

RADIAÇÃO TÉRMICA

Material Utilizado:

- um fonte regulada de potência CC (3 A, 12 V)
- um cubo de radiação térmica (cubo de Leslie) com quatro superfícies emissoras (preta, branca, alumínio polido e alumínio fosco) (PASCO TD-8554A)
- uma lâmpada de Stefan-Boltzmann (PASCO TD-8553)
- um sensor de radiação (PASCO TD-8555)
- um milivoltímetro CC (0 - 200 mV)
- um voltímetro CC (0 - 20 V)
- um amperímetro CC (0 - 10 A)
- um ohmímetro (1 M Ω)
- um termômetro (0 - 50 °C)
- um conjunto de placas de materiais diversos: vidro, acrílico, madeira, papelão, etc

Objetivo do Experimento: Investigar qualitativamente a emissão, absorção e transmissão da radiação térmica por diferentes corpos. Investigar a dependência da intensidade da radiação emitida por um filamento incandescente com a temperatura.

INTRODUÇÃO

É um resultado bem conhecido que todos os corpos estão continuamente emitindo radiação (onda) eletromagnética. Em última análise esta emissão de radiação pode ser atribuída à aceleração de suas cargas elétricas. Radiação eletromagnética inclui raios gama, raios X, radiação ultravioleta, luz visível, radiação infravermelha, microondas, radar, ondas de rádio, etc. A radiação eletromagnética pode ser produzida de diversas formas, dependendo do tipo de partícula carregada envolvida no processo. Como exemplo, raios gama são produzidos por fissão de núcleos ou por desintegração radioativa, raios X por bombardeio de metais com elétrons de alta energia, ondas de rádio por fluxo de corrente alternada através de condutores. Parte da radiação eletromagnética emitida por uma substância origina-se do movimentos rotacional e vibracional de seus átomos e moléculas. Como os níveis de energia associados a esses movimentos podem ser termicamente excitados, a radiação emitida resultante é denominada *radiação térmica*. Em outras palavras, a radiação térmica emitida por uma substância representa a conversão de sua energia térmica interna em energia eletromagnética. O espectro de comprimentos de onda da radiação térmica se estende essencialmente de 0,1 a 100 μm , o que inclui o ultravioleta (0,1 a 0,38 μm), o visível (0,38 a 0,76 μm) e o infravermelho (0,76 a 100 μm). A emissão de radiação térmica por um corpo concorre para o decréscimo de sua temperatura da mesma forma que o recebimento de energia radiante do ambiente concorre para um aumento de sua temperatura, de modo que se estabelece uma tendência de equilíbrio térmico entre o corpo e o ambiente.

A taxa de emissão de radiação térmica por um corpo depende da temperatura T de sua superfície, da natureza desta e do comprimento de onda λ da radiação. Para caracterizar esta taxa de emissão, define-se a *intensidade total emissiva* I_T como a energia radiante total (isto é, considerando todos os comprimentos de onda) emitida por unidade de tempo por unidade de área. Quando uma radiação incide sobre um corpo, parte é absorvida pelo mesmo, parte é transmitida e alguma é refletida. A fração da energia radiante incidente total que é absorvida é definida como *absortividade total* a . A absortividade difere amplamente entre as substâncias. Algumas substâncias, como a fuligem e o asfalto, têm absortividades muito próximas da unidade, isto é, praticamente absorvem toda a radiação que nelas incide. Um corpo que absorve toda a radiação incidente ($a = 1$) é denominado de *corpo negro*. Embora algumas superfícies e configurações geométricas concorram para resultar em corpos com absortividade próxima da unidade, um corpo negro perfeito não existe. É um importante resultado que *um bom absorvedor de radiação é também um bom emissor e vice-versa* (lei de Kirchoff), o que pode ser facilmente demonstrado experimentalmente. Este resultado é esperado, uma vez que, para que um corpo atinja um equilíbrio térmico é necessário que ele emita a mesma quantidade de radiação que recebe. Superfícies negras são (geralmente) mais absorvedoras que superfícies brancas e superfícies ásperas são mais absorvedoras que superfícies polidas. Consequentemente, esperamos que superfícies negras e ásperas sejam melhor emissoras que superfícies brancas e polidas, respectivamente. É preciso destacar, entretanto, que o olho humano, que é um indicador muito bom de radiação térmica refletida no intervalo visível do espectro, não é um sensor de radiação absolutamente confiável, devido à sua insensibilidade à reflexão de radiação térmica com comprimento de onda fora desse intervalo. Apenas ocorre que superfícies que parecem negras do ponto de vista de cor são geralmente também boas absorvedoras de radiação térmica fora do intervalo visível. Entretanto, certas substâncias, que seriam avaliadas pelo olho humano como mau absorvedoras de radiação térmica (devido à sua cor branca) demonstram-se absorvedoras muito boas de radiação em certos intervalos do espectro eletromagnético.

Foi primeiramente sugerido por Stefan (1879) e posteriormente predito teoricamente por Boltzmann que a intensidade total emissiva I_{TN} de um corpo negro é proporcional à quarta potência de sua temperatura absoluta. Esta lei, conhecida como a “lei de Stefan-Boltzmann” pode ser escrita como

$$I_{TN} = \sigma T^4, \quad (1)$$

onde $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W / m}^2 \text{ }^\circ\text{K}^4$ é uma constante universal (a “constante de Stefan-Boltzmann”).

A relação entre a intensidade total emissiva de um corpo qualquer e sua absortividade total pode ser deduzida ao longo da seguinte argumentação. Considere dois corpos, um dos quais um corpo negro, no interior de uma caixa cujas paredes internas estão a uma temperatura T , e suponhamos que esses corpos estejam também à temperatura T , de forma que há um equilíbrio térmico entre os corpos e entre estes e o ambiente. A intensidade de radiação incidente I sobre os dois corpos é a mesma. Para o corpo negro, a intensidade de radiação absorvida é, por definição, igual a I e a intensidade de radiação emitida é I_{TN} . Como o corpo negro encontra-se em equilíbrio térmico com o outro corpo e as paredes da caixa, tem-se $I = I_{TN}$. Para o outro corpo, a intensidade de radiação absorvida é igual a aI , enquanto que a intensidade de radiação

emitida é I_T . Novamente, como o corpo encontra-se também em equilíbrio térmico com o corpo negro e com as paredes da caixa, tem-se $aI = I_T$. Consequentemente obtém-se

$$I_T = a I_{TN}, \quad (2)$$

isto é, *a intensidade total emissiva de um corpo a qualquer temperatura é uma fração, igual à absortividade total do corpo, da intensidade total emissiva do corpo negro nesta temperatura.*

A *emissividade total* e de um corpo a uma certa temperatura é definido como a razão entre sua intensidade total emissiva e a intensidade total emissiva de um corpo negro na mesma temperatura, ou seja

$$I_T = e I_{TN} = e \sigma T^4. \quad (3)$$

A igualdade entre a absortividade total a e a emissividade total e , obtida comparando-se as relações (2) e (3) é um teorema devido a Kirchoff (1895). Este resultado, independente de qualquer hipótese particular sobre os processos de emissão e absorção, decorre de um argumento termodinâmico, considerando a troca de energia térmica entre superfícies de naturezas diferentes, em equilíbrio térmico.

Para discutir o papel do comprimento na radiação térmica emitida por uma superfície, introduz-se a *intensidade emissiva monocromática* I_λ , definida como a intensidade total emissiva por unidade de comprimento de onda, ou seja

$$I_\lambda = \frac{dI_{0 \rightarrow \lambda}}{d\lambda},$$

onde $I_{0 \rightarrow \lambda}$ é a intensidade emissiva no intervalo de comprimentos de onda compreendido entre 0 e λ . Desta definição segue que a intensidade total emissiva de uma superfície é dada por

$$I_T = I_{0 \rightarrow \infty} = \int_0^\infty I_\lambda' d\lambda'. \quad (4)$$

A intensidade emissiva monocromática I_λ depende da superfície, e é também uma função do comprimento de onda e da temperatura. Para um corpo negro, a teoria quântica estabelece que sua intensidade emissiva monocromática $I_{\lambda N}$ é dada por

$$I_{\lambda N} = \frac{8 \pi h c^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{h c}{k_B \lambda T}} - 1}, \quad (5)$$

onde c é a velocidade da luz, k_B é a constante de Boltzmann e h é a constante de Planck. Este resultado, deduzido por Max Planck, foi inteiramente confirmado pela experiência e é uma das descobertas fundamentais da Física Moderna. Sendo a teoria de Planck para o corpo negro baseada na quantização

da energia da radiação eletromagnética (o conceito de que um campo eletromagnético de frequência ν pode ceder ou receber energia apenas em valores discretos $E = h\nu$ – onde h é a constante de Planck), ela é historicamente um dos desenvolvimentos mais importantes no estabelecimento da Física Quântica. Com base na relação (5) é fácil perceber que, para cada temperatura, $I_{\lambda N}$ é uma função suave de λ , crescendo com λ a partir de zero até atingir um pico, e então decrescendo novamente a zero. É importante destacar que a lei de Stefan-Boltzmann (1) pode ser formalmente deduzida a partir da teoria de Planck (5) e da definição (4).

Define-se *emissividade monocromática* e_{λ} de uma superfície qualquer a uma dada temperatura como a razão entre sua intensidade emissiva monocromática e a intensidade emissiva monocromática da superfície de um corpo negro na mesma temperatura. (consequentemente, por definição, a emissividade monocromática de um corpo negro é igual à unidade para qualquer valor do comprimento de onda). Considerando uma superfície real (isto é, que não a de um corpo negro), sua emissividade monocromática apresenta uma dependência característica e distinta com o comprimento de onda, sendo sempre inferior à unidade em todo o espectro eletromagnético. Uma outra idealização no contexto da discussão da radiação térmica é a de um *corpo cinza*, isto é, um corpo para o qual a emissividade monocromática é inferior à unidade mas independente do comprimento de onda em todo o espectro eletromagnético. Certas superfícies podem apresentar um comportamento aproximado de um corpo cinza em certa faixa do espectro, como, por exemplo, o cobre polido para comprimentos de onda superiores a $2 \mu\text{m}$. Como um corpo negro, um corpo cinza também apresenta uma intensidade emissiva total proporcional à quarta potência da temperatura absoluta. Isto pode ser facilmente compreendido tendo em mente a relação (4) e que a intensidade emissiva monocromática I_{λ} de um corpo cinza é igual à de um corpo negro, $I_{\lambda N}$, a menos de uma constante de proporcionalidade (independente do comprimento de onda).

Este experimento consistirá de duas partes.

Na primeira parte compararemos as emissividades totais de algumas superfícies (negra, branca, alumínio polido e alumínio fosco) em temperaturas diversas, e também investigaremos as propriedades de absorção e transmissão de certas substâncias.

Na segunda parte do experimento determinaremos a dependência da intensidade emissiva total de um filamento (de tungstênio) incandescente com a temperatura e, consequentemente, verificaremos o quanto um tal filamento se aproxima de um corpo cinza. Para conseguir isto, o método utilizado é simples e consiste no seguinte. Ao aplicar uma força eletromotriz ao filamento incandescente de uma lâmpada, este se aquece até uma dada temperatura. A radiação emitida pelo filamento é medido por um sensor de radiação. Como a temperatura do filamento depende da força eletromotriz aplicada ao mesmo, fazendo variar esta f.e.m., consegue-se submeter o filamento a temperaturas diferentes. A temperatura do filamento é calculada a partir da medida da razão entre sua resistência na temperatura em questão e sua resistência a $300 \text{ }^{\circ}\text{K}$ e de uma curva de calibração “Resistência versus Temperatura” do material de que é feito. Para cada f.e.m. selecionada são registrados a temperatura do filamento e a intensidade de radiação fornecida pelo sensor, obtendo-se desta forma a dependência da intensidade da radiação emitida pelo filamento com a temperatura.

Para medir a intensidade emissiva total, faz-se uso de um sensor de radiação. Este sensor consiste de uma termopilha (uma associação em série de pequenos termopares). Se as potências de radiação medidas forem suficientemente baixas (como geralmente é o caso quando se usa uma termopilha), a força eletromotriz

termoelétrica resultante desenvolvida na termopilha será, com boa aproximação, proporcional à diferença de intensidade entre as radiações incidente e emitida pela mesma. A resposta espectral da termopilha é essencialmente um plateau na região do infravermelho (de 0,5 a 40 μm) e as forças eletromotrizes desenvolvidas encontram-se na faixa de microvolts até aproximadamente 100 milivolts.

Consideremos agora a utilização do sensor de radiação na medição da intensidade emissiva total de um corpo cinza. Se a termopilha se encontrasse à temperatura de zero absoluto, a dependência da força eletromotriz termoelétrica U_{termo} gerada na mesma com a temperatura absoluta T do filamento seria teoricamente dada por $U_{\text{termo}} \sim T^4$. (desde que o filamento comporte-se como um “corpo cinza”). Entretanto, a termopilha encontra-se à temperatura ambiente T_A e portanto emite radiação, de tal forma que a dependência esperada é $U_{\text{termo}} \sim (T^4 - T_A^4)$.

PROCEDIMENTO

Parte A - Radiação Térmica - Estudo Qualitativo

Observações: Antes do iniciar a aula de laboratório, é recomendável preaquecer o cubo de radiação por vinte minutos no nível de potência 5,0. Ao usar o sensor de radiação, sempre mantenha-o blindado do objeto quente, exceto durante os poucos segundos necessários para efetuar a medição. Isto evita aquecer a termopilha, o que causaria uma mudança na temperatura de referência e uma consequente alteração na medida de temperatura.

Estudo Comparativo da Radiação Térmica Emitida por Diferentes Superfícies

1. Conecte o o cubo de radiação à rede com sua chave articulada desligada e o potenciômetro de nível de potência na posição de mínimo (LOW).
2. Conecte o ohmímetro aos terminais banana do termistor na base do cubo de radiação. Selecione um fundo de escala apropriado para o ohmímetro (veja para tanto a tabela “Resistência versus Temperatura” para o termistor do cubo de radiação).
3. Ligue o cubo de radiação e ajuste o nível de potência para o valor máximo (HIGH).
4. Acompanhe a medida fornecida pelo ohmímetro. Quando ela decrescer a menos de 40 $\text{k}\Omega$ ajuste o nível de potência para o valor 5,0. (Se o cubo de radiação tiver sido previamente aquecido, simplesmente mantenha o nível de potência em 5,0.)
5. Espere o cubo atingir o equilíbrio térmico (isto terá ocorrido quando a medida fornecida pelo ohmímetro estiver flutuando em torno de um valor aproximadamente fixo). Meça então a intensidade de radiação emitida por cada uma das quatro superfícies emissoras do cubo. Para tanto, posicione o sensor de

radiação de tal forma que os pinos em sua extremidade fiquem em contato com a superfície do cubo (isto garante que a distância de medição é a mesma para todas as superfícies). Registre os valores obtidos na tabela da folha de resultados. Também meça e registre a resistência R_T do termistor.

6. Também meça e registre as intensidades de radiação (emitida por cada uma das superfícies do cubo) para os níveis de potência 6,5, 8,0 e máximo (HIGH), colocando o potenciômetro sucessivamente nas posições correspondentes. Em cada situação espere o cubo atingir o equilíbrio térmico.
7. Fazendo uso da Tabela 1- “Temperatura versus Resistência” para o termistor, complete a tabela da folha de resultados, calculando a temperatura das superfícies emissoras.
8. Faça uso do sensor de radiação para medir e registrar as intensidades relativas da radiação emitida por vários objetos no laboratório.
9. Com base nos resultados obtidos acima, considere classificar as diferentes superfícies em ordem de emissividade. É esta ordem independente da temperatura?

Absorção e Transmissão da Radiação Térmica

10. Coloque o sensor de radiação a aproximadamente 5 cm da superfície preta do cubo de radiação e registre a intensidade medida. Insira uma placa de vidro (de janela) entre a superfície do cubo e o sensor. O vidro bloqueia de forma eficaz a radiação térmica?
11. Repita a operação do item anterior com outros materiais como plástico, acrílico, madeira, etc. Qual dos materiais investigados se revelou mais eficaz na blindagem da radiação térmica?

FOLHA DE DADOS E RESULTADOS

Experimento: Radiação Térmica

Data ____ / ____ / ____

COMPONENTES DO GRUPO

NOME _____

NOME _____

NOME _____

NOME _____

RADIAÇÃO TÉRMICA - INVESTIGAÇÃO QUALITATIVA

Cubo de Radiação: Intensidades de Radiação Emitida Por Diferentes Superfícies

	Nível de Potência	5,0	6,5	8,0	10,0
	R_T (k Ω)				
T (° C)					
	Indicação do Sensor (mV)				
SUPERFÍCIE	Preta				
	Branca				
	Alumínio Polido				
	Alumínio Fosco				

Estudo Comparativo da Intensidade de Radiação Emitida por Diferentes Objetos

OBJETO	INDICAÇÃO DO SENSOR (mV)

Tabela 1 - Temperatura T ($^{\circ}$ C) versus Resistência R (Ω) para o Termistor do Cubo de Radiação

R (Ω)	T ($^{\circ}$ C)	R (Ω)	T ($^{\circ}$ C)	R (Ω)	T ($^{\circ}$ C)	R (Ω)	T ($^{\circ}$ C)
207.850	10	44.917	43	12.479	76	4.209,1	109
197.560	11	43.062	44	12.043	77	4.082,9	110
187.840	12	41.292	45	11.625	78	3.961,1	111
178.650	13	39.605	46	11.223	79	3.843,4	112
169.950	14	37.995	47	10.837	80	3.729,7	113
161.730	15	36.458	48	10.467	81	3.619,8	114
153.950	16	34.991	49	10.110	82	3.513,6	115
146.580	17	33.591	50	9.767,2	83	3.411,0	116
139.610	18	32.253	51	9.437,7	84	3.311,8	117
133.000	19	30.976	52	9.120,8	85	3.215,8	118
126.740	20	29.756	53	8.816,0	86	3.123,0	119
120.810	21	28.590	54	8.522,7	87	3.033,3	120
115.190	22	27.475	55	8.240,6	88	2.946,5	121
109.850	23	26.409	56	7.969,1	89	2.862,5	122
104.800	24	25.390	57	7.707,7	90	2.781,3	123
100.000	25	24.415	58	7.456,2	91	2.702,7	124
95.447	26	23.483	59	7.214,0	92	2.626,6	125
91.126	27	22.590	60	6.980,6	93	2.553,0	126
87.022	28	21.736	61	6.755,9	94	2.481,7	127
83.124	29	20.919	62	6.539,4	95	2.412,6	128
79.422	30	20.136	63	6.330,8	96	2.345,8	129
75.903	31	19.386	64	6.129,8	97	2.281,0	130
72.560	32	18.668	65	5.936,1	98	2.218,3	131
69.380	33	17.980	66	5.749,3	99	2.157,6	132
66.356	34	17.321	67	5.569,3	100	2.098,7	133
63.480	35	16.689	68	5.395,6	101	2.041,7	134
60.743	36	16.083	69	5.228,1	102	1.986,4	135
58.138	37	15.502	70	5.066,6	103	1.932,8	136
55.658	38	14.945	71	4.910,7	104	1.880,9	137
53.297	39	14.410	72	4.760,3	105	1.830,5	138
51.048	40	13.897	73	4.615,1	106	1.781,7	139
48.905	41	13.405	74	4.475,0	107	1.734,3	140
46.863	42	12.932	75	4.339,7	108	1.688,4	141