

Relatório 2 - Radiação Térmica

• Resumo

Essa experiência tem por objetivo compreender ~~os~~ a emissão de radiação térmica e para isso utilizamos diferentes corpos e fontes emissores para avaliar o comportamento de emissão dessa radiação, chegando a resultados totalmente plausíveis, considerando teoria e situações reais.

• Introdução

Todo corpo com temperatura maior que o zero absoluto (0 K) emite radiação térmica e também a absorve. Essa radiação é emitida como um espectro contínuo, que em sua maioria não é visível para humanos.

A temperatura, neste caso, é determinante para a forma desse espectro distribuído. Um exemplo acessível são ferros a temperaturas altas que começam a emitir uma luz brilhante, isso significa que o pico de intensidade encontra-se na região do espectro visível.

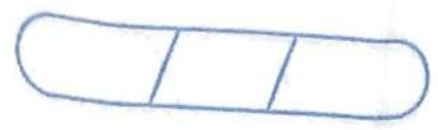
Para os corpos negros, objetos capazes de absorver toda a radiação incidente sem refletir, o espectro de emissão é universal, dependendo da temperatura, sem considerar o material, como mostra a relação a seguir proposta por Josef Stefan:

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

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$$

de forma que R_T é a radiação emitida pelo corpo, σ a constante de Stefan-Boltzmann e T a temperatura do corpo em Kelvin.

Quanto mais próximo o objeto



emissor de radiação for do chamado corpo negro, melhor a lei de Stefan se aplica, ao medir a radiação de uma fonte pontual.

As fontes pontuais emitindo radiação, ao serem medidas, seguem a lei do inverso do quadrado da distância (LID). Ao emitir a energia, o valor é distribuído por área, como mostra a figura a seguir:

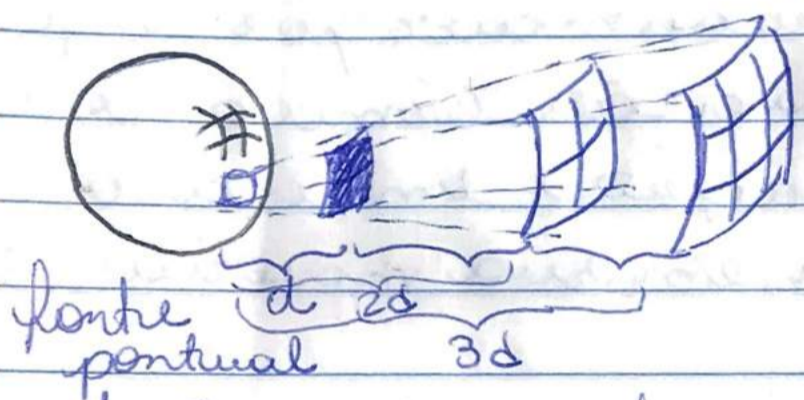



figura 1: ilustração da Lei do Inverso do Quadrado da Distância

A área aumenta com d^2 , sendo d a distância até a fonte, logo a energia é distribuída por áreas cada vez maiores, por isso o nome da lei proposta.

Usando os conceitos apresentados, estudaremos a emissão da radiação térmica com o objetivo de entender os processos de absorção e emissão além da relação da radiação emitida com a temperatura do corpo.

• Materiais e Métodos

Os instrumentos usados para realizar a experiência, junto com os materiais, foram: Sensor de radiação tipo Termopilha (TD-8553) com área de 4mm^2 , volímetro ~~acoplado~~ acoplado ao sensor, cubo de radiação térmica (TD-8554A) potenciômetro Variação, termopar digital, ventilador  de resfriamento, lâmpada de Stefan-Boltzmann

(TD-8555), fonte de alimentação, voltímetros e amperímetros para a fonte, bulbo com escala milimétrica, régua de 50cm e paquímetro.

Para realizar a experiência, ~~se~~ os seguintes procedimentos foram seguidos:

→ posicionamos a lâmpada de Stefan-Boltzmann a uma distância próxima ao sensor de radiação e fixamos suas posições

→ medimos o valor da radiação com o sensor em função da intensidade da lâmpada

→ para determinar a temperatura do filamento da lâmpada usamos a tabela 2 e a resistência medida a temperatura ambiente, para altas variações de temperatura e a relação $T = \frac{R - R_{ref}}{0,0045 R_{ref}} + T_{ref}$ (2) em que R_{ref} e T_{ref}

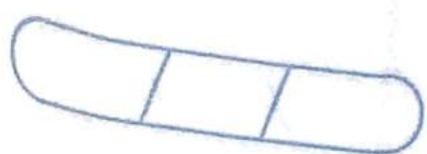
são uma resistência e uma temperatura de referência, neste caso a ~~ambiente~~ condições ambiente

→ para verificar a LQD, consideramos a lâmpada como uma fonte pontual

→ A tensão foi fixada em 10V e medimos a radiação com o sensor a diferentes distâncias, usando o bulbo e a régua na montagem, de 10cm a 30cm

→ para a análise qualitativa, usamos o cubo de radiação térmica

→ medimos a temperatura à condições ambiente e verificamos que todas as faces são irradiadas igualmente, tendo sempre a mesma variação de temperatura, e fixamos o termopar a cima das faces



- aquecemos o cubo usando 10% da potência e medimos a radiação, usando o sensor, para todas as faces
- repetimos o item anterior para outros valores percentuais da potência
- o cubo não consideramos como fonte pontual, e sim de uma face plana.
- escolhemos uma das faces do cubo, e com a potência máxima, usamos o sensor nos bulbos para medir a radiação em diferentes distâncias até que a radiação captada pelo sensor seja nula.
- ainda com o cubo, monitoramos a radiação emitida em função do seu resfriamento
- mantemos o sensor próximo ao cubo, medindo a face em que se encontra o termopar, e monitoramos o sensor para cada variação de 1°C até chegar a uma temperatura próxima de 40°C
- por fim, medimos a radiação emitida pelo corpo humano em diferentes partes do corpo em três indivíduos distintos com o mesmo sensor aplicado em todas as etapas.

Resultados e discussões

Seguindo os enunciados do roteiro desta experiência, os resultados obtidos foram:

- 1) Para converter o valor da Tensão encontrado pelo sensor em W/m^2 , usamos a seguinte relação:
 $R = V/DA$, em que R é a radiação, V é a tensão medida pelo sensor, A é a área do sensor de 4mm^2 e D é uma constante fornecida pelo fabricante, que neste caso vale $18,9 \frac{\text{V}}{\text{W}} \pm 3,8 \frac{\text{V}}{\text{W}}$.

Seguindo a conversão, obtivemos os dados:

| Ponto | Tensão Lâmpada (V) | Tensão Sensor (mV) | Corrente Lâmpada (A) | R (ohms) | R/R _{300K} | 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 1: valores obtidos e calculados para a radiação emitida pela lâmpada

Para obter o valor a grandes variações de temperatura, usamos os valores discriminados na tabela 2 que foi fornecida:

| 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 | | |

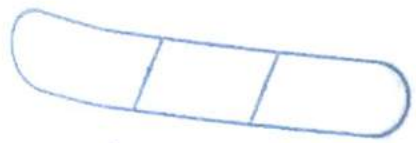
tabela 2: temperatura da lâmpada em função da razão entre resistência e resistência à temperatura ambiente (300K)

2) A fórmula ~~que indica a conversão é:~~ que indica a conversão é:

$$R = \frac{V}{D \cdot A} = \frac{V}{D \cdot 4\text{mm}^2}, \quad D = (10,9 \pm 3,8) \text{ V/W} \quad (3)$$

É a fórmula da propagação de incerteza é:

$$\sigma_R^2 = \left(\frac{\partial R}{\partial V} \sigma_V \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial D} \sigma_D \right)^2 = \left(\frac{1}{D \cdot A} \sigma_V \right)^2 + \left(\frac{-V}{D^2 \cdot A} \sigma_D \right)^2$$



$$= \left(\frac{1}{D R} \sigma_V \right)^2 + \left(\frac{-V}{D^2 A} \sigma_D \right)^2$$

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

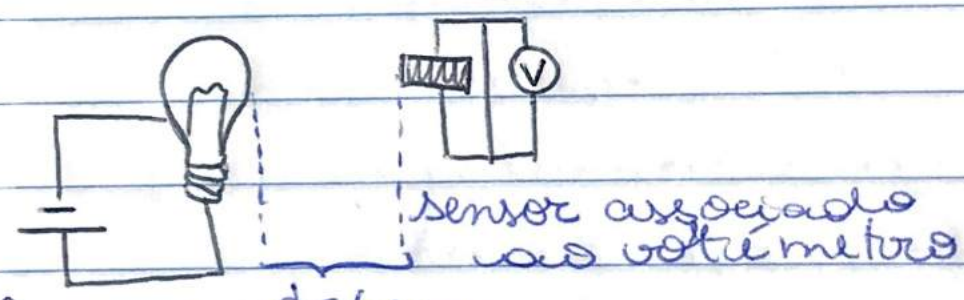
$$= (1,32)^2 + (2659,5 V)^2 \rightarrow \sigma_R = \sqrt{1,32^2 + (2659,5 \cdot V)^2}$$

Substituindo V como $4,2 \text{ mV}$, temos que:

$$\sigma_R = \sqrt{1,32^2 + (2659,5 \cdot 0,0042)^2} = \pm 11,25$$

A radiancia obtida para essa voltagem foi de $55,6 \text{ W/m}^2$, entao podemos dizer que a incertez a associada e de aproximadamente 20% do valor calculado.

3)

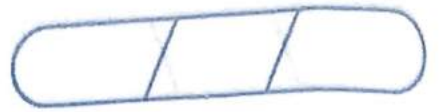


de Stefan-Boltzmann

(fonte controlando tensao e corrente)

4) A temperatura ambiente foi considerada como 27°C (300K) e resistencia do filamento, medido antes de ligar o circuito foi de $0,2 \Omega$

5) Todos os valores obtidos, bem como as conversoes encontram-se na tabela 1.



6) O gráfico a seguir mostra a radiação do filamento calculada em função da temperatura no filamento.

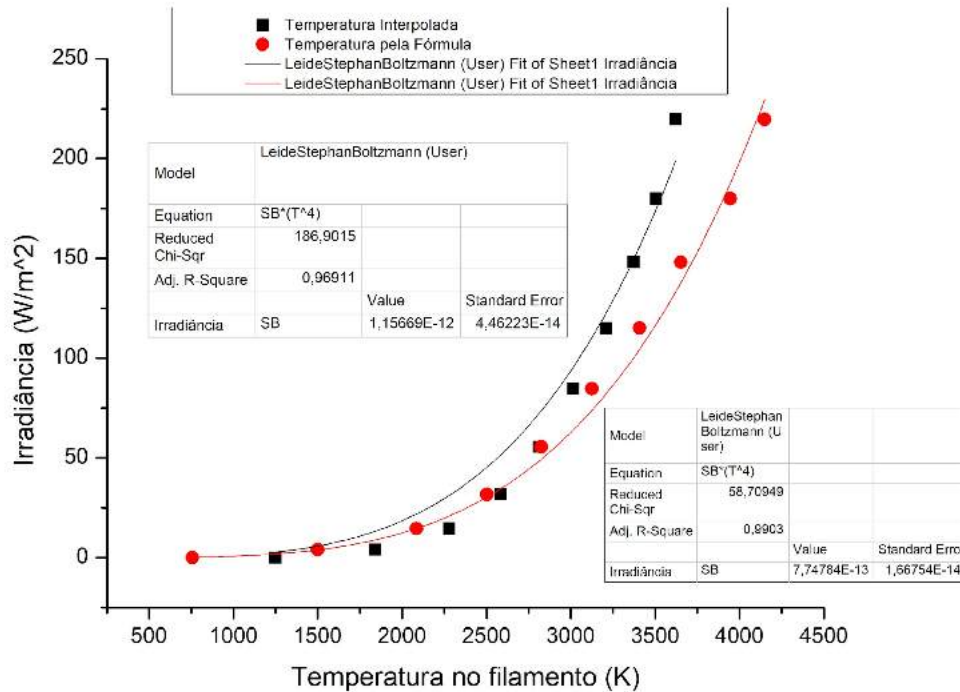
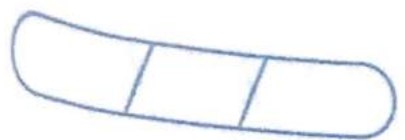


