

## Experimento 2 - Radiação Térmica

### Resumo

O experimento sobre Radiação Térmica permitiu analisar a radiação emitida e observada nos corpos e sua relação com a temperatura na qual o corpo se encontra. Para isso, realizou-se vários experimentos para corpos com diferentes temperaturas e diferentes características superficiais. Os resultados obtidos estavam de acordo com o previsto pela teoria.

### Introdução

A Radiação Térmica é uma onda eletromagnética emitida por todos os objetos com temperatura acima de zero absoluto, a qual não apresenta apenas uma frequência e é determinada pelo irradiação espectral que é a energia emitida por unidade de tempo, por unidade de área sob a forma de radiação com frequência  $\nu$  e por um corpo a temperatura  $T$ .

As primeiras medidas espectrais precisas foram realizadas por Lummer e Pringsheim em 1899 e eles permitiram observar que a radiação cresce rapidamente com a temperatura e que o espectro se desloca para maiores frequências com o aumento da temperatura.

A partir da relação da radiação com a temperatura Josef Stefan criou a lei de Stefan em 1879:

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

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

Além disso, observou-se que o comprimento de onda correspondente a máxima irradiância espectral emitido por um corpo negro (corpo cujas superfícies absorvem toda radiação; emite espectros térmicos de caráter universal e não reflete luz) é inversamente proporcional à sua temperatura. Relação conhecida como lei de deslocamento de Wien:

$$\lambda_{\text{max}} \propto T \Rightarrow \lambda_{\text{max}} T = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ mK}$$

Mais tarde, Max Planck determinou a densidade de energia do espectro de um corpo negro como:

$$P(\nu) d\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \cdot \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} d\nu \quad (2)$$

onde  $h$  é a constante de Planck,  $c$  é a velocidade da luz,  $\nu$  é a frequência da radiação emitida,  $T$  é a temperatura do corpo e  $k$  é a constante de Boltzmann.

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} \quad c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$$

Ademais, há a lei de inverso do quadrado, a qual diz que a intensidade de radiação de uma fonte de luz é inversamente proporcional ao quadrado da distância da fonte de luz.

### metodologia

Para a realização do experimento utilizou-se os seguintes materiais: sensor de radiação (TD-8553); voltímetros acoplados ao sensor; cubo de radiação térmico (TD-8554A), potenciômetro; termopar digital; ventilador de resfriamento; lâmpada de Stefan-Boltzmann (TD-8555), fonte de alimentação; voltímetro, amperímetro; trena com escala milimétrica; régua de 50 cm e paquímetro.

O experimento foi dividido em várias etapas:

1) A irradiancia emitida por um corpo negro medida utilizando-se um sensor acoplado ao voltímetro com sensibilidade  $mV$ . Assim, deve-se converter o valor de  $mV$  para  $mW$  empregando a relação apresentada pelo fabricante:  $18,9 \pm 3,8 \text{ V/W}$  por meio da seguinte relação  $A = \frac{V}{D \cdot A}$  (3); onde  $V$  é a tensão em  $mV$ ,  $D$  é constante igual a  $18,9 \pm 3,8 \text{ V/W}$  e  $A$  é área do sensor igual a  $4 \text{ mm}^2$ .

• Determinar a equação de propagação do erro para a irradiancia e aplicar para apenas uma medida.

a) Lei de Stefan-Boltzmann: variar a tensão na lâmpada e medir a irradiancia para 10 valores diferentes de tensão.

3) Fixar a tensão sobre a lâmpada em  $10V$  e variar a distância do sensor à lâmpada ( $L \propto D$ )

4) Avaliação qualitativa do radiação térmica: medir a irradiancia de um cubo com 4 faces com lâmpada

5) Fonte não pontual: variar a distância do sensor de  $0,5 \text{ cm}$  em  $0,5 \text{ cm}$ , depois variar de  $1 \text{ cm}$  em  $1 \text{ cm}$  até que a irradiancia seja nula.

6) Posicionar o sensor em uma das faces do cubo, desligar a lâmpada, ligar o ventilador e medir a irradiancia a cada  $1^\circ C$  de aproximadamente  $40^\circ C$ .

7) Determinar a irradiancia emitida pelo nosso corpo encostando gentilmente o sensor na pele; registre a temperatura do pele.

## Resultados

Etapa 1a) A partir dos dados coletados, calculou-se a resistência da lâmpada, a resistência de referência, a irradiancia

e a temperatura; (Lei de Stefan Boltzmann);

Tabela 1: Referência aos dados coletados no experimento

Ponto	Tensão Lâmpada (V)	Tensão Sensor (mV)	Corrente Lâmpada (A)	R (ohms)	R/R300K	T (K)	W/m <sup>2</sup>
1	1,0	0,0	0,87	1,149	5,747	1249	0,0
2	2,0	0,3	1,1	1,818	9,091	1840	4,0
3	3,0	1,1	1,28	2,344	11,719	2278	14,6
4	4,0	2,4	1,47	2,721	13,605	2582	31,7
5	5,0	4,2	1,66	3,012	15,060	2811	55,6
6	6,0	6,4	1,83	3,279	16,393	3016	84,7
7	7,0	8,7	1,98	3,535	17,677	3209	115,1
8	8,0	11,2	2,13	3,756	18,779	3372	148,1
9	9,0	13,6	2,24	4,018	20,089	3506	179,9
10	10,0	16,6	2,38	4,202	21,008	3520	219,6

Cálculo da incerteza para a equação do Bradiômetro (3)

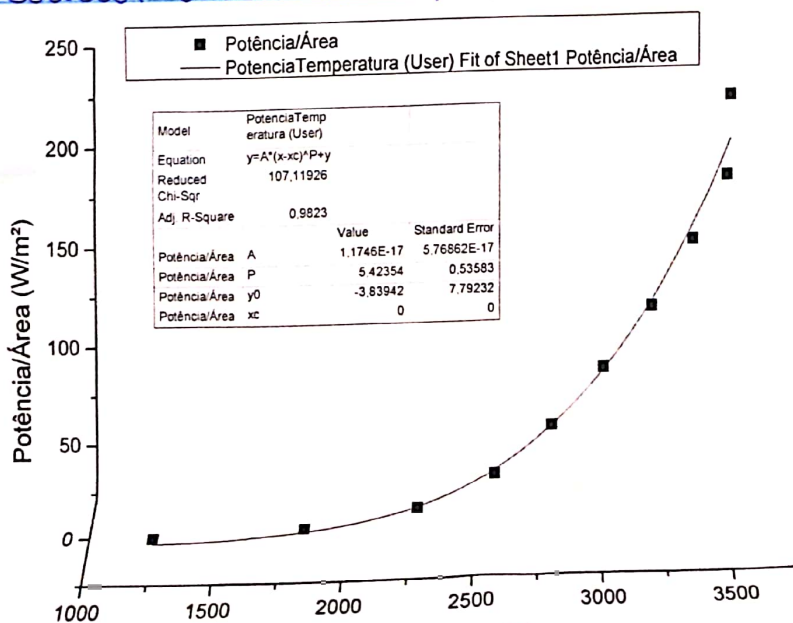
$$\Delta R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial V}\right)^2 (\Delta V)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial b}\right)^2 (\Delta b)^2}$$

Escolhendo apenas um valor de  $\Delta V$  e considerando seu desvio sendo  $\Delta V = 0,1 \text{ mV}$ , desvio do voltímetro digital, temos:

$$\Delta R = \sqrt{\left(\frac{1}{D \cdot A}\right)^2 (\Delta V)^2 + \left(\frac{-V}{D \cdot A}\right)^2 (\Delta b)^2}$$

Para  $V = 1,1 \text{ mV}$ , temos  $\Delta R = 2,9 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$

Gráfico 1: Bradiômetro do filamento calculado a partir do tensão no detector versus a temperatura no filamento



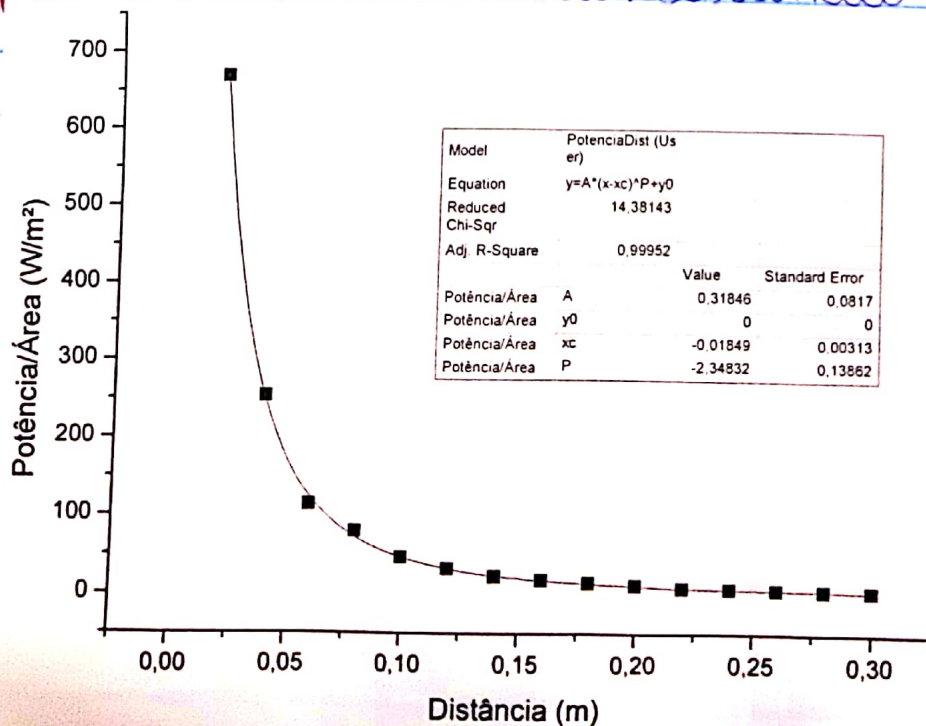
T° ambiente = 25°C  
R<sub>25°C</sub> = 0,2 ohms

Etapa 3) Variando-se a distância entre o sensor e lâmpada e fixando a tensão sobre a lâmpada em 10V, obtiveram-se os seguintes dados

Tabela 2: Referência aos dados coletados na etapa 3 de experimento

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

Gráfico 2: Irradiância versus distância



**Etapa 4) Avaliação qualitativa da Radiação Térmica**

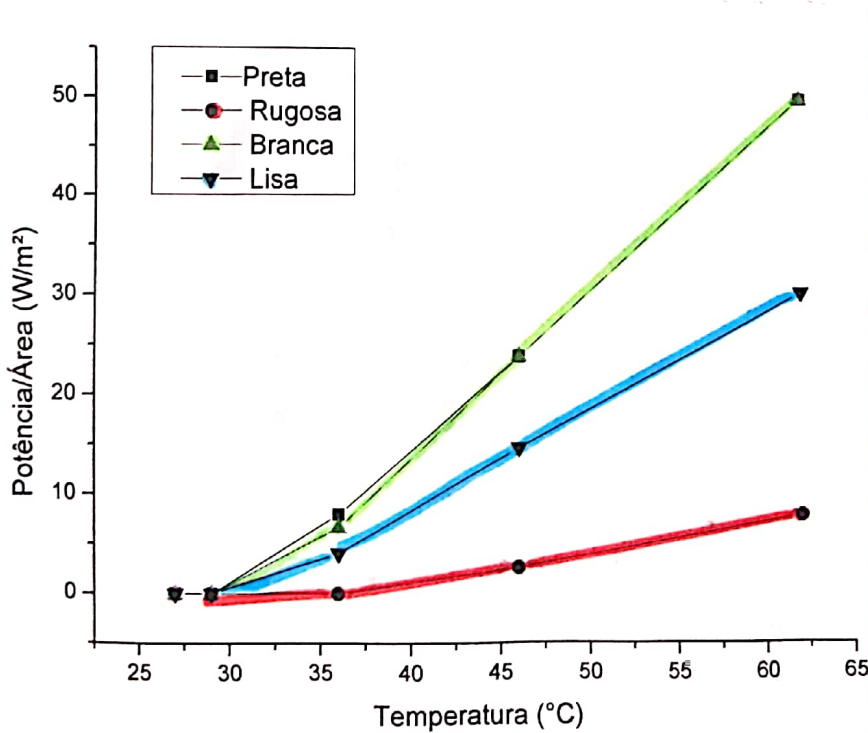
**Tabela 3:** Referência aos dados coletados no experimento

Ajuste do variac	Temperatura (oC)	Tensão para as seguintes superfícies (mV)			
		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	0,6	0,0	0,5	0,3
70%	46	1,8	0,2	1,8	1,1
100%	62	3,8	0,6	3,8	2,3

**Tabela 4:** Valores obtidos a partir dos dados do tabela 3.

Potência/Área (W/m <sup>2</sup> )			
Preta	Lisa	Branca	Rugosa
0,0	0	0	0
0,0	0	0	0
7,9	0	6,61	3,97
23,8	2,65	23,81	14,55
50,3	7,94	50,26	30,42

**Gráfico 3:** Irradiância dos 4 faces do cubo versus a temperatura

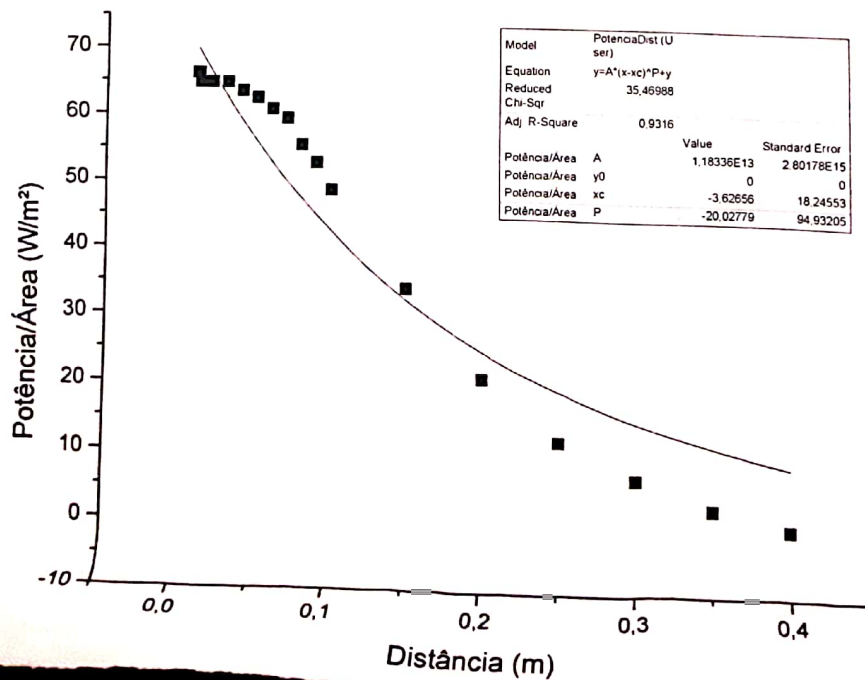


**Etapa 5) Irradiância de uma fonte não pontual**

**Tabela 5:** Referência aos dados coletados no experimento

Distância(cm)	Temperatura(oC)	Tensão no sensor (mV)	Potência por área (W/m <sup>2</sup> )
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

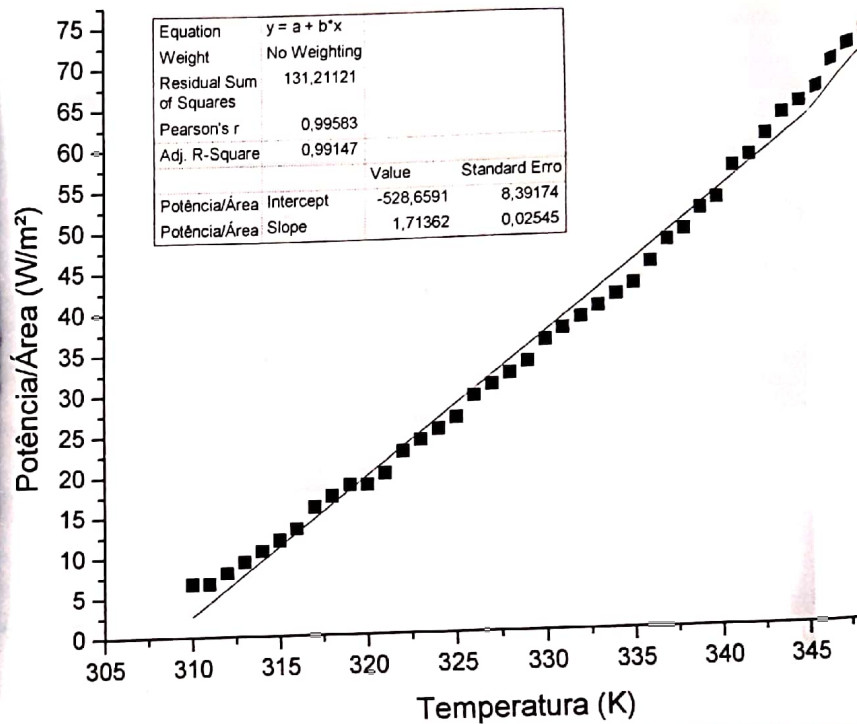
Gráfico 4: Irradiância versus a distância



Etapa 6) Lei de Stefan-Boltzmann para baixas temperaturas  
 Tabela 6: Referente aos dados coletados no experimento

T(C)	Vsensor(mV)	P (W/m <sup>2</sup> )
76	5.1	71.4

Gráfico 5: Irradiação versus temperatura



Etapa 7) Radiação do Corpo humano

Tabela 7: Referente aos dados coletados no experimento

Medições do sensor em mV			
Pessoa	A	B	C
Antebraço	0,4	0,3	0,2
Pescoço	0,5	0,4	0,4
Palma da mão	0,4	0,4	0,1

Tabela 8: Valores obtidos a partir dos dados do tabela 7.

Potência / Área (W/m <sup>2</sup> )			
Pessoa	A	B	C
Antebraço	5,29	4,00	2,65
Pescoço	6,61	5,29	5,29
Palma da mão	5,29	5,29	1,32



## Discussão

Na primeira e segunda etapa do experimento realizou-se o procedimento variando-se a tensão do lâmpada e do sensor para altas temperaturas. Pode-se observar que quanto maior era a temperatura, maior era a irradiação. Assim, realizando-se uma análise gráfica pode-se comprovar a lei de Stefan-Boltzmann para altas temperaturas, pois o gráfico apresentou uma relação exponencial crescente, e que está de acordo com a lei, a qual diz que a intensidade do radiação é proporcional à quarta potência de sua temperatura. Com o fitting realizado no gráfico, obteve-se um expoente  $P = (5,42 \pm 0,54)$  com um erro de 35,5% em relação ao valor esperado ( $P = 4$ ). Ademais, a temperatura foi calculada com o uso do tabelo de referência.

Na terceira etapa fez-se a tensão na lâmpada e variou a distância do sensor à lâmpada. A partir dos dados coletados pode-se observar que para maiores distâncias menor era a irradiação e, com a análise gráfico, observou-se uma exponencial decrescente com  $P = (-2,35 \pm 0,14)$ , e que comprova a lei de inverso do quadrado da distância.

Na quarta etapa mediu-se a irradiação emitida por quatro faces de cores distintas de um cubo. Pode-se observar a validade da lei de Stefan-Boltzmann novamente, porém, os valores de irradiação eram diferentes entre as 4 faces, sendo maior na face preta.

Tópico 13 do Ativo) Explique as diferenças observadas entre as faces. Qual seria a lei física que possa explicar as diferenças e semelhanças observadas nos valores das irradiações?  
A lei física que pode explicar essas diferenças é a

melhancos é a de corpo negro, pois cada face do cubo é diferente, logo são corpos negros imperfeitos, e quais apresentam diferentes absorções e emissões. desde a face preto de maior absorção e liberação de energia e a branca com menor absorção, mas com maior liberação de radiação.

Na quinta etapa analisou a radiação de uma fonte não pontual. Aplicando-se a exponencial quadrática verificou-se que para uma fonte não pontual a lei de inverso do quadrado não é válida; o expoente encontrado com o fitting gráfico foi  $P = (1,20,03) \pm 94,9$ , apresentando um erro de 400% em relação ao esperado ( $P=2$ ).

Na sexta etapa foi analisado a lei de Stefan-Boltzmann para baixas temperaturas. Na coleta dos dados observou-se que com a diminuição da temperatura, a irradiância também diminui. Assim, realizando-se o fitting gráfico comprovou-se a dependência linear, logo, para baixas temperaturas a lei de Stefan-Boltzmann não é válida. Ademais, obteve-se o coeficiente angular que é referente a constante  $\sigma$  com o seguinte valor  $\text{slope} = (1,71 \pm 0,03) 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$  com um erro de 70% em relação ao valor esperado  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ .

Na última etapa mediu-se a irradiância para algumas partes do corpo. Porém o valor encontrado não está coerente com o esperado que é  $75 \text{ W/m}^2$ , pois considerou-se a área de todo o corpo e não de cada membro analisado.

(Tópico 20 de revisão)

(Tópico 21 de revisão) Quando a temperatura de um determinado corpo a ser mensurado está muito próxima a temperatura ambiente é necessário considerar a temperatura ambiente no cálculo. Como seria esta consideração?

A lei de Stefan-Boltzmann relaciona a irradiância com

a quanto potência de temperatura, logo para uma temperatura próxima a do ambiente a diferença entre elas é muito pequena e não influencia no resultado.

Tópico 22 do roteiro) dista em ordem crescente, as faces do cubo que se portam como melhores emissores de radiação.

Bruto  $\approx$  Branco  $>$  Rugosa  $>$  Lisa. A face preto absorve praticamente todos os raios luminosos e não reflete enquanto a face branco reflete mais e absorve menos porém eles emitem quase a mesma radiação. Já a face rugosa pode ocorrer reflexão, o que aumenta a radiação em altas temperaturas. Enquanto na face lisa os raios luminosos são quase todos refletidos, então sua radiação é menor.

Tópico 23 do roteiro) Por que o cubo de radiação térmica apresenta a mesma temperatura para as quatro faces e emite valores diferentes de radiação térmica?

Além disso, as faces possuem cores diferentes. Para as cores escuras, elas atuam como um corpo negro, absorvendo toda a radiação e não refletindo. Enquanto as cores mais claras apresentam diferentes graus de absorção. Ademais, a rugosidade da face interfere na absorção.

Tópico 24 do roteiro) Qual a maior diferença entre a lei de Stefan-Boltzmann para baixas e altas temperaturas? A lei de Stefan-Boltzmann foi baseado em corpos negros, os quais possuem temperaturas elevadas, logo para baixas temperaturas essa lei não é tão precisa.

Tópico 25 do roteiro) A relação  $R = \sigma T^4$  é exata para corpos negros e vale para todos as temperaturas. Por que essa relação não é usado como potência para uma de finit

ção de temperatura?

Porque para baixas temperaturas ele não é tão precisa e na realidade não há corpos negros de acordo com o apresentado na teoria.

Tópico 06 de roteiro) Qual é o comprimento de onda de radiação que o corpo humano emite com maior intensidade?

$T_{\text{corpoh}} = 37^\circ\text{C} = 310,15\text{ K}$ , Pela lei do deslocamento de Wien

$\rightarrow \lambda_{\text{max}} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{310,15}$ ,  $\lambda_{\text{max}} = 9,34 \cdot 10^{-6}\text{ m}$ ; região do infravermelho.

## Conclusões

O experimento permitiu analisar a lei de Stefan-Boltzmann para altas e baixas temperaturas, comprovando sua maior precisão para altas temperaturas. Além disso observou-se que para uma fonte não pontual a lei do inverso do quadrado não é válida.

Adicionalmente quantificou a lei do inverso do quadrado por meio de um ajuste gráfico, verificando que a irradiância cresce com a diminuição da distância. Realizou-se também uma avaliação qualitativa da radiação térmica em um cubo e pode-se observar que para diferentes cores e rugosidades das faces a irradiância de absorção de cada região ser diferente. Por fim, pode-se medir a radiação emitida por um corpo humano, porém considerou-se a área total do corpo e não de cada membro medido, o que gerou uma discrepância nos valores obtidos.

## Referências

- Roteiro experimental