

PRÀCTICA 11

RADIACIÓ TÈRMICA

OBJECTIUS

Determinació de la densitat de flux de radiació procedent de superfícies distintes i estimació de les seues emissivitats. Determinació de la transmisivitat (radiació transmesa) d'un vidre a diferents longituds d'ona. Comprovació de la llei de Stefan-Boltzmann.

MATERIAL NECESSARI

Sensor de radiació	Amperímetre
Llamp de Stefan-Boltzmann	Òhmetre
Cub de Leslie	Font d'alimentació
Pantalla opaca	Cables de connexions
Làmina de vidre	

INTRODUCCIÓ TEÒRICA

Al conjunt de radiació electromagnètica emesa per un cos, a temperatura superior al zero absolut, se li denomina *radiació tèrmica*, independentment de si el cos està en equilibri termodinàmic o no. A temperatures ordinàries, per baix d'uns 600 °C, la radiació tèrmica emesa per un cos negre (emisor perfecte) no és visible perquè l'energia radiada presenta una distribució espectral que es concentra a la regió infraroja de l'espectre electromagnètic (Fig. 1). A mesura que es va escalfant el cos, la distribució anterior es desplaça cap a longituds d'ona més curtes. Entre 600 i 700°C, s'emet ja prou quantitat d'energia a l'espectre visible perquè el cos brille amb un color roig fosc. A temperatures encara més elevades, es fa roig brillant i fins i tot «roig blanc» (com el filament del llamp).

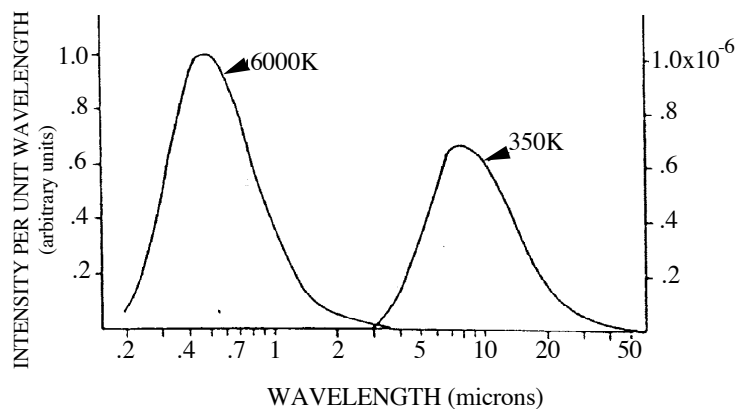


Figura 1. Distribució espectral de la radiació d'un cos negre a 6000 K i 350 K.

La llei de Planck justifica la distribució espectral de la radiació emesa per un cos negre. De la mateixa es dedueixen dos corolaris: (i) la llei de Wien ($\lambda_{\max} T = \text{const}$), que estableix que la longitud d'ona a la que s'assoleix la màxima emissió disminueix a mesura que augmenta la temperatura, i (ii) la llei de Stefan-Boltzmann, que estableix que la densitat d'energia emesa per unitat de temps (densitat de flux) J_n és proporcional a la quarta potència de la temperatura del cos,

$$J_n = \sigma T^4 \quad (2)$$

sent $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ la constant de Stefan-Boltzmann. En el cas de un cos *no negre*, el ritme al qual s'emet la energia radiant depèn de la temperatura i de la naturalesa de la seua superfície, de forma que la densitat d'energia emesa per unitat de temps és

$$J = \varepsilon \sigma T^4, \quad (1)$$

sent ε una característica de la superfície que denominem emisivitat i que està relacionada amb la naturalesa de la superfície, la seua textura, etc. El valor màxim de l'emisivitat és 1 i correspon al cos negre.

Per altra banda, quan la radiació incideix sobre una superfície, part de la mateixa es reflectja (J_r), part es transmet (J_t), i part s'absorbeix (J_a). La relació entre cada una d'estes tres densitats de flux i la densitat de flux incident (J_i) es denomina reflectivitat, transmissivitat i absortivitat, respectivament. Al igual que l'emisivitat definida previament, totes estes característiques òptiques són funció de la longitud d'ona. En esta pràctica es determinarà la transmissivitat $\tau = J_t/J_i$ d'una làmina de vidre en dues regions espectrals diferents, ona curta i ona llarga.

PROCEDIMENT EXPERIMENTAL

Descripció del material



Figura 2. Sensor de radiació.

PRECAUCIÓ:
EL CUB POT
ESTAR MOLT
CALENT

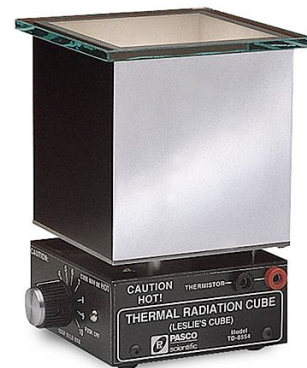


Figura 3. Cub de Leslie.

El sensor de radiació

Este sensor mesura la intensitat de la radiació tèrmica que incideix sobre la seua obertura (Fig. 2). La radiació incident depèn de la que emeten els cossos enfrontats al sensor. L'element sensible és una termopila miniatura que genera una tensió d'eixida que és proporcional a la intensitat de la radiació. La resposta espectral comprèn de 0.5 a 40 μm , amb una tensió d'eixida compresa entre 1 mV i uns 100 mV, de manera que un bon mil·livoltímetre digital és adequat per a la realització de les mesures.

Noteu que tot i que no es coneix la relació de calibrat entre la tensió d'eixida de la termopila i la intensitat de la radiació tèrmica incident, la primera és proporcional a la segona.

Un anell, desplaçable al llarg del cos del sensor, actua com a obturador de la finestra de l'aparell. Durant els experiments, esta finestra estarà tancada mentre que no es fan mesures. Això redueix les variacions de temperatura en la unió de referència de la termopila que poden causar una certa deriva de la resposta del sensor. (El voltage produït pel sensor és proporcional a la radiació incident menys la radiació emesa pel mateix, menyspreable si aconseguim que es mantinga aproximadament a temperatura ambient; és a dir, sempre que es tanque la finestra de l'aparell.)

Obrir i tancar l'obturador pot modificar la posició del sensor. En les experiències en les quals la posició del sensor siga crítica, convé utilitzar una pantalla prima de material aïllant que s'interposa, mentre que no s'està mesurant, entre el focus de radiació i el sensor.

El cub de Leslie

Es tracta d'un cub buit, de parets d'alumini, les cares exteriors del qual tenen els tractaments següents: metall polit, metall mat, pintura blanca i pintura negra (Fig. 3). Com a focus de calor es fa servir una bombeta de 100 w situada al seu interior. La temperatura del cub es mesura mitjançant un termistor encastat en un dels seus vèrtex (veure Taula 1 per a passar de resistències a temperatures). El cub disposa d'interruptor d'encesa i d'un regulador de la potència de calefacció que s'anomena selector.

El llamp de Stefan-Boltzmann

És una font de radiació tèrmica que pot assolir temperatures elevades (fins a uns 3000 °C). Consisteix en un llamp incandescent amb un filament de tungsté que té una emissivitat igual a la unitat (Fig. 4). Funciona connectat a una font d'alimentació de baixa tensió AC/DC amb dues eixides: una en corrent continua (DC) amb regulació en tensió (de 0 a 21 V) o en intensitat (de 0 a 8 A), i altra en corrent alterna (AC) amb increments de tensió de 2 V, entre 0 i 24 V. La tensió aplicada, procedent de la font d'alimentació, no ha d'excedir els 12 V (s'utilitzarà l'eixida en corrent altern). La temperatura del filament es calcula mitjançant la Taula 2, que relaciona la resistència relativa R/R_0 amb la temperatura, on és R_0 la resistència a temperatura ambient.



Figura 4. Llamp de Stefan-Boltzmann.

Mesurament de l'emissivitat de las superfícies del cub de Leslie

S'escalfa el cub de Leslie amb el selector de potència en una posició mitjana/màxima i, quan l'òhmmetre s'estabilitze (temperatura del cub aproximadament constant), mesurem la intensitat radiant de les quatre parets del cub (Fig. 5) en el menor temps possible. El sensor s'ha de situar amb els seus pivots en contacte amb la superfície del cub.

Considerant que la cara negra es comporta com un cos negre i que totes les cares es troben a la mateixa temperatura, estimarem les emissivitats del rest de las cares (blanc, Al polit, Al mat) mitjançant el quocient entre la densitat de flux de radiació emesa per cadascuna de'elles (J) i l'emesa per la cara negra, (J/J_n).

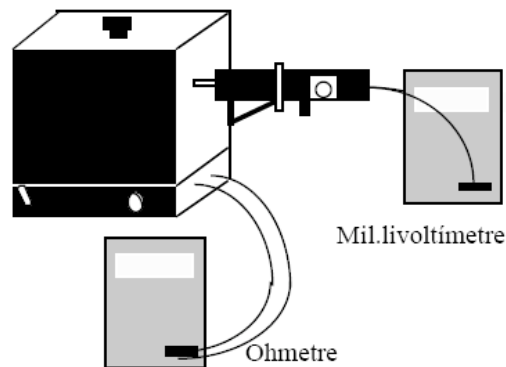


Figura 5. Dispositiu experimental per a estimar les emissivitats de les cares del cub.

Al finalitzar no convé desconnectar el cub de Leslie. Segueix utilitzant-se a la mateixa temperatura en el següent apartat.

Determinació de la transmisivitat del vidre a longituds d'ona curta i llarga

En este apartat treballarem amb dues fonts d'energia radiant: 1) cub de Leslie i 2) filament incandescent d'un llamp.

(a) Mantindrem el cub de Leslie a una temperatura constant (l'assolida en l'apartat anterior). Situem el sensor a uns 5 cm de la cara negra del cub i mesurem J_i . A continuació interposem la placa de vidre i mesurem J_t . Amb les dues mesures, estimarem la transmisivitat del cub $\tau = J_t/J_i$, en este cas amb radiació d'ona llarga.

(b) Amb el llamp de filament incandescent s'han de realitzar mesures similars (s'ha de procurar no variar l'alimentació del llamp per a tal d'assegurar la constància en la temperatura del filament). S'estimarà la transmisivitat del vidre, en este cas amb radiació d'ona curta.

Llei de Stefan-Boltzmann

En este apartat estudiarem la variació de la radiació emesa per un cos amb la temperatura. Agafem com a font d'energia radiant el filament del llamp i admetem $\varepsilon = 1$. El sensor i el llamp els situarem tal com mostra la Fig. 6, amb la precaució de que no varien la seua posició ni la seua orientació en tot el procés. Entre mesura i mesura hem de col·locar entre ambdós la pantalla opaca, amb la cara reflectora mirant cap al llamp. Per a efectuar cada mesura retirarem la pantalla uns instants, el mínim temps que es necessite, per a evitar que el sensor es calfe per damunt de la temperatura ambient. Connectarem la font d'alimentació variant la tensió d'eixida per a obtenir uns cinc valors entre 2 i 10 V, indicats pel voltímetre connectat al llamp. Per a cada valor de la tensió, es mesura la intensitat I i la indicació del sensor J . Es calcula la resistència R del filament, la resistència relativa R/R_0 i, finalment, la temperatura del filament T , usant la Taula 2. El valor de la resistència del filament R_0 a temperatura ambient s'ha mesurat amb un pont de Wheatstone de precisió i els resultats s'indiquen en la base del llamp.

Atés que no coneixem la relació de calibrat del sensor, la mesura de la intensitat de la radiació (J) es realitza sempre en mV (o bé en unitats arbitràries). Per tant, en este apartat es comprovarà si existeix una relació lineal entre J i T^4 , però la pendent no coincidirà amb el valor de la constant de Stefan-Boltzmann σ .

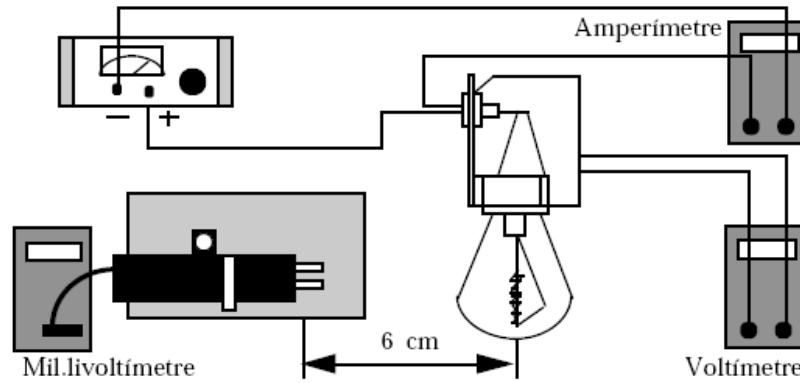


Figura 6. Dispositiu experimental.

PRESENTACIÓ DE RESULTATS

- Taula d'emissivitats de les distintes cares del cub de Leslie, indicant la temperatura a la que s'han realitzat les mesures.
- Transmissivitat del vidre per a baixes i altes temperatures. Relaciona els resultats obtinguts amb l'efecte hivernacle.
- Comprova la llei de Stefan-Boltzmann verificant en una gràfica (ajust lineal) la proporcionalitat entre la densitat de flux de la radiació J (en ordenades) i T^4 (en abcisses).

Taula 1. Temperatura en funció de R/R_0 per al filament del llamp de Stefan-Boltzmann.

R/R_0	T (K)	R/R_0	T (K)	R/R_0	T (K)	R/R_0	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	26,35	3600
4,41	1000	9,44	1900	14,99	2800		

Taula 2. Equivalències resistència-temperatura per al termistor del cub de Leslie.

$R (\Omega)$	$t (^{\circ}\text{C})$	$R (\Omega)$	$t (^{\circ}\text{C})$	$R (\Omega)$	$t (^{\circ}\text{C})$	$R (\Omega)$	$t (^{\circ}\text{C})$	$R (\Omega)$	$t (^{\circ}\text{C})$	$R (\Omega)$	$t (^{\circ}\text{C})$
207850	10	66356	34	24415	58	10110	82	4615.1	106	2281.0	130
197560	11	63480	35	23483	59	9767.2	83	4475.0	107	2218.3	131
187840	12	60743	36	22590	60	9437.7	84	4339.7	108	2157.6	132
178650	13	58138	37	21736	61	9120.8	85	4209.1	109	2098.7	133
169950	14	55658	38	20919	62	8816.0	86	4082.9	110	2041.7	134
161730	15	53297	39	20136	63	8522.7	87	3961.1	111	1986.4	135
153950	16	51048	40	19386	64	8240.6	88	3843.4	112	1932.8	136
146580	17	48905	41	18668	65	7969.1	89	3729.7	113	1880.9	137
139610	18	46863	42	17980	66	7707.7	90	3619.8	114	1830.5	138
133000	19	44917	43	17321	67	7456.2	91	3513.6	115	1781.7	139
126740	20	43062	44	16689	68	7214.0	92	3411.0	116	1734.3	140
120810	21	41292	45	16083	69	6980.6	93	3311.8	117	1688.4	141
115190	22	39605	46	15502	70	6755.9	94	3215.8	118	1643.9	142
109850	23	37995	47	14945	71	6539.4	95	3123.0	119	1600.6	143
104800	24	36458	48	14410	72	6330.8	96	3033.3	120	1558.7	144
100000	25	34991	49	13897	73	6129.8	97	2946.5	121	1518.0	145
95447	26	33591	50	13405	74	5936.1	98	2862.5	122	1478.6	146
91126	27	32253	51	12932	75	5749.3	99	2781.3	123	1440.2	147
87022	28	30976	52	12479	76	5569.3	100	2702.7	124	1403.0	148
83124	29	29756	53	12043	77	5395.6	101	2626.6	125	1366.9	149
79422	30	28590	54	11625	78	5228.1	102	2553.0	126	1331.9	150
75903	31	27475	55	11223	79	5066.6	103	2481.7	127		
72560	32	26409	56	10837	80	4910.7	104	2412.6	128		
69380	33	25390	57	10467	81	4760.3	105	2345.8	129		