

Sistema de radiación térmica

F. Alberto Cardona-Maciel

Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías
Universidad de Guadalajara

23 de mayo de 2010

Resumen

Con ayuda de este experimento, mostramos que la radiación térmica de un cuerpo disminuye su intensidad de acuerdo a la ley del inverso al cuadrado. Mostramos también la ley de Stefan-Boltzmann. Este experimento consta de 3 partes

1. Ley de inverso al cuadrado,
2. Ley de Stefan-Boltzmann a altas y bajas temperaturas y
3. Radiación.

1. Marco teórico

La *radiación térmica* es la energía calorífica emitida por un cuerpo debido a su temperatura. Todos los cuerpos con temperatura superior a 0 K emiten radiación electromagnética, siendo su intensidad dependiente de la temperatura y de la longitud de onda considerada.

A temperatura ambiente, vemos los cuerpos por la luz que reflejan, dado que por sí mismos no emiten luz. Si no se hace incidir luz sobre ellos, si no se les ilumina, no podemos verlos. A temperaturas más altas, vemos los cuerpos debido a la luz que emiten, pues en este caso son luminosos por sí mismos. Así, es posible determinar la temperatura de un cuerpo de acuerdo a su color, pues un cuerpo que es capaz de emitir luz se encuentra a altas temperaturas.

Ley de inverso al cuadrado

Así como la fuerza de gravedad entre dos cuerpos es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa, la radiación térmica también obedece a esta ley. La figura 2 ilustra cómo la intensidad disminuye conforme la distancia se aleja.

Cuando preparamos un delicioso café y servimos en una taza de cerámica, podemos sentir que al acercar nuestra mano para tomarla, sentimos su radiación más intensamente, pero cuando alejamos, desaparece.

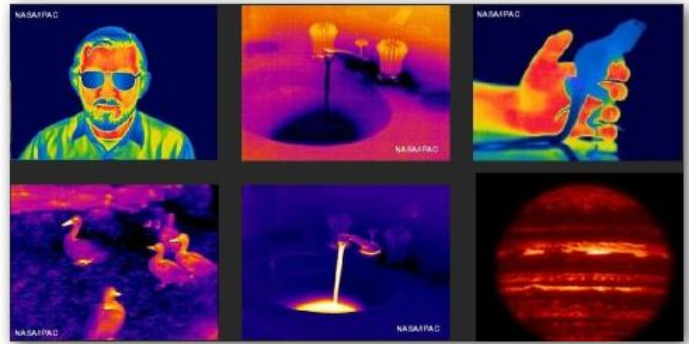


Figura 1: Color característico emitido por la radiación térmica de los cuerpos.

Radiación térmica y longitud de onda

Este fenómeno está descrito por la *ley de desplazamiento de Wien*

$$\lambda_{max}T = 2,898 \times 10^{-3}mK$$

donde λ_{max} es la longitud de onda característica máxima de un objeto que irradia calor. Por ejemplo, para un cuerpo humano cuya temperatura en la piel es de 35 grados Celcius, la longitud de onda de su radiación térmica característica es

$$\lambda_{max} = \frac{2,898 \times 10^{-3}mK}{308K} = 9,4\mu m$$

esto es, la radiación está en la región infrarroja y es invisible al ojo humano. Las serpientes, por ejemplo, pueden detectar a sus presas de sangre caliente. Sin embargo para el Sol, cuya temperatura superficial es de 5800 K,

$$\lambda_{max} = \frac{2,898 \times 10^{-3}mK}{5800K} = 0,50\mu m$$

que casi está en el centro del espectro visible, más o menos corresponde al color amarillo verdoso.