Gráfico 1: Radiação em função da temperatura do filamento obtida pela tabela fornecida (interpolação) e pela fórmula (2).

Vemos do gráfico, que para temperaturas até 3000 K os dois métodos para obter a temperatura são bem próximos, a partir desse valor há certa variação mais notável.

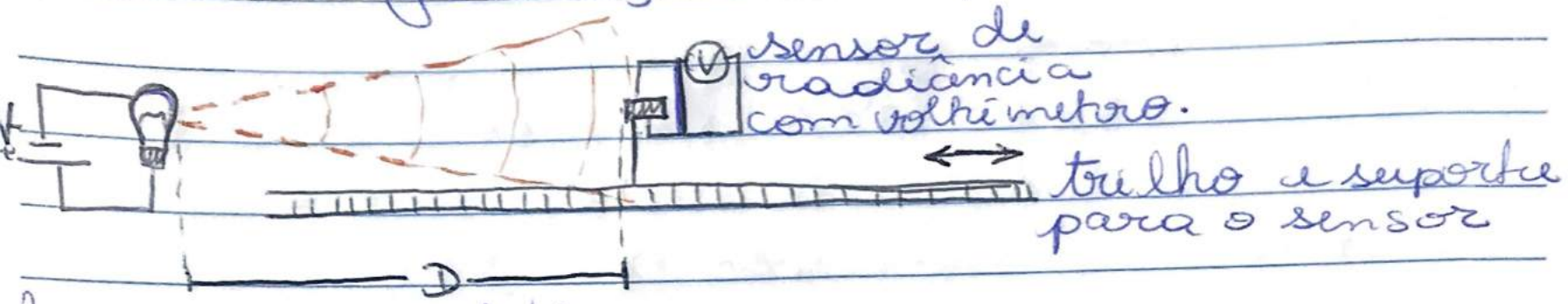
Ajustando ambas as curvas à equação de Stefan (equação 1) percebemos valores bastante divergentes em relação ao esperado para a constante de Stefan - Boltzmann, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$.

Isso pode ser explicado ao comparar o espectro de emissão do filamento a um corpo negro. A diferença dos corpos está na propriedade de absorver toda a radiação incidente, o que é evidente não acontece para o filamento da lâmpada estudada e por se tratar de um caso real sem o uso de objetos simuladores.



7) O diagrama que explica a ocorrência da lei do inverso do quadrado da distância pode ser observado na figura 1.

Para a diagramação do experimento é:



fonte pontual (lâmpada) distância D
entre sensor e fonte

8) Os valores obtidos variando a distância até o sensor encontram-se na tabela a seguir

| 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 |

tabela 3: valores de radiancia detectados pelo sensor em para cada distancia no trilho.

Mais uma vez a relação (3) foi utilizada para converter os valores do sensor em radiancia.

9) A apresentação gráfica desses resultados está no gráfico 2 a seguir.

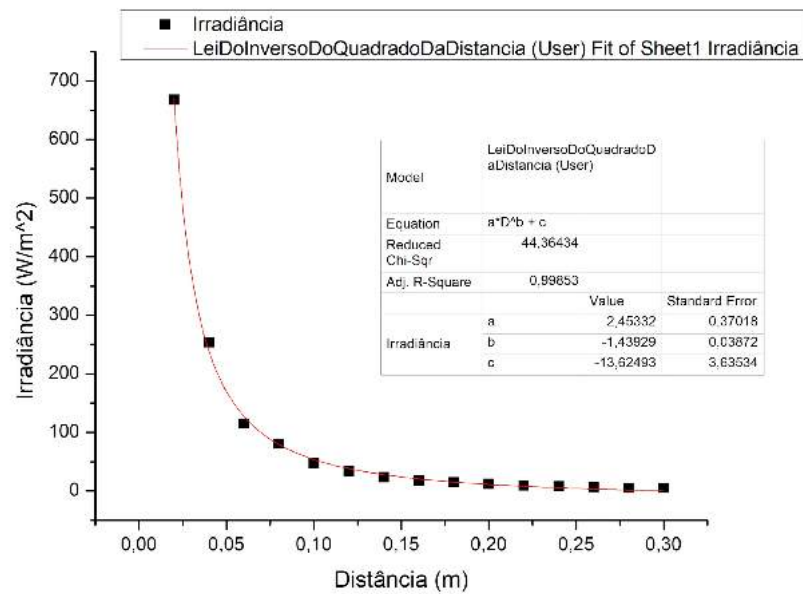


Gráfico 2: valores de radiação em função da distância D até o sensor.

Usando a fórmula $a \cdot D^b + c$, observamos que o fator b , que deveria ser -2 , é apresentado como $-1,44 \pm 0,04$ (adimensional). Como os primeiros valores são extremamente próximos da fonte, a leitura muito alta pode atrapalhar na variação da radiação e na aplicação da LID. Apresentando apenas valores de distâncias maiores, ou seja, excluindo os valores mais próximos, obtivemos o gráfico 3 a seguir:

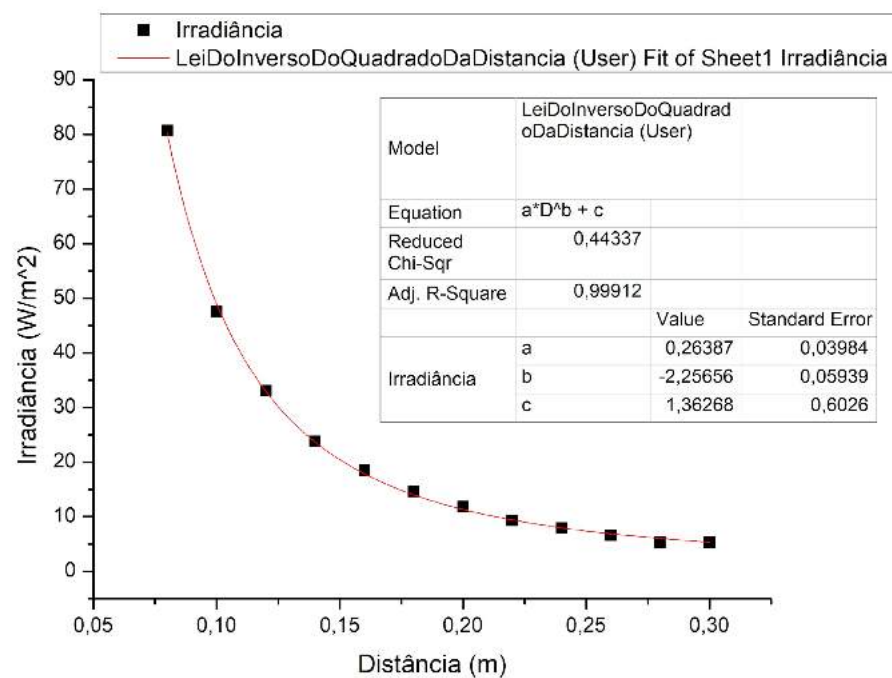


Gráfico 3: mesmos valores do gráfico 2 com exclusão dos pontos de distâncias menores



Neste caso, obtemos um valor mais próximo do esperado: $b = -2,25 \pm 0,06$ (adimensional), mostrando que a lei é melhor observada em distâncias maiores ~~o~~ com isso pode ser explicado pelo fato de que a fonte usada não é de fato pontual, portanto, a distâncias maiores, é possível considerar o filamento suficientemente pequeno para que a lei seja observada.

10) A temperatura das 4 faces do cubo ~~era~~ foram medidas com o termopar apresentando o mesmo valor à temperatura ambiente de 26°C .

11) Ao aquecer o cubo com 50% da potência foi verificado que todas as faces apresentaram a mesma temperatura, não havendo a necessidade de obter uma temperatura para cada face, mas sim uma temperatura única para cada potência.

12) Os valores obtidos para cada potência ~~em~~ estão indicados na tabela a seguir:

| Porcentagem da potência | Temperatura ($^\circ\text{C}$) | 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: valores de temperatura e tensão e radiação obtidos para cada face em cada porcentagem da potência.



13) O gráfico a seguir apresenta os valores de radiação em função da temperatura para as quatro faces.

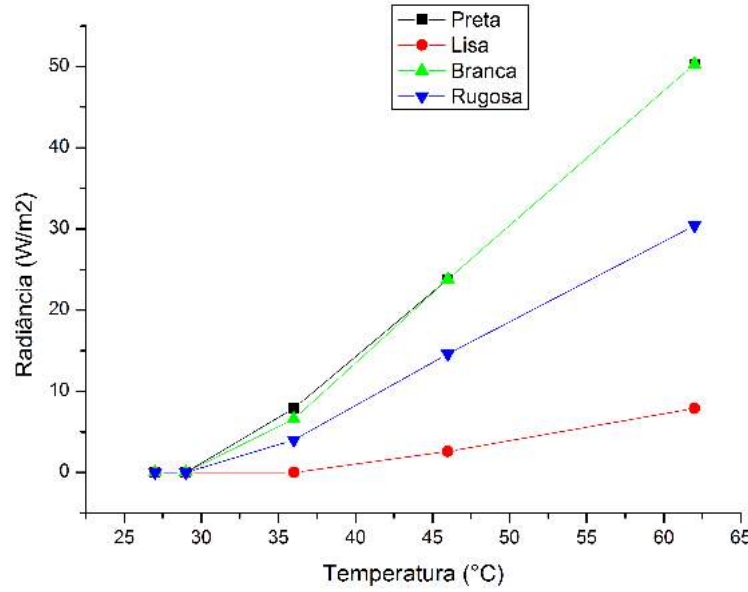



Gráfico 4: Radiação em função da temperatura nas faces do cubo.


14) As faces preta e branca apresentam radiações muito próximas, o que condiz com a teoria pois a cor do corpo negro não deve influenciar na radiação. A segunda maior radiação em função da temperatura é a face rugosa e a menor a da face lisa. A face rugosa ter radiação maior que a face lisa pode ser explicada em função da superfície de contato total, ou seja, para uma mesma área que é a face do cubo, a rugosidade resulta em uma maior superfície em relação à face lisa, permitindo que haja uma maior emissão. O fato da superfície rugosa ter radiação menor que as faces branca e preta, no entanto, ~~podem ser explicadas por~~ ~~alguns~~ ~~motivos~~ ~~claros~~ ~~pois~~ e uma possibilidade é o uso de um 

material diferente para gerar essas características, o que pode acarretar na perda de energia ϕ de radiação por algum efeito atenuante ~~disper~~

15) Espera-se que haja uma diminuição no valor ~~de~~ de radiação em função do aumento da distância, mas esse ~~decai~~ diminuição não seria em função do quadrado da distância pois a fonte não é pontual. Apesar da área compreendida pelo sensor ~~se~~ se comportar da mesma forma ~~flutu~~ que indicado pela figura 1, há influência da radiação emitida pelos pontos ao redor ~~da~~ da área normal captada pelo sensor, fazendo ~~q~~ com que mais radiações seja captada, em relação ~~à~~ a fonte pontual.

16) Os valores obtidos para uma das faces do cubo em cada distância estão dispostos na tabela 5 a seguir:

| 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 |

tabela 5: valores de radiação para uma fonte  não pontual.

17) Dependendo os dados da tabela anterior em um gráfico, obtemos:

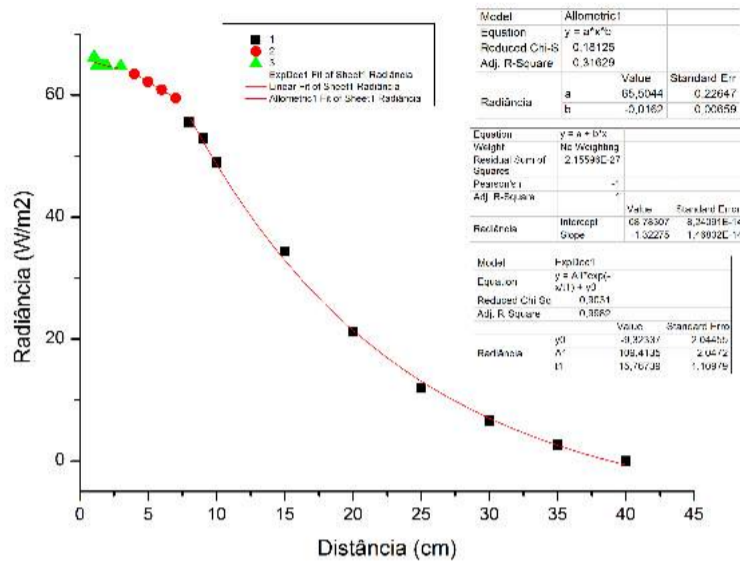


gráfico 5: valores de radiação para uma fonte não pontual em função da distância do sensor. No caso da fonte ser uma placa, o comportamento diverge bastante da LID e foi dividido em algumas regiões, apresentando comportamentos diferentes para regiões de baixas, médias e maiores distâncias, sendo esses comportamentos alométricos, linear e exponencial decrescente.

18) Observando o comportamento da radiação em função da temperatura do cubo em seu resfriamento, o comportamento é dado a seguir pelo gráfico 6:

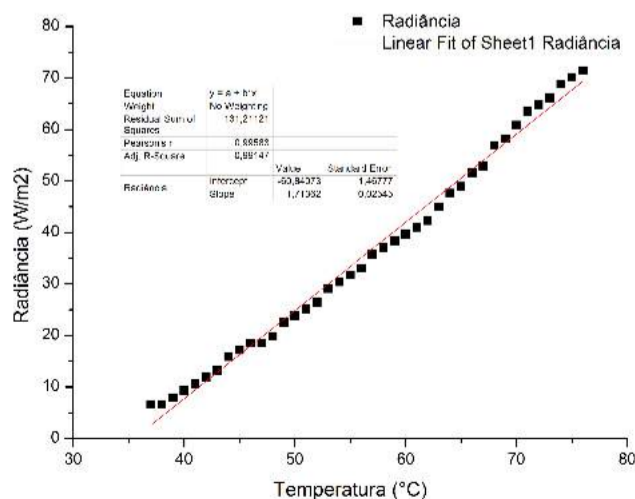


gráfico 6: radiação do cubo em função da temperatura.





O comportamento percebido é próximo ao do linear, e podemos concluir que a lei de Stefan-Boltzmann não se aplica para este caso de baixas temperaturas. Entretanto, percebemos também que além de baixas temperaturas, observamos intervalos muito pequenos (1°C), o que faz que a variação, mesmo seguindo a lei para corpos negros, se aproxime de uma reta.

19) Usando a relação 3 juntamente com o sensor medimos os valores de radiação do corpo humano de 3 indivíduos em 3 diferentes regiões:

| Parte do Corpo / Medidas | Sensor em A (mV) | Radiância A (W/m^2) | Sensor em B (mV) | Radiância B (W/m^2) | Sensor em C (mV) | Radiância C (W/m^2) |
|--------------------------|------------------|---------------------------------------|------------------|---------------------------------------|------------------|---------------------------------------|
| Antebraco | 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 6: Valores de tensão e radiação de cada indivíduo (A, B e C) em cada parte do corpo escolhida.

20) De acordo com os valores da literatura, os valores medidos pelo sensor não estão coerentes, mesmo considerando a incerteza de aproximadamente 20%, como vemos a tabela a seguir, que contém a ^{potência} radiação total do corpo, calculada a partir dos valores medidos

| Parte do Corpo / Potência | Potência A | Potência B | Potência C |
|---------------------------|-------------|------------|------------|
| Antebraco | 6,349206349 | 4,76190476 | 3,1746032 |
| Pescoço | 7,936507937 | 6,34920635 | 6,3492063 |
| Palma da mão | 6,349206349 | 6,34920635 | 1,5873016 |
| Média da potência | 6,878306878 | 5,82010582 | 3,7037037 |



tabela 7: Valores calculados para a potência do corpo humano em cada indivíduo.

Má uma enorme diferença entre os valores calculados e medidos, que pode ser explicada pto a partir da escolha das regiões medidas, que são periféricas e de fato emitem uma intensidade de radiação térmica menor que regiões centrais.

21) Essa consideração deve estar atrelada aos coeficientes de emissão e absorção da radiação, pois segundo o físico russo Kirchoff, a emissividade espectral e a absorvância espectral são iguais, e a absorvância é diretamente ligada à temperatura ambiente.

22) Em ordem crescente, ~~pa~~ do pior para o melhor emissor, as faces do cubo são: lisa, rugosa, branca e preta. Como foi dito no item 14, a face rugosa possui uma maior superfície de contato, portanto é capaz de absorver mais radiação e por consequência, emitir mais radiação que a face lisa. Já as cores diferentes possuem capacidade de emissão muito similares, possivelmente por conta do espectro de emissão da luz não ser significativo ~~comparado~~ quando comparamos a região visível com o todo, fazendo com que as diferenças entre absorção da cor preta e cor branca seja mínima e ~~quase~~ imperceptível no todo em quase todos os pontos coletados.

23) A temperatura é a mesma nas quatro faces devido ao equilíbrio térmico do sistema criado, e a emissão ~~tem a ver~~ está relacionada a capacidade de absorver e emitir radiação, que está mais relacionada a superfície e características que permitem a absorção.

24) Para altas temperaturas a relação com T^4 é melhor ~~absorvada~~ observada, enquanto que a baixas temperatura o comportamento é próximo do linear por questões da escala usada, com variações mínimas a baixas temperaturas.

25) Porque no mundo real e cotidiano, há poucos materiais próximos do corpo negro, logo, não seria exata e absoluta o suficiente para basear uma escala de temperatura.

26) O corpo humano emite comprimento de onda na ~~o~~ região do infravermelho com maior intensidade, ou seja, $\lambda_{\text{máx}} > 750 \text{ nm}$

• Conclusão

Após diversas análises e discussões de diferentes experimentos para avaliar a radiação térmica, podemos concluir que o objetivo dessa experiência foi cumprido, ao avaliar as formas distintas de comportamento da radiação térmica, além da comparação com o corpo negro em todas as etapas.

• Referências

- Eisberg e Resnick, "Física Quântica"
- Apostila de roteiros - Experimentos de Física Moderna (2016)