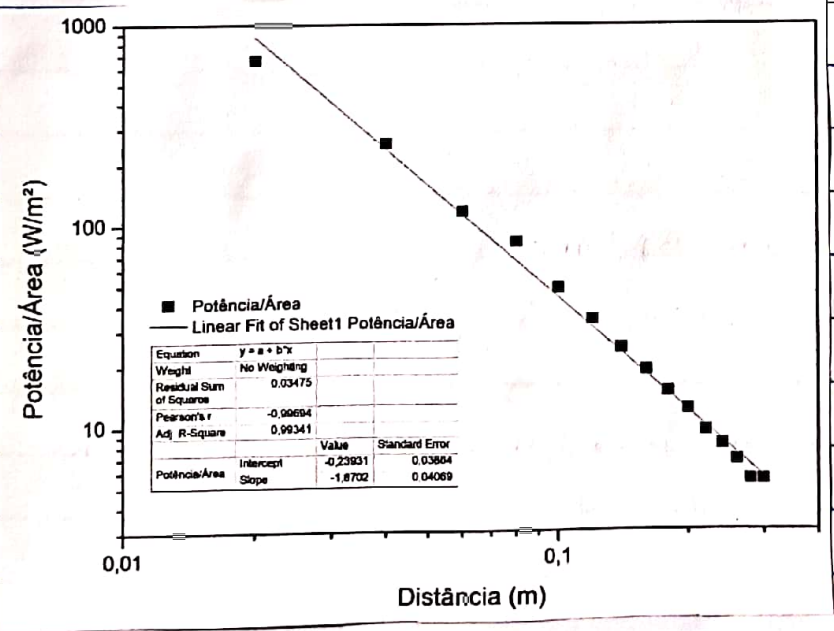


FIGURA 5: Gráfico com a aplicação de log nos dados do gráfico da figura 4;

Pelo ajuste do gráfico da figura 4 tiramos o coeficiente $(-1,56 \pm 0,04)$, com uma diferença de 28% do valor esperado, que era -2 (inverso do quadrado).

Assim, tratando o valor de forma aproximada, pois existem variáveis físicas que influenciam o erro (experimental, do equipamento), pode-se confirmar a lei do inverso do quadrado

da distância:

Para uma melhor verificação, foi feito um gráfico de irradiância em função de $1/r^2$. Segue:

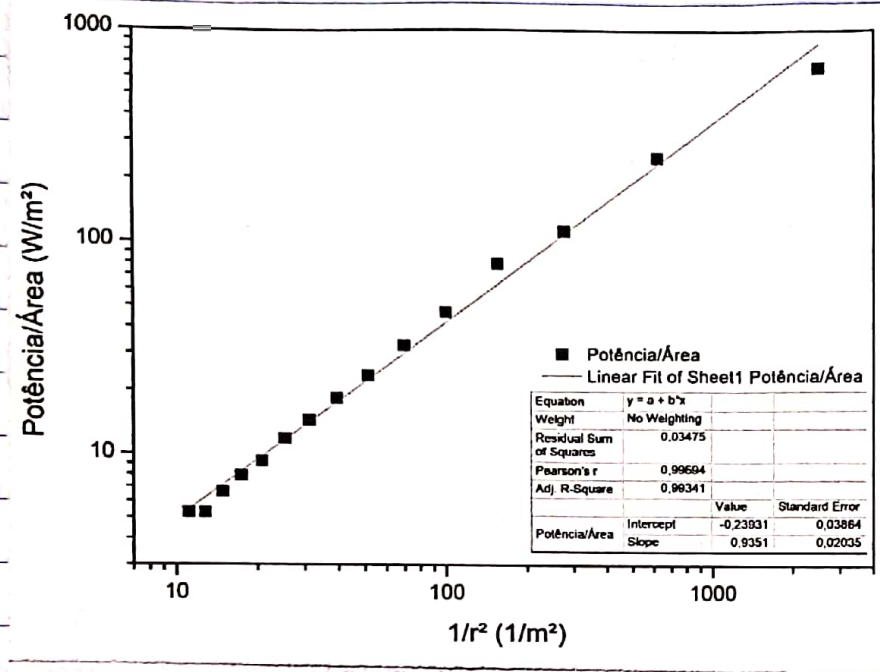


FIGURA 6: Gráfico de di-log da irradiância em função de $1/r^2$.

3) Avaliação qualitativa da radiação térmica

Com o cubo desligado, medimos o valor de temperatura de 26°C . Dize-se que o cubo aquecido por uma lâmpada em seu interior terá uma temperatura igual para as quatro faces, pois o cubo é irradiado de forma homogênea e tem a mesma composição de material.

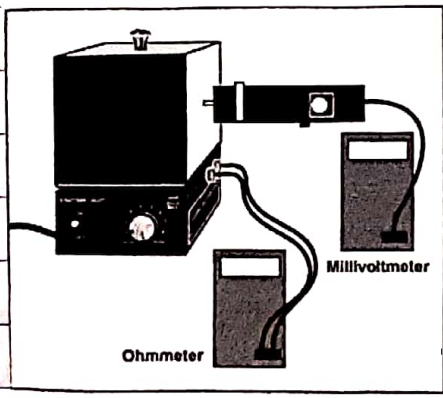


FIGURA 7: Diagrama experimental para

avaliação qualitativa da radiação térmica;

Para que fosse possível determinar a dependência da temperatura em função da irradiância emitida pelas faces, coletamos os dados de tensão e convertemos para irradiância

Ajuste da variação	Temperatura (°C)	Irradiância (W/m²)			
		Preta	Lisa	Branca	Rugosa
10%	27	0,0	0,0	0,0	0,0
30%	29	0,0	0,0	0,0	0,0
50%	36	7,9	0,0	6,6	4,0
70%	46	23,8	2,6	23,8	14,6
100%	62	50,3	7,9	50,3	30,4

TABELA 3: referente aos valores de irradiância e temperatura;

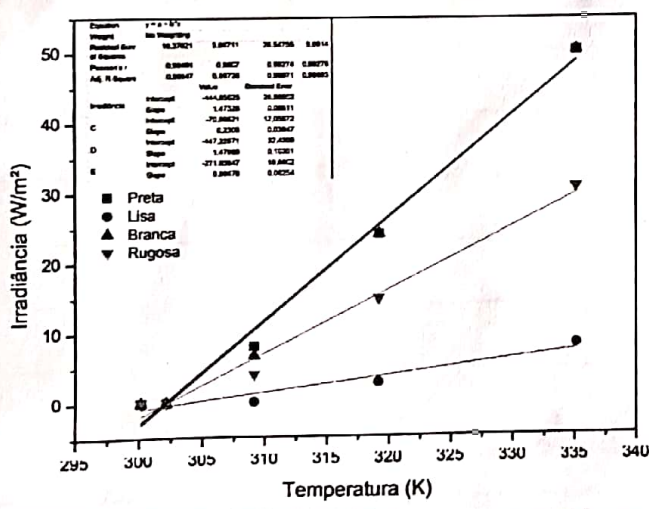


FIGURA 8: gráfico da irradiância de cada face do cubo em função da temperatura.

Obs. do gráfico: PRETA - $(1,47 \pm 0,09)$; LISA - $(0,23 \pm 0,04)$; BRANCA - $(1,48 \pm 0,10)$; RUGOSA - $(0,89 \pm 0,06)$.

Referentes as faces do cubo, tivemos a ordem abaixo como sendo os melhores emissores de radiação:

$$\text{Branca} \approx \text{Preta} > \text{Rugosa} > \text{Lisa}$$

(*) Assim, pode-se verificar que as faces branca e preta emitem aproximadamente a mesma quantidade de radiação, a qual varia com o aumento da temperatura. Logo, como estudado, a face preta absorve praticamente todos os raios luminosos.

absorvendo uma maior energia e não refletindo os raios. Entretanto, em contrapartida, a face branca tem um baixo poder de absorção, refletindo boa parte dos raios luminosos. Assim, no equilíbrio, a absorção e a reflexão dos raios têm aproximadamente o mesmo valor de irradiância.

Na face lisa pode-se verificar que houve uma pequena variação no valor da irradiância quando a temperatura era aumentada. Além de que, para a face lisa, os raios luminosos eram quase todos refletidos.

Na face rugosa ocorreu um aumento no valor da irradiância com o aumento da temperatura, o que pode ser justificado pelos raios luminosos serem mais facilmente refratados.

4) Irradiância de uma fonte não pontual

Nesta etapa do experimento visava verificar se o comportamento da irradiância em função do aumento da distância confirmaria o esperado pela lei do inverso do quadrado da distância, agora para uma fonte não pontual.

Uma das faces do cubo foi ~~aquecida~~ aquecida para que fosse possível detectar sua irradiância. Os dados da irradiância e da variação da distância foram expostos na tabela abaixo e depois foi feito um gráfico usando o ajuste para a equação $y = A(x - x_0)^p + y_0$.

Distância (cm)	Temperatura (°C)	Tensão no sensor (mV)	Potência por área (W/m ²)
1,0	74,0	5,0	66,138
1,1	74,0	5,0	66,138
1,2	74,0	4,9	64,815
1,3	74,0	4,9	64,815
1,4	74,0	4,9	64,815
1,5	74,0	4,9	64,815
1,6	74,0	4,9	64,815
1,7	74,0	4,9	64,815

TABELA 4: Referente aos dados obtidos para análise da irradiância de uma fonte não pontual;

Distância (cm)	Temperatura (°C)	Tensão no sensor (mV)	Potência por área (W/m ²)
1,0	74,0	5,0	66,138
1,1	74,0	5,0	66,138
1,2	74,0	4,9	64,815
1,3	74,0	4,9	64,815
1,4	74,0	4,9	64,815
1,5	74,0	4,9	64,815
1,6	74,0	4,9	64,815
1,7	74,0	4,9	64,815
1,8	74,0	4,9	64,815
1,9	74,0	4,9	64,815
2,0	75,0	4,9	64,815
3,0	75,0	4,9	64,815
4,0	75,0	4,8	63,492
5,0	75,0	4,7	62,169
6,0	75,0	4,6	60,847
7,0	75,0	4,5	59,524
8,0	75,0	4,2	55,556
9,0	75,0	4,0	52,910
10,0	75,0	3,7	48,942
15,0	76,0	2,6	34,392
20,0	76,0	1,6	21,164
25,0	76,0	0,9	11,905
30,0	76,0	0,5	6,614
35,0	76,0	0,2	2,646
40,0	76,0	0,0	0,000

TABELA 4: Referente aos dados obtidos para análise da irradiação de uma fonte não pontual;

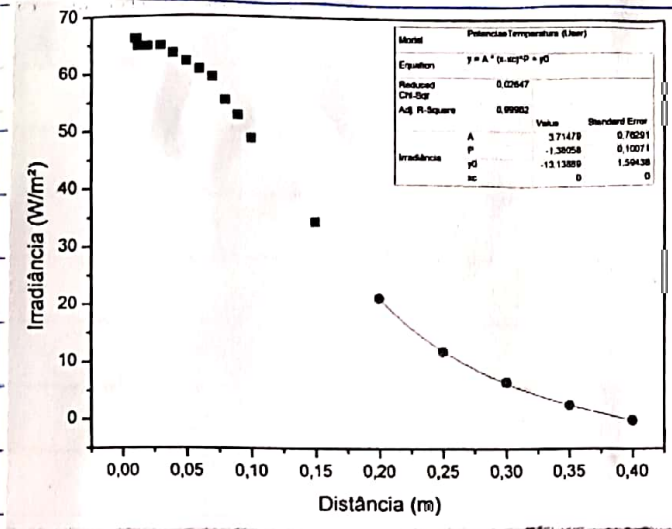


FIGURA 9: gráfico da irradiância em função da distância para uma fonte não pontual.

Obs. Não analisamos o fitting para todos os dados experimentais, somente os que obedecem a curva.

Podemos observar que o gráfico da figura 9 tem um coeficiente de $(-1,38 \pm 0,10)$, que é 40% diferente do valor esperado (que era -2). Com isso, pode-se concluir que, para este caso, a fonte não pontual ^{não} confirma o esperado pela lei do inverso do quadrado da distância, com aproximações.

5) Lei de Stefan-Boltzmann para baixas temperaturas

Coletar os dados de irradiância emitida por uma das faces do cubo em função do decaimento da temperatura (resfriamento). Os dados foram colocados em uma tabela e depois analisados em um gráfico com o intuito de verificar a Lei de Stefan-Boltzmann para baixas temperaturas. Ademais, no gráfico, buscaremos determinar a constante de Stefan-Boltzmann por meio de uma regressão linear.

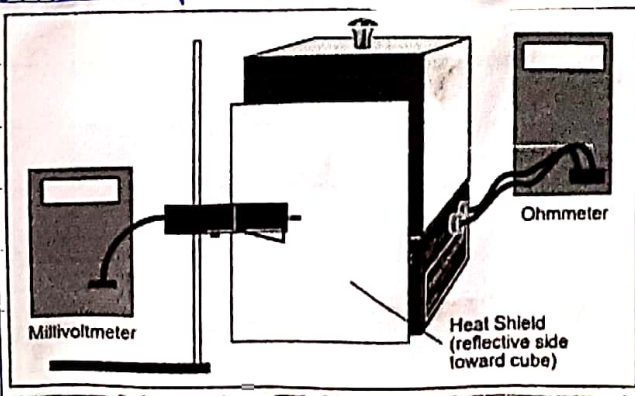


FIGURA 10: Diagrama experimental para verificação da Lei de Stefan-Boltzmann para baixas temperaturas.

Temperatura (°C)	Tensão no sensor (mV)	Irradiância (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

TABELA 5: -Referente aos dados obtidos da irradiância em função do decaimento da temperatura;

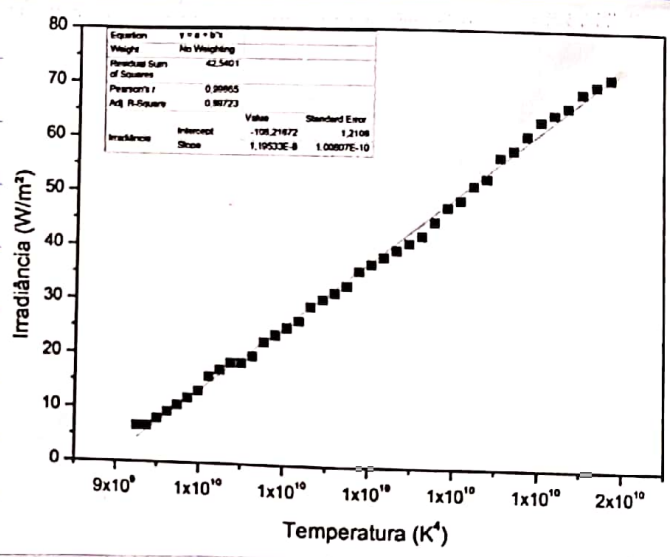


FIGURA 11: Gráfico da irradiância em função da temperatura elevada a quarta potência;

Através da análise do gráfico obtivemos um valor de $(1,19 \pm 0,01) \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$. Entretanto, apesar de sua precisão, o valor obtido experimentalmente ficou muito distante do valor esperado, que era de $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$, com uma discrepância muito grande. O erro pode ter sido influenciado por diversos fatores como: variação rápida no resfriamento para a temperatura, erros experimentais e incertezas dos instrumentos.

6) Radiação do corpo humano

A irradiância emitida pelo nosso corpo pode ser determinada ao encostarmos um sensor em nossa pele. Sabendo que nosso corpo emite uma potência próxima a 90 W e nossa pele possui uma área de $1,2 \text{ m}^2$, o valor de irradiância do nosso corpo é 75 W/m^2 .

Na prática, medimos os seguintes valores:

Medições do sensor em mV				Irradiância [W/m^2]		
Pessoa	A	B	C	A	B	C
Antebraco	0,4	0,3	0,2	5,3	4,0	2,6
Pescoço	0,5	0,4	0,4	6,6	5,3	5,3
Palma da mão	0,4	0,4	0,1	5,3	5,3	1,3

TABELA 6: Referente aos valores medidos da irradiância para algumas partes do corpo;

Como pode-se notar, os valores obtidos são bem diferentes para o esperado. Uma das explicações seria que o valor de 75 W/m^2 é referente ao corpo todo, e não a algumas partes.

Os valores médios:

Ante-braco: $(3,97 \pm 1,08) \text{ W/m}^2$

Pescoço: $(5,73 \pm 0,62) \text{ W/m}^2$

Palma da mão: $(3,97 \pm 1,87) \text{ W/m}^2$

Ademais, quando a temperatura do corpo se aproxima a temperatura do ambiente, devemos considerar a temperatura do corpo. Para isso, dev-se dividir o valor obtido pelo valor esperado (quando analisado em algum referencial) da irradiação daquela parte do corpo; ou pede-se subtrair o valor da irradiação do corpo com o valor da irradiação para o ambiente.

A) Respondendo as questões: (2)

22. Em ordem crescente, lisa - rugosa - preta - branca, foi a sequência para os novos valores de melhores emissores de radiação.

A superfície lisa reflete a radiação incidida, não absorvendo quase nada e, como bom absorvedor de radiação são bom emissores, a superfície lisa não é boa emissora; a superfície rugosa é um bom absorvedor de radiação por não dissipar a energia tão rapidamente; a superfície preta tem semelhança com o corpo negro, sendo um ótimo absorvedor e emissor de radiação; a superfície branca foi um bom emissor de radiação, por causa da capacidade de não dissipar a energia tão rápido quanto a superfície lisa.

23. O cubo tem a mesma temperatura para todas as faces, mas com valores de emissão diferentes devido as propriedades que caracteriza cada face, com visto em (22).

24. A lei de Stepm-Boltzmann para baixas temperaturas apresentou um comportamento aproximadamente linear (vide figura 11). Entretanto, para altas temperaturas, o gráfico segue o

comportamento de parábola com uma função exponencial crescente.

25. A relação $R = \sigma T^4$ é usada para corpos negros e vale para todas as temperaturas. Entretanto, o corpo negro é um objeto de estudo idealizado, onde não sabe-se ao certo o valor de sua temperatura, logo não pode ser comparado a objetos reais.

26. Adirindo ao fato que a temperatura média temporal é aproximadamente 36°C , podemos usar a lei do deslocamento de Wien. Assim:

$$\lambda_{\text{max}} T = \text{cte}$$

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{(2,898 \cdot 10^{-3}) \text{ [mK]}}{(36 + 273,15) \text{ [K]}}$$

$$\lambda_{\text{max}} \approx 9,37 \cdot 10^{-6} \text{ m} \approx 9,37 \mu\text{m}$$

* Lembrando que a propagação de erro para a equação (4):

$$\sigma_R = \sqrt{\left[\frac{\partial R}{\partial V}\right]^2 \sigma_V^2 + \left[\frac{\partial R}{\partial D}\right]^2 \sigma_D^2 + \left[\frac{\partial R}{\partial A}\right]^2 \sigma_A^2}$$

$$\sigma_R = \sqrt{\left[\frac{1}{DA}\right]^2 \sigma_V^2 + \left[\frac{-V}{DA^2}\right]^2 \sigma_D^2 + \left[\frac{-V}{DA^2}\right]^2 \sigma_A^2}$$

$$\sigma_R = \sqrt{\left[\frac{1}{(18,9)(4 \cdot 10^{-6})}\right]^2 (0,1)^2 + \left[\frac{-(1,1 \cdot 10^{-3})}{(18,9)^2 (4 \cdot 10^{-6})}\right]^2 (3,8)^2 + \left[\frac{-(1,1 \cdot 10^{-3})(510^4)}{(18,9)(4 \cdot 10^{-6})}\right]^2}$$

$$\sigma_R = 1,12 \text{ W/m}^2$$

CONCLUSÃO

Conclui-se então, de experimentos, que a Lei de Stefan-Boltzmann é válida para se estimar o fluxo total de energia para corpos que emitem radiação. Ao analisar graficamente, obtivemos valores de expoente com 10% e 22% de diferença do valor es-

perado. Ademais, analisamos a veracidade das experiências que dizem que um corpo negro ~~se~~ possui irradiância que decai com o inverso do quadrado da distância, onde obtivemos valores com 28% de diferença do esperado, comprovando o esperado. Em viés, quando utilizamos uma fonte não pontual, o erro foi de 40%; um dos fatos se deu que, na análise do gráfico, só consideramos os valores que seguiam o padrão da curva e, com isso, torna-se evidente que a escolha do intervalo influencia diretamente na acurácia da determinação do expoente.

Na análise de forma qualitativa a irradiância das diferentes faces do cubo, onde as faces branca e preta irradiam mais em comparação as outras, além de terem aproximadamente o mesmo valor irradiado. A face rugosa irradia mais do que a face lisa, e uma das explicações é a área total da parte rugosa ser maior que a lisa. Ao suspender o cubo analisamos que a lei de Stefan-Boltzmann não é válida para baixas frequências, pois obtivemos um valor de $(1,19 \pm 0,1) \cdot 10^8 \text{ W/m}^2\text{K}^4$, muito distante do esperado para a constante de Boltzmann.

Por fim, analisamos a irradiância emitida por algumas partes do corpo e vimos que a pessoa C obtém alguns valores diferentes esperado em relação aos outros experimentados.

REFERÊNCIAS

[1] - Letivo experimental

[2] Livro: ~~de~~ Eisberg, R - Física Quântica; cap. 1

* Na radiação emitida pela face branca e pela face preta os valores bem próximos. Entretanto, a ~~face~~ face branca, na su-

29

quã de visível, tem mais baixa absorção do que o puto.