Ley de Stefan-Boltzman

Establece que un cuerpo emite radiación térmica con una

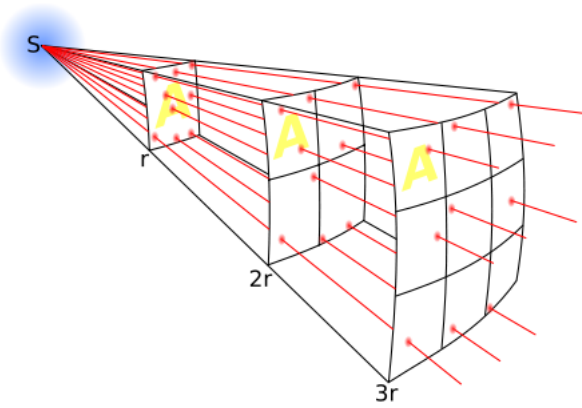


Figura 2: Ley de inverso al cuadrado.

potencia superficial proporcional a la cuarta potencia de su temperatura, i. e.,

$$E = \sigma \epsilon T^4$$

donde T es la temperatura de la superficie, σ es la constante de Stefan-Boltzmann con valor de $5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$. y ϵ es la emisividad, con valores entre 0 y 1. Hablamos del cuerpo negro cuando $\epsilon = 1$.

1.1. Antecedentes históricos

La carrera por la descripción del cuerpo negro fue comenzada a finales del siglo XIX, donde se trataba de establecer una descripción entre la intensidad de radiación térmica y la longitud de onda. Los primeros intentos fueron hechos por los científicos Rayleigh y Jeans, donde, para describir la distribución de energía de un cuerpo negro es útil definir la intensidad $I = I(\lambda, T)d\lambda$ como la potencia por unidad de área emitida en el intervalo de longitud de onda $d\lambda$. El resultado de un cálculo basado en un modelo clásico de la radiación de cuerpo negro conocido como la *ley de Rayleigh-Jeans* es

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi}{c} k_B T \lambda^4$$

donde k_B es la constante de Boltzmann. Dicha ley era casi adecuada, puesto que no se ajustaba a los datos experimentales de una línea continua de emisión. En 1900, Planck descubrió una fórmula para la radiación de cuerpo negro que concordaba por completo con los experimentos en todas las longitudes de onda,

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda k_B T} - 1)}.$$

El análisis de Planck llevó a describir una gráfica continua para distintas temperaturas, como se aprecia en la figura 3.

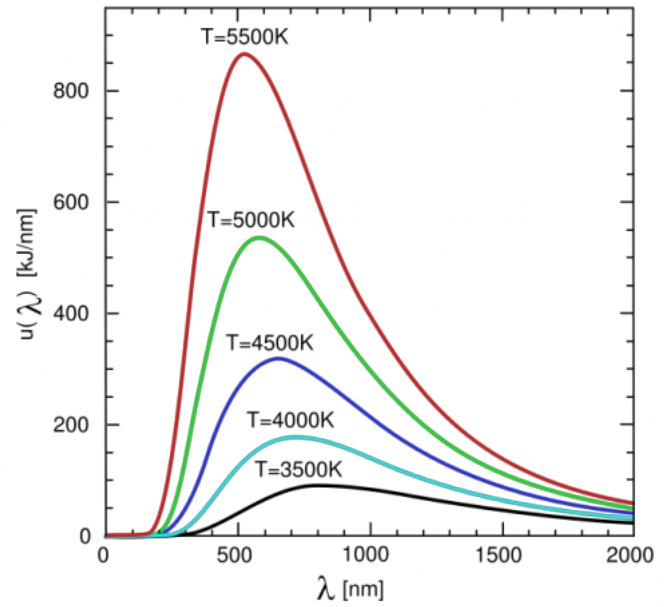


Figura 3: Intensidad de radiación de cuerpo negro versus longitud de onda a cinco temperaturas distintas. Observamos que la cantidad de radiación emitida (el área bajo una curva) aumenta con el incremento de la temperatura.

1.2. Datos esperados

Previamente leído el manual del experimento y en base al marco teórico, de cada experimento podemos esperar lo siguiente.

1. Ley de inverso al cuadrado.

Al realizar las mediciones esperamos, que la radiación térmica disminuