

# Laboratorio 2

## Radiación térmica

### 2.1 Objetivos

1. Introducir experimentalmente el concepto de radiación térmica.
2. Comprobar la Ley de Stefan-Boltzmann para altas temperaturas.
3. Verificar la ley del cuadrado inverso para la radiación térmica.

### 2.2 Preinforme

1. ¿ En qué consiste la radiación térmica ?.
2. ¿ A qué se le denomina radiación de cuerpo negro ?.
3. ¿ Qué establece la ley de Stefan-Boltzmann?.

### 2.3 Materiales

- Sensor de radiación PASCO TD-8553.
- Cubo de radiación térmica TD-8554A.
- TD-8555 Lámpara de Stefan-Boltzman.
- voltímetro, Amperímetro, Ohmetro, Fuente de voltaje (12 VDC;3A).
- Ventana de vidrio, láminas aislantes con recubrimiento de aluminio, lámina de triplex pequeña, lámina de aluminio, cinta métrica y algunos otros materiales que puedan ensayarse como bloqueadores de la radiación térmica.

## 2.4 Fundamento Teórico

La radiación térmica se encuentra en la región infrarroja del espectro electromagnético, el cual se extiende desde las señales de radiofrecuencia hasta los rayos  $\gamma$ . Su fuente son los cuerpos calientes debido a oscilaciones de las moléculas que los conforman. La energía asociada a la radiación térmica se puede medir utilizando sensores tales como termopares los cuales responden al calor generado por algún tipo de superficie. Se dice que un cuerpo se encuentra en equilibrio térmico cuando emite la misma cantidad de radiación térmica que absorbe; desprendiéndose de aquí, que los buenos absorbentes de la radiación son buenos emisores de la misma. A un absorbente o emisor ideal de la radiación se le llama *cuerpo negro*. La física que se conocía hasta el año 1900 había logrado explicar ciertos aspectos relacionados con la radiación térmica.

En 1879 Josef Stefan había observado que la intensidad de la radiación es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura. Años más tarde Ludwig Boltzmann puso esta observación sobre una sólida base teórica y hoy se conoce como la *Ley de Stefan-Boltzmann* la cual establece que:

$$\mathfrak{R} = \sigma T^4 \quad (2.1)$$

Donde

$\mathfrak{R}$ : es la radiación térmica emitida por un objeto a una temperatura  $T$ .

$\sigma$ : es la constante de Stefan-Boltzmann y es igual a  $(5,670400 \pm 0,000040) \times 10^{-8} \text{Wm}^{-2} \text{K}^{-4}$ .

$T$ : es la temperatura del objeto en consideración medida en kelvin.

Los trabajos de Stefan, Boltzmann y Wien, entre otros, sirvieron como base para que Lord Raileigh y Sir James Jeans, llegaran a una fórmula desarrollada en términos de la física clásica para la radiación de cuerpo negro, la cual estuvo de acuerdo con los resultados experimentales sólo parcialmente. La discrepancia fue resuelta poco tiempo después por Max Planck en términos de una nueva concepción de la energía asociada al campo electromagnético, lo que dió origen a la física cuántica.

En condiciones normales de laboratorio, un experimento para comprobar esta ley, debe considerar si la temperatura ambiente dentro del laboratorio afecta o no los resultados. Si se consideran temperaturas del objeto  $T$  por encima de 1000 grados Kelvin, la cuarta potencia de la temperatura ambiente es despreciable comparada con la cuarta potencia de la temperatura del objeto. Pero si se consideran temperaturas menores a 370 grados Kelvin, deberá incluirse dentro del procedimiento la



Figura 2.1: Sensor de Radiación PASCO TD-8553

medición de la temperatura ambiente la cual ya no podrá ser despreciada.

En este experimento se utiliza un sensor (Figura 7.1) que consiste en una pequeña termopila la cual produce una diferencia de potencial que es proporcional a la intensidad de la radiación. La respuesta espectral de la termopila es esencialmente plana en la región infrarroja y el rango de voltajes producidos van desde el orden de los microvoltios hasta el orden de los 100 milivoltios. Es necesario utilizar un voltímetro con una buena resolución para realizar las mediciones.

Otro de los elementos utilizados para esta experiencia de laboratorio es el cubo de radiación térmica (Figura 7.2) , el cual provee cuatro superficies diferentes de radiación que pueden ser calentadas hasta una temperatura de 120 grados Celcius. El cubo es calentado por un bombillo de 100 W. Una vez conectado a la red (115 o 200 VAC), se coloca el interruptor en "ON" con lo cual le llega corriente al bombillo y la perilla de potencia que se encuentra al lado derecho al interruptor, se gira de "low" a "high" para aumentar temperatura en el interior del cubo.

La temperatura se obtiene midiendo con un óhmetro los cambios de resistencia en un termistor que se encuentra en uno de los costados en la parte inferior del cubo. Los datos de resistencia se convierten a temperatura utilizando la tabla de conversión suministrada por el fabricante la cual se anexa al final de esta guía (Ver tabla 2.4).

Si el detector en el sensor de radiación fuera operado al cero absoluto de temperatura, él podría producir un voltaje directamente proporcional a la intensidad de



Figura 2.2: Cubo de radiación térmica PASCO TD-8554A

radiación que incide en él.

Sin embargo el detector no está al cero absoluto de temperatura, por tanto, él es también un radiador de energía térmica. De acuerdo a la ley de Stefan-Boltzmann, él irradia a una tasa:

$$\mathcal{R}_{detector} = sT_{detector}^4$$

El voltaje producido por el sensor es proporcional a la radiación incidente sobre él menos la radiación que sale de él. Matemáticamente, el voltaje del sensor es proporcional a:

$$\mathcal{R}_{neto} = \mathcal{R}_{rad} - \mathcal{R}_{det} = s(T^4 - T_{det}^4)$$

Siempre que usted cubra cuidadosamente el sensor de radiación de la radiación del cubo mientras no se estén haciendo las medidas,  $T_{det}$  será muy cercana a la temperatura ambiente  $T_{rm}$ .

El otro elemento importante para la realización de esta práctica es la lámpara de Stefan-Boltzmann (Figura 7.3), la cual consiste en una fuente de radiación térmica a altas temperaturas. La lámpara puede ser utilizada para investigaciones a altas temperaturas de la ley de Stefan-Boltzmann. Las altas temperaturas simplifican el análisis porque la cuarta potencia de la temperatura ambiente es despreciablemente pequeña comparada con la cuarta potencia de la alta temperatura del filamento de la lámpara. Cuando está apropiadamente orientado, el filamento también provee una buena aproximación a una fuente puntual de radiación térmica. Él, por esta razón, trabaja bien para investigaciones dentro de la ley del inverso del cuadrado.



Figura 2.3: Lámpara de Stefan-Boltzmann TD-8555

Ajustando la corriente y el voltaje del filamento (13 V max, 2 A min, 3 A max), se pueden obtener temperaturas de hasta 3 000 grados Celsius. La temperatura del filamento se obtiene a través de mediciones de diferencia de potencial y corriente dentro de la lámpara. La diferencia de potencial dividida por la corriente da la resistencia del filamento y ésta se utiliza en conjunto con la tabla 2.5 para el cálculo de la temperatura.

## 2.5 Procedimiento

**NOTA:** Cuando use el sensor de radiación, siempre protéjalo de objetos calientes excepto por los pocos segundos que realmente toma hacer las medidas. Esto previene el calentamiento de la termopila lo cual cambiará la temperatura de referencia y alterará la lectura.

### 2.5.1 Ley de Stefan-Boltzmann a altas temperaturas

**IMPORTANTE:** El voltaje en la lámpara no puede exceder los trece voltios. Realice cada lectura rápidamente. Entre lecturas, coloque un protector reflector de calor entre la lámpara y el sensor, de tal modo que la temperatura del sensor esté relativamente constante (Bloque de icopor).

1. Mida la temperatura en el laboratorio  $T_{ref}$  en kelvin ( $K = C + 273$ ). Asuma una resistencia de  $(0,3 \pm 0,1)\Omega$  para una temperatura cercana a 295 K.

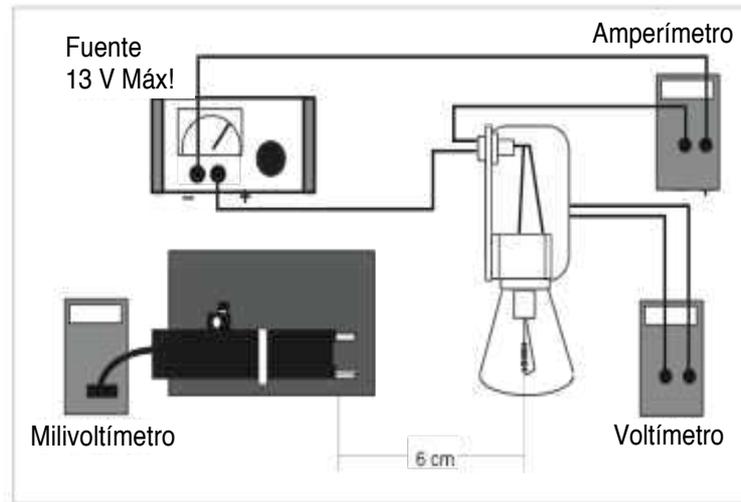


Figura 2.4: Montaje experimental para comprobar la ley de Stefan-Boltzmann a altas temperaturas



Figura 2.5: Montaje Experimental

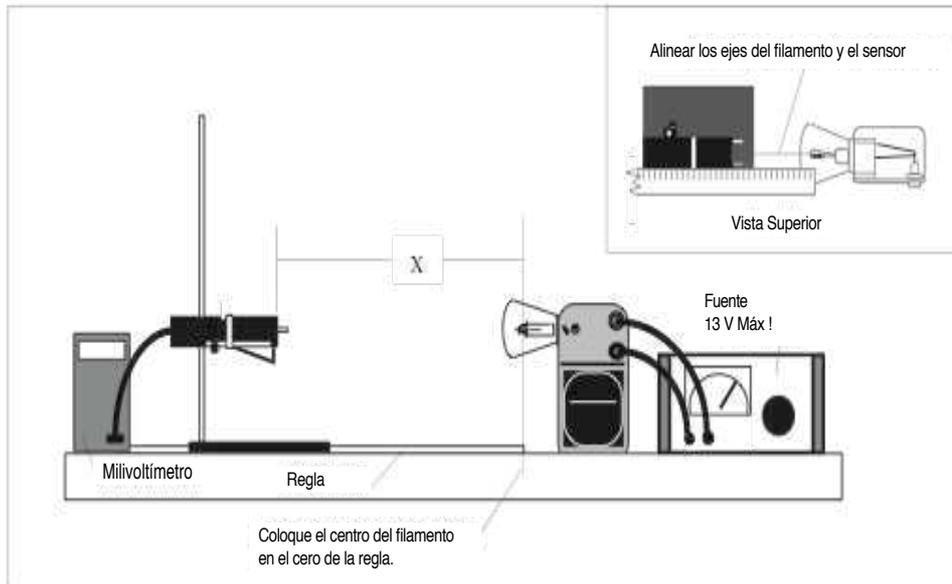


Figura 2.6: Montaje experimental para comprobar la ley del cuadrado inverso.

2. Monte el equipo como indica en la Figura 7.4. El voltímetro debe estar conectado directamente a la lámpara. El sensor debe estar a la misma altura del filamento, con la cara frontal del sensor aproximadamente a 6 cm del filamento. El ángulo de entrada a la termopila no debe incluir otros objetos cercanos diferentes a la lámpara.
3. Encienda la fuente de voltaje. Para cada voltaje de la tabla 7.1, anote el valor de la corriente  $I$  leído en el amperímetro, y el valor de la radiación  $\mathcal{R}$  leído en el voltímetro.

### 2.5.2 Ley del cuadrado inverso

**IMPORTANTE:** Haga cada lectura del sensor rápidamente. Entre lecturas, coloque las dos láminas bloqueadoras de la radiación entre la lámpara y el sensor, con la superficie plateada frente a la lámpara, de tal manera que la temperatura del sensor permanezca relativamente constante.

1. Monte el equipo como se muestra en la Figura 7.5.

- Adhiera la cinta métrica en la mesa.

Datos			Cálculos		
V (Voltios)	I (Amperios)	Rad (mV)	R (Ohmios)	T (°K)	T <sup>4</sup> (°K <sup>4</sup> )
1.00					
2.00					
3.00					
4.00					
5.00					
6.00					
7.00					
8.00					
9.00					
10.00					
11.00					
12.00					

Tabla 2.1: Tabla de datos para comprobar la ley de Stefan-Boltzmann

- Coloque la lámpara de Stefan-Boltzmann en uno de los extremos de la cinta métrica como se muestra. El cero de la cinta métrica debe alinearse con el centro del filamento de la lámpara.
  - Ajuste la altura del sensor de radiación tal que esté en el mismo plano del filamento de la lámpara de Stefan-Boltzmann.
  - Oriente la lámpara y el sensor de tal modo que, al deslizar el sensor a lo largo de la cinta métrica, el eje de la lámpara se alinee tan cerca como sea posible con el eje del sensor.
  - Conecte el sensor al voltímetro y la lámpara a la fuente de voltaje como se muestra en la Figura 7.5.
2. Con la lámpara apagada, deslice el sensor a lo largo de la cinta métrica. Anote las lecturas del milivoltímetro a intervalos de 10 cm. Promedie estos valores para determinar el nivel ambiental de radiación térmica. Usted necesitará sustraer este valor promedio ambiental de sus mediciones con la lámpara encendida, para poder determinar la contribución de la lámpara sola.
  3. Accione el control de la fuente de voltaje para encender la lámpara. Coloque una diferencia de potencial de aproximadamente 10 V.
  4. Ajuste la distancia entre el sensor y la lámpara para cada una de las posiciones de la tabla 7.2. Anote la lectura en el milivoltímetro para cada posición.

### 2.5.3 Introducción a la radiación térmica

1. Conecte el óhmetro y el voltímetro (utilice la escala de mV) como se muestra en la Figura 7.6.
2. Lleve el interruptor del cubo de radiación a "ON" y lleve la perilla que controla la potencia del bombillo a la posición "HIGH". Mantenga la vista en la lectura del óhmetro. Cuando ella haya bajado hasta alrededor de 40 k $\Omega$ , ponga la perilla en 5.0.
3. Cuando el cubo encuentre el equilibrio térmico (Consulte esta parte con su profesor), la lectura del óhmetro fluctuará alrededor de un relativo valor fijo. Use el sensor de radiación para medir la radiación emitida por cada una de las cuatro superficies del cubo. Coloque el sensor tal que los terminales estén en contacto con la superficie del cubo ( esto asegura que la distancia de las mediciones es la misma para todas las superficies). Anote sus medidas en tabla 7.3. Use la información suministrada al final de la guía (ver Tabla 2.4) para determinar la temperatura correspondiente .

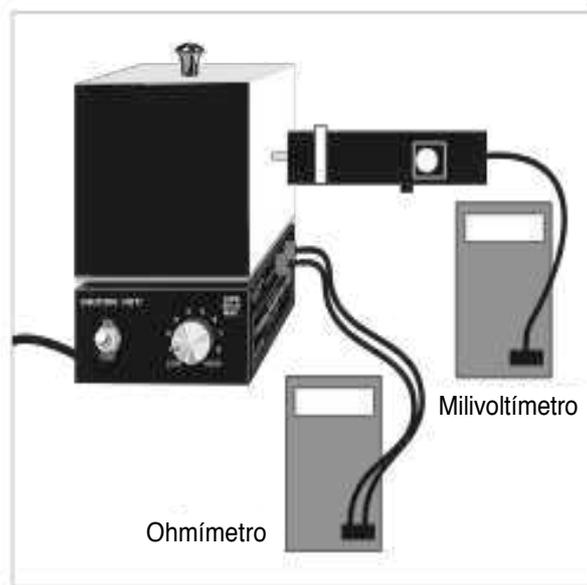


Figura 2.7: Montaje experimental para la introducción a la radiación térmica.



Figura 2.8: Montaje experimental para la introducción a la radiación térmica.

X (cm)	Nivel de radiación ambiental (mV)
10	
20	
30	
40	
50	
60	
70	
80	
90	
100	
Nivel de radiación ambiental promedio:	

Nivel de Radiación Ambiental

Radiación vs Distancia

X (cm)	Rad (mV)	1/X <sup>2</sup> (cm <sup>-2</sup> )	Rad - Ambient (mV)
2.5			
3.0			
3.5			
4.0			
4.5			
5.0			
6.0			
7.0			
8.0			
9.0			
10.0			
12.0			
14.0			
16.0			
18.0			
20.0			
25.0			
30.0			
35.0			
40.0			
45.0			
50.0			
60.0			
70.0			
80.0			
90.0			
100.0			

Tabla 2.2:

4. Lleve la perilla de potencia, primero a 6,5, luego a 8,0 y luego a "high". Para cada uno de los valores anteriores espere que el cubo alcance el equilibrio térmico, luego repita las medidas del paso anterior y anote sus resultados en la tabla 7.3.
5. Coloque el sensor aproximadamente a 5 cm de la superficie negra del cubo de radiación térmica y anote la lectura. Coloque una ventana de vidrio entre la superficie y el sensor. ¿Es la ventana de vidrio un efectivo bloqueador de la radiación térmica?
6. Remueva la tapa del cubo de radiación y repita las medidas del paso anterior, ubicando el sensor directamente encima del bombillo. Repita con otros materiales.
7. Apague el cubo de radiación y desconéctelo.

## 2.6 Análisis

### 2.6.1 Ley de Stefan-Boltzmann a altas temperaturas

1. Calcule  $R_T$ , la resistencia del filamento a cada uno de los voltajes usados ( $R = V/I$ ). Entre sus resultados en la tabla 7.1.
2. Divida  $R_T$  por  $R_{ref}$ , para obtener la resistencia relativa ( $R_T/R_{ref}$ ).
3. Utilizando los valores de resistividad relativa del filamento a temperatura T, use la tabla que se suministra al final de la guía para determinar la temperatura del filamento (Tabla 7.4). Entre los resultados en la tabla.
4. Calcule el valor  $T^4$  para cada valor de T y registre sus resultados en la tabla.
5. Construya una gráfica de radiación  $\mathfrak{R}$  en función de  $T^4$ .
6. Cual es la relación entre  $\mathfrak{R}$  y  $T^4$ ?. ¿ Se verifica la ley de Stefan Boltzmann a altas temperaturas?.
7. La ley de Stefan-Boltzmann es perfectamente cierta unicamente para la radiación de un cuerpo negro ideal. ¿ Es el filamento de la lámpara un verdadero cuerpo negro?.

<b>VARIACIONES DE RADIACIÓN PROVENIENTES DE DIFERENTES SUPERFICIES</b>											
<b>DATOS Y CÁLCULOS</b>											
<b>DIAL DE POTENCIA : 50</b>			<b>DIAL DE POTENCIA : 65</b>			<b>DIAL DE POTENCIA : 80</b>			<b>DIAL DE POTENCIA : 100</b>		
Resistencia Técnica ____ Ohm			Resistencia Técnica ____ Ohm			Resistencia Técnica ____ Ohm			Resistencia Técnica ____ Ohm		
Temperatura ____ °C			Temperatura ____ °C			Temperatura ____ °C			Temperatura ____ °C		
<b>SUPERFICIE</b>	<b>LECTURA DEL SENSOR (mV)</b>		<b>SUPERFICIE</b>	<b>LECTURA DEL SENSOR (mV)</b>		<b>SUPERFICIE</b>	<b>LECTURA DEL SENSOR (mV)</b>		<b>SUPERFICIE</b>	<b>LECTURA DEL SENSOR (mV)</b>	
NEGRA			NEGRA			NEGRA			NEGRA		
BLANCA			BLANCA			BLANCA			BLANCA		
ALUMINIO PULIDO			ALUMINIO PULIDO			ALUMINIO PULIDO			ALUMINIO PULIDO		
ALUMINIO OPACO			ALUMINIO OPACO			ALUMINIO OPACO			ALUMINIO OPACO		

Tabla 2.3:

### 2.6.2 Ley del cuadrado inverso

1. Construya una gráfica de nivel de radiación  $\mathfrak{R}$  en función de la distancia, usando los datos de la tabla 7.2.
2. Si su gráfica en el punto anterior no es lineal, construya una gráfica de nivel de radiación en función de  $1/X^2$ , usando los datos de las columnas tres y cuatro de la tabla 7.2.
3. ¿Cuál de las dos gráficas anteriores es más lineal?. ¿Es lineal sobre todo el rango de mediciones?.
4. La ley del inverso del cuadrado establece que la energía radiante por unidad de área emitida por una fuente puntual de radiación disminuye con el cuadrado de la distancia de la fuente al punto de detección. ¿Sus datos verifican esta ley?.
5. ¿Es la lámpara de Stefan-Boltzman verdaderamente una fuente puntual de radiación?. Si no, ¿cómo puede afectar esto sus resultados?. ¿Se nota este efecto en los resultados que usted tomó?.

### 2.6.3 Introducción a la radiación térmica

1. Utilice la tabla 7.5 para hacer la equivalencia entre resistencia y temperatura.
2. Ordene las superficies del cubo de radiación de acuerdo a la cantidad de radiación emitida. ¿Es el orden independiente de la temperatura?.
3. ¿Es una regla general que buenos absorbentes de la radiación son también buenos emisores?. ¿Son sus mediciones consistentes con esta regla?. Explique.
4. ¿Diferentes objetos, a aproximadamente la misma temperatura, emiten diferentes cantidades de radiación?.
5. ¿Puede usted encontrar materiales en el laboratorio que bloqueen la radiación térmica?. ¿Puede usted encontrar materiales que no bloqueen la radiación térmica?. (Por ejemplo, ¿sus ropas efectivamente bloquean la radiación térmica emitida por su cuerpo?).
6. ¿Qué sugieren sus resultados acerca del fenómeno de pérdida de calor a través de las ventanas?.
7. ¿Qué sugieren sus resultados acerca del efecto invernadero?.

Resistencia vs Temperatura para el cubo de radiación térmica.

Therm. Res. ( $\Omega$ )	Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	Therm. Res. ( $\Omega$ )	Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	Therm. Res. ( $\Omega$ )	Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	Therm. Res. ( $\Omega$ )	Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	Therm. Res. ( $\Omega$ )	Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	Therm. Res. ( $\Omega$ )	Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )
207,850	10	66,356	34	24,415	58	10,110	82	4,615.1	106	2,281.0	130
197,560	11	63,480	35	23,483	59	9,767.2	83	4,475.0	107	2,218.3	131
187,840	12	60,743	36	22,590	60	9,437.7	84	4,339.7	108	2,157.6	132
178,650	13	58,138	37	21,736	61	9,120.8	85	4,209.1	109	2,098.7	133
169,950	14	55,658	38	20,919	62	8,816.0	86	4,082.9	110	2,041.7	134
161,730	15	53,297	39	20,136	63	8,522.7	87	3,961.1	111	1,986.4	135
153,950	16	51,048	40	19,386	64	8,240.6	88	3,843.4	112	1,932.8	136
146,580	17	48,905	41	18,668	65	7,969.1	89	3,729.7	113	1,880.9	137
139,610	18	46,863	42	17,980	66	7,707.7	90	3,619.8	114	1,830.5	138
133,000	19	44,917	43	17,321	67	7,456.2	91	3,513.6	115	1,781.7	139
126,740	20	43,062	44	16,689	68	7,214.0	92	3,411.0	116	1,734.3	140
120,810	21	41,292	45	16,083	69	6,980.6	93	3,311.8	117	1,688.4	141
115,190	22	39,605	46	15,502	70	6,755.9	94	3,215.8	118	1,643.9	142
109,850	23	37,995	47	14,945	71	6,539.4	95	3,123.0	119	1,600.6	143
104,800	24	36,458	48	14,410	72	6,330.8	96	3,033.3	120	1,558.7	144
100,000	25	34,991	49	13,897	73	6,129.8	97	2,946.5	121	1,518.0	145
95,447	26	33,591	50	13,405	74	5,936.1	98	2,862.5	122	1,478.6	146
91,126	27	32,253	51	12,932	75	5,749.3	99	2,781.3	123	1,440.2	147
87,022	28	30,976	52	12,479	76	5,569.3	100	2,702.7	124	1,403.0	148
83,124	29	29,756	53	12,043	77	5,395.6	101	2,626.6	125	1,366.9	149
79,422	30	28,590	54	11,625	78	5,228.1	102	2,553.0	126	1,331.9	150
75,903	31	27,475	55	11,223	79	5,066.6	103	2,481.7	127		
72,560	32	26,409	56	10,837	80	4,910.7	104	2,412.6	128		
69,380	33	25,390	57	10,467	81	4,760.3	105	2,345.8	129		

Tabla 2.4: Resistencia en función de la temperatura para el cubo térmico.

Temperatura vs Resistividad para el Tungsteno

R/R <sub>300K</sub>	Temp °K	Resistivity $\mu\Omega$ cm	R/R <sub>300K</sub>	Temp °K	Resistivity $\mu\Omega$ cm	R/R <sub>300K</sub>	Temp °K	Resistivity $\mu\Omega$ cm	R/R <sub>300K</sub>	Temp °K	Resistivity $\mu\Omega$ cm
1.0	300	5.65	5.48	1200	30.98	10.63	2100	60.06	16.29	3000	92.04
1.43	400	8.06	6.03	1300	34.08	11.24	2200	63.48	16.95	3100	95.76
1.87	500	10.56	6.58	1400	37.19	11.84	2300	66.91	17.62	3200	99.54
2.34	600	13.23	7.14	1500	40.36	12.46	2400	70.39	18.28	3300	103.3
2.85	700	16.09	7.71	1600	43.55	13.08	2500	73.91	18.97	3400	107.2
3.36	800	19.00	8.28	1700	46.78	13.72	2600	77.49	19.66	3500	111.1
3.88	900	21.94	8.86	1800	50.05	14.34	2700	81.04	20.35	3600	115.0
4.41	1000	24.93	9.44	1900	53.35	14.99	2800	84.70			
4.95	1100	27.94	10.03	2000	56.67	15.63	2900	88.33			

Tabla 2.5:

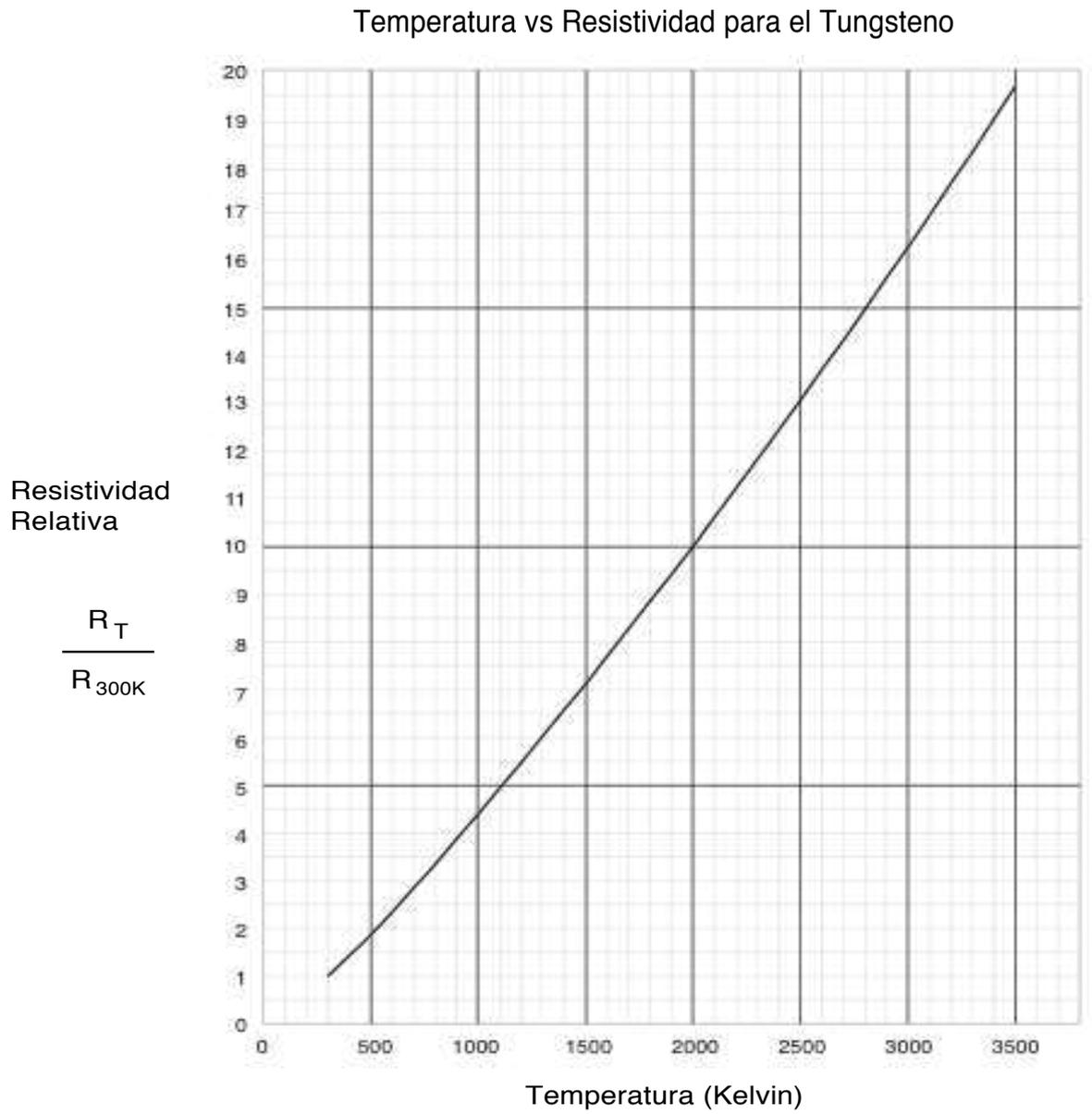


Figura 2.9: Resistencia del Tungsteno en función de la temperatura, obtenida de la tabla 7.5.