

PRÁCTICA 11

RADIACIÓN TÉRMICA

OBJETIVO

Determinación del flujo de radiación procedente de superficies diferentes y estimación de sus emisividades. Verificación del efecto invernadero (radiación transmitida por un vidrio). Comprobación de la ley de Stefan-Boltzmann.

MATERIAL NECESARIO

- Sensor de radiación
- Lámpara de Stefan-Boltzmann
- Cubo de Leslie
- Pantalla opaca
- Lámina de vidrio
- Amperímetro
- Óhmetro
- Fuente de alimentación
- Cables de conexiones

INTRODUCCIÓN TEÓRICA

La superficie de un cuerpo emite energía de naturaleza electromagnética. Esto sucede tanto si se encuentra o no en equilibrio termodinámico. Denominamos intensidad radiante J a la energía emitida por unidad de superficie y de tiempo. Su valor depende de la temperatura T y de una variable, característica de cada superficie, que recibe el nombre de emisividad ϵ , cumpliéndose

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

donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$). La emisividad de una superficie de un cuerpo varía según sea de su naturaleza química, textura, etc. El valor máximo de la emisividad es 1; un objeto que tiene este valor de emisividad recibe el nombre de cuerpo negro. Aparte de esta energía radiante, que denominamos radiación térmica, el cuerpo puede emitir otras radiaciones de carácter electromagnético (rayos X, γ , emisoras de radio, TV, etc).

A temperaturas ordinarias (por debajo de unos $600 \text{ }^\circ\text{C}$), la radiación térmica emitida por un cuerpo negro no es visible porque la energía se concentra en la región infrarroja del espectro electromagnético. Al irse calentando el cuerpo la concentración de la energía se desplaza hacia longitudes de ondas más cortas. Entre 600 y $700 \text{ }^\circ\text{C}$, aparece ya suficiente cantidad de energía en el espectro visible como para que el cuerpo brille con un color rojo oscuro. A temperaturas aún más elevadas, se hace rojo brillante, e incluso "rojo blanco" (como el filamento de la lámpara).

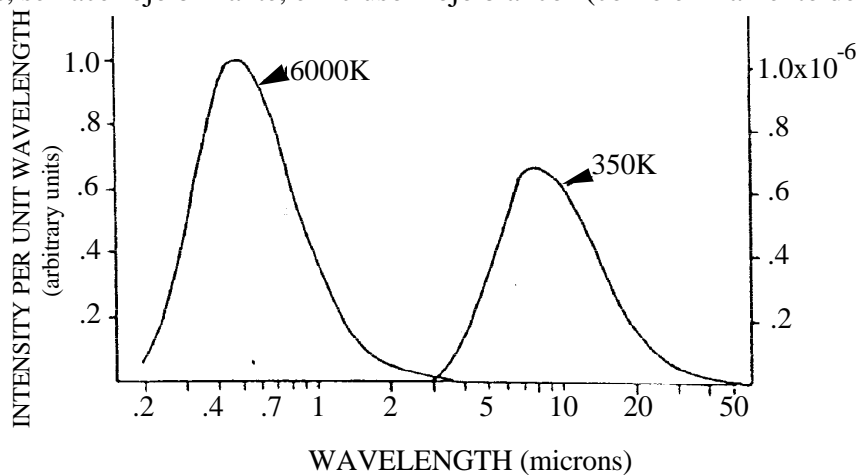


Figura 1. Distribución espectral de la radiación de un cuerpo negro a 6000 K y 350 K .

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Descripción del material

El sensor de radiación

Este sensor mide la intensidad de la radiación térmica que incide sobre su abertura (Figura 2). Esta radiación incidente depende de la que emiten los cuerpos enfrentados al sensor. El elemento sensible es una termopila miniatura que genera una tensión de salida que es proporcional a la intensidad de la radiación. La respuesta espectral comprende desde 0,5 a 40 μm y tiene una tensión de salida comprendida entre 1 mV y unos 100 mV, de modo que un buen milivoltímetro digital es adecuado para la realización de las medidas. Un anillo, desplazable a lo largo del cuerpo del sensor, actúa como obturador de la ventana del aparato. Durante los experimentos dicha ventana permanecerá cerrada mientras no se estén realizando medidas. Esto reduce las variaciones de temperatura en la unión de referencia de la termopila que pueden causar cierta deriva de la respuesta del sensor.

Abrir y cerrar el obturador puede modificar la posición del sensor. En las experiencias en las que la posición del sensor sea crítica, conviene utilizar una delgada pantalla de material aislante que se interpone, mientras no se está midiendo, entre el foco de radiación y el sensor.

El cubo de Leslie

Se trata de un cubo hueco, de paredes de aluminio cuyas caras exteriores tienen los siguientes tratamientos: metal pulido, metal mate, pintura blanca y pintura negra (Figura 3). Como foco de calor se utiliza una bombilla de 100 W situada en su interior. La temperatura del cubo se mide mediante un termistor embebido en uno de sus vértices (ver tabla 1 para pasar de resistencias a temperaturas). El cubo dispone de interruptor de encendido y de un regulador de la potencia de calefacción que llamamos selector.

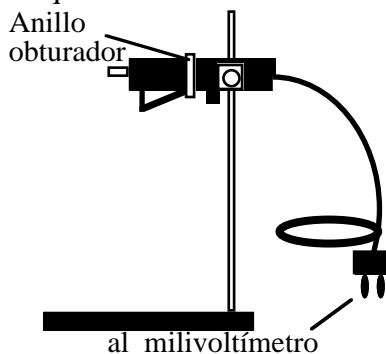


Figura 2. Sensor de radiación

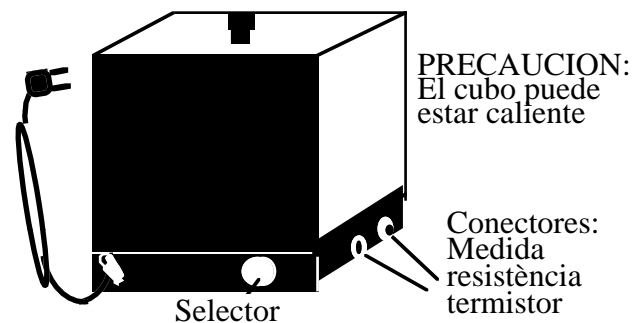


Figura 3. Cubo de Leslie

La fuente de alimentación

Se trata de una fuente de baja tensión AC/DC, con dos salidas: una en corriente continua (DC) con regulación en tensión (de 0 a 21V) o en intensidad (de 0 a 8 A), y otra en corriente alterna (AC) con incrementos de tensión de 2 V, entre 0 y 24 V. La fuente dispone de un interruptor general, de un botón de ajuste de la tensión de salida en AC, otros dos botones de ajuste de las salidas (de tensión e intensidad) en DC, un aparato analógico de medida de la tensión o la intensidad y un selector del mismo. Utilizaremos la salida en AC.

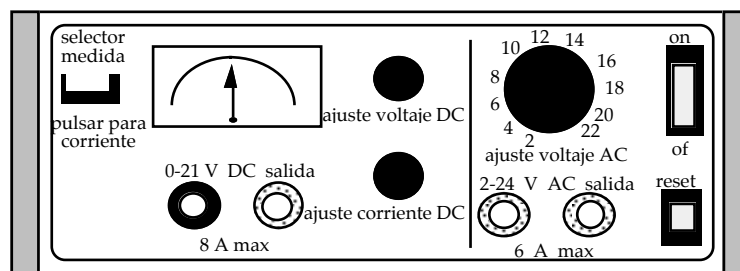


Figura 4. Fuente de alimentación

La lámpara de Stefan-Boltzmann

Es una fuente de radiación visible que puede alcanzar temperaturas elevadas (hasta unos 3000 °C). La tensión aplicada, procedente de la fuente de alimentación, no debe exceder los 12 V (se utilizará la salida en corriente alterna). La temperatura del filamento se calcula utilizando la tabla 2, que relaciona la resistencia relativa R/R_0 con la temperatura. R_0 es la resistencia a temperatura ambiente.

Medida de la emisividad de las superficies del cubo de Leslie.

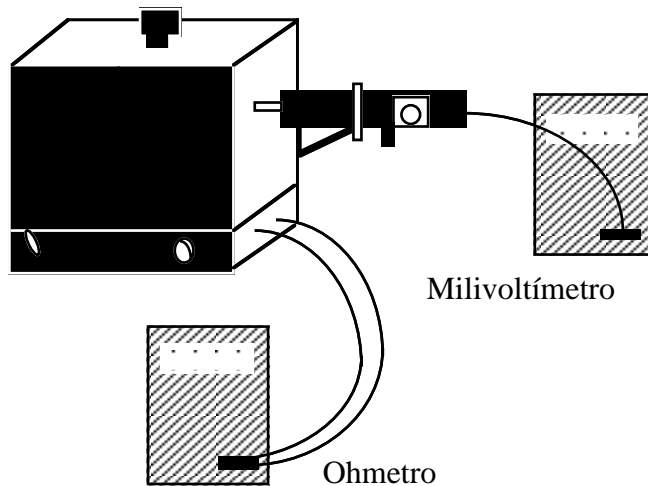


Figura 5. Dispositivo experimental

Sabemos que la relación entre las intensidades radiantes de dos cuerpos que se encuentran a la misma temperatura, J_i/J_k , se identifica con la relación de sus emisividades, ϵ_i/ϵ_k . En este apartado vamos a calcular los valores de la emisividad de las caras del cubo de Leslie ($i = \text{Blanco, Al. pulido, Al. mate}$) admitiendo que la de la cara negra vale uno, i.e. $\epsilon_{\text{negro}}=1$.

Se procede a calentar el cubo de Leslie con el selector de potencia al máximo y cuando el óhmetro indica unos 20,0 k Ω mediremos la intensidad radiante de las cuatro paredes del cubo (Figura 5). Durante las cuatro medidas la temperatura del cubo ha de permanecer inalterada, por lo que variaremos el

selector de la calefacción de modo que en el momento de la medida el óhmetro marque 20,0 k Ω . El sensor se ha de situar con sus pivotes en contacto con la superficie del cubo.

Medida de la radiación transmitida a través de un vidrio

Al incidir la energía radiante J sobre un material transparente sólo una parte se transmite, J_t . La relación J_t/J depende de la longitud de onda de la radiación incidente. Vamos a observar este efecto al comparar los valores de dicho cociente con dos fuentes de energía radiante: 1) Cubo de Leslie; 2) Filamento incandescente de una lámpara.

Mantendremos el cubo de Leslie a una temperatura constante (por ejemplo la que corresponde a 20,0 k Ω en la resistencia del termistor). Situamos el sensor a unos 5 cm de la cara negra del cubo y medimos J . A continuación interpondremos la placa de vidrio y mediremos J_t . Con la lámpara con el filamento incandescente se han de realizar similares medidas (se ha de procurar no variar la alimentación de la lámpara para asegurar constancia en la temperatura del filamento).

Ley de Stefan-Boltzmann

En este apartado vamos a estudiar la variación de la intensidad de radiación de un cuerpo con la temperatura. Tomamos como fuente de energía radiante el filamento de la lámpara y admitimos $\epsilon=1$. El sensor y la lámpara los situaremos tal como muestra la figura 6, cuidando que en todo el proceso no varíen su posición, ni su orientación. Entre medida y medida hemos de colocar entre ambos la pantalla opaca, con la cara reflectora mirando a la lámpara. Para efectuar cada medida retiraremos la pantalla unos instantes, el mínimo tiempo que se necesite, para evitar que el sensor se caliente por encima de la temperatura ambiente. Conectaremos la fuente de alimentación variando la tensión de salida para obtener unos cinco valores entre 2 y 10 V (valores que indique el voltímetro conectado a la lámpara). A cada valor de la tensión

(medida en el voltímetro), se mide la intensidad I y la indicación del sensor J . Se calcula la resistencia R del filamento, la resistencia relativa R/R_0 y finalmente la temperatura del filamento T , usando la tabla 2. El valor de la resistencia del filamento R_0 a la temperatura ambiente se ha medido con un puente de Wheatstone de precisión y los resultados se indican en la base de la lámpara.

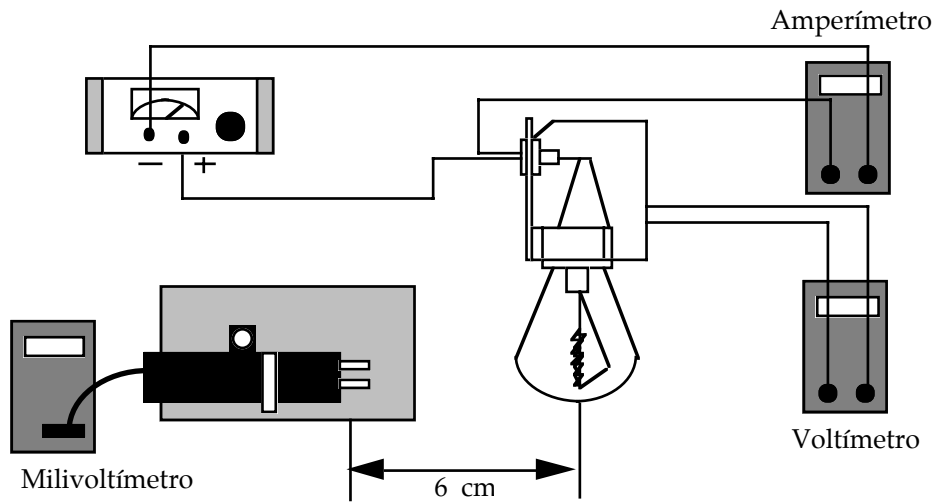


Figura 6. Dispositivo experimental.

PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

- Tabla de emisividades de las distintas caras del cubo de Leslie, indicando la temperatura a la que se han realizado las medidas.
- Relaciones de radiación transmitida por el vidrio (% del total) para bajas y altas temperaturas. Comentarios sobre el efecto invernadero.
- Comprueba la ley de Stefan-Boltzmann verificando, en una gráfica (ajuste lineal), la proporcionalidad entre la intensidad de la radiación J (en ordenadas) y T^4 (en abscisas).

Tabla 1. Equivalencias resistencia-temperatura para el cubo de Leslie.

R (Ω)	t ($^{\circ}\text{C}$)	R (Ω)	t ($^{\circ}\text{C}$)	R (Ω)	t ($^{\circ}\text{C}$)	R (Ω)	t ($^{\circ}\text{C}$)	R (Ω)	t ($^{\circ}\text{C}$)	R (Ω)	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		

Tabla 2. Temperatura en función de R/R₀ para la lámpara 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	20,35	3600
4,41	1000	9,44	1900	14,99	2800		
4,95	1100	10,03	2000	15,63	2900		

RADIACIÓN TÉRMICA

OBJETIVOS

1. Determinación del flujo de radiación procedente de superficies y estimación de sus emisividades.
2. Verificación del efecto invernadero (radiación transmitida por un vidrio).
3. Comparación de la ley de Stefan-Boltzmann.

PROCEDIMIENTO

La primera parte de la práctica se llevará a cabo mediante la utilización del cubo de Leslie y el sensor de radiación.

El cubo de Leslie es un cubo hueco con un foco de calor en su interior (bombilla) cuyas caras laterales son de metal pulido, mate, pintura blanca y negra. El sensor de radiación se encarga de cuantificar la intensidad de la radiación térmica que incide sobre su abertura.

Así pues, la práctica consistirá en medir la emisividad de las cuatro caras laterales del cubo de Leslie a una determinada temperatura. Esto se consigue enfocando el sensor de radiación a cada una de las caras cuando se alcanza el equilibrio térmico. Para conocer la temperatura del interior del cubo ha de usarse un medidor de resistencias del circuito interior.

Posteriormente mediremos la radiación transmitida a través de un vidrio. Por esto compararemos la radiación transmitida por la cara negra del cubo con y sin el vidrio. Además también realizaremos el mismo procedimiento para una bombilla encendida.

En la última parte estudiaremos la variación de intensidad de radiación de un cuerpo con la temperatura. Este cuerpo será la bombilla a la que le podremos introducir el voltaje. Para saber la temperatura de la propia bombilla, simplemente calcularemos la resistencia de su circuito.

MEDIDAS

Tabla 1.- Medida de la emisividad del cubo de Leslie

Cara	Resistencia (K Ω) (± 0.07)	Voltaje (mV) (± 0.02)	T ($^{\circ}$ C) (± 0.13)	emisividad ϵ
Mate	20'19	0'83	62'93	0'211 \pm 0'005
Blanco	20'34	3'96	62'74	1'008 \pm 0'007
Pulido	20'46	0'44	62'59	0'112 \pm 0'005
Negro	20'69	3'93	62'27	1

* Sale mayor que el cuerpo negro, pero dentro del error. El que esté pintado de blanco no indica que ya no sea negro para la radiación infrarroja.

Tabla 2.- Medida 2 de la emisividad del cubo de Leslie

Cara	Resistencia (K Ω)	Voltaje (mV)	T ($^{\circ}$ C)	emisividad ϵ
Mate	20'3	0'85	62'93	0'246 \pm 0'005
Blanco	20'5	3'76	62'74	0'957 \pm 0'007
Pulido	20'5	0'24	62'59	0'061 \pm 0'005
Negro	20'6	3'91	62'29	1

Estos valores han sido tomados cuando la resistencia era aproximadamente 20 K Ω . A partir de la resistencia de cada momento del circuito hemos podido calcular la temperatura del interior interpolando en tablas. Exactamente en la tabla de equivalencias resistencia-temperatura para el cubo de Leslie.

El voltaje (mV) es la cantidad de radiación térmica registrada por el sensor de radiación cuando se enfocaba en cada una de las caras.

Para el cálculo de emisividad se ha tomado que la superficie del cubo pintada de negro es la máxima y ~~este~~ tiene un valor igual a la unidad. Así que al dividir cada voltaje entre el del negro se obtiene la emisividad de cada cara.

Tabla 2.- Medida de la radiación transmitida a través de un vidrio.

Modo Cristal	Temperatura ($^{\circ}$ C)	Resistencia (K Ω)	Voltaje (mV)	Cociente de transmisión
1 Sin	20'2 \pm 0,1	62'9 \pm 0'2	2'73 \pm 0'08	115 \pm 0'7 %
1 Con			0'63 \pm 0'02	
2 Sin	ϕ	ϕ	6'77 \pm 0'02	74 \pm 2 %
2 Con			1'02 \pm 0'02	

2 corresponde a la bombilla (que también es un cuerpo negro!)

En los dos casos (con o sin cristal) el sensor de radiación ha estado colocado a la misma distancia del foco, la diferencia consiste precisamente en la incorporación o no del cristal en medio, se puede observar como al introducir el cristal ~~en medio~~, la cantidad de radiación registrada es menor.

En "coeficiente de transmisión" se muestra ^{el cociente de} la cantidad de radiación registrada con el cristal y sin éste.

Tabla 3 - Ley de Stefan-Boltzmann

$$R_0 = 0.31 \pm 0.01 \Omega$$

V (V)	J_r (mV)	I (A)	R (Ω)	R/R ₀	T (K)
1.999	0.52	0.9	2.22 ± 0.11	7.16 ± 0.06	1504 ± 7
4.005	1.11	1.4	2.86 ± 0.07	9.23 ± 0.04	1863 ± 7
6.000	2.7	1.8	3.33 ± 0.06	10.75 ± 0.04	2120 ± 6
8.009	4.6	2.1	3.81 ± 0.05	12.30 ± 0.03	2374 ± 6
9.998	6.4	2.5	4.00 ± 0.04	12.90 ± 0.03	2471 ± 5
11.278	8.2	2.6	4.34 ± 0.04	13.99 ± 0.03	2643 ± 5

Para la realización de esta tabla hemos medido la emisividad de la bombilla (J_r) para voltajes cada vez más crecientes, de forma que vemos una clara relación del aumento de voltaje y emisividad.

Si recordamos la ley de Boltzmann

$$J = \epsilon \sigma T^4, \quad \sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4} \equiv \text{cte de Boltzmann}$$

Y la emisividad está directamente relacionada con la frecuencia y la temperatura.

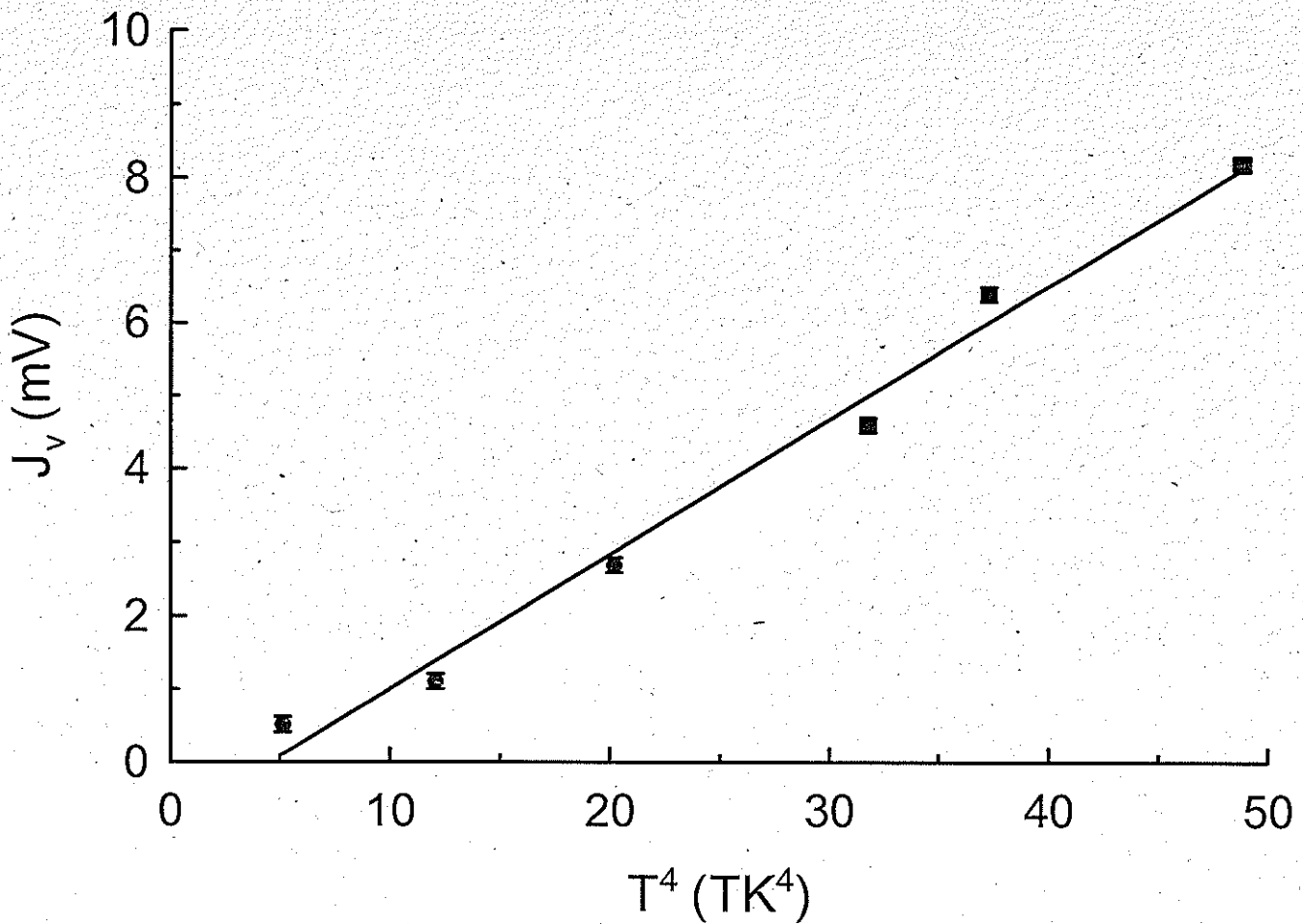
Para calcular la temperatura hemos interpolado en la tabla de "Temperatura en función de R/R₀ para la lámpara de Stefan-Boltzmann".

Como $J_r = J_r(T^4)$ cumpliendo una relación lineal podemos ajustar estos valores a una recta, para sacar la cte de Boltzmann deberíamos conocer la relación entre el voltaje medido en el sensor J_r y la intensidad de radiación J .

Tabla 4.- Valores de la gráfica

$V(\text{mV}) (\pm 0.1)$	$T^4 (\text{TK}^4)$
0.5	5.42 ± 0.40
1.1	12.06 ± 0.18
2.7	20.2 ± 0.2
4.6	31.8 ± 0.3
6.4	37.3 ± 0.3
8.2	48.8 ± 0.4

$\times 10^4$



Gráfica 1.- Ley de Stefan-Boltzmann en la radiación de una bombilla.

$$J_v = (0,184 \pm 0,010) \cdot T^4 + (-0,8 \pm 0,3) \quad [\text{mV}]$$

$$r = 0,994$$

Se observa que el ajuste lineal no es bueno, puesto que los residuos presentados indican algún error sistemático o bien en el método experimental o en la fórmula → es aceptable

En esta práctica hemos alcanzado los objetivos de calcular las emisividad de la distinta cara del cubo de vidrio, así como la transmisión de la radiación del cubo y de una bombilla al interponer un cristal. Además, se ha verificado la ley de Stephan-Boltzmann.

En general, cabe destacar las limitaciones experimentales. Los multímetros empleados oscilaban considerablemente entre valores muy dispares y era complicado decidir cuándo medir. Además, la regulación de la potencia del calentador del cubo no era sencilla, con lo que la resistencia variaba ligeramente al medir cada cara (difícil mantener temperatura constante). Estas variaciones han sido la causa probable de nuestros errores sistemáticos en los resultados, así como de la falta de precisión en los mismos.

Otro error es haber considerado la cara negra del cubo como cuerpo negro (lo es para la radiación visible) para la radiación infrarroja (no visible). Por ello, no se distingue apenas entre cara blanca y negra. Además, considerar que $E=1$ es una aproximación que puede dar lugar a desviaciones. Esto no significa que la cara negra no sea cuerpo negro, sino que la blanca también lo es.

En cuanto a la absorción del cristal, se observa que es mucho mayor para la radiación infrarroja que para la visible, donde para una gran parte de la luz (otras radiaciones de la bombilla no visibles se absorben más). Este comportamiento se observa en el fenómeno del efecto invernadero en la Tierra. La luz solar atraviesa bastante bien la atmósfera y calienta la Tierra. Al estar más fría, ésta emite su máximo en el infrarrojo, que es absorbido casi en su totalidad por la atmósfera, con lo que la energía queda almacenada en el ambiente, las nubes...

Finalmente, la ley de Stephan se ha verificado, aunque el ajuste no ha sido muy bueno debido a las limitaciones experimentales antes citadas y a la aproximación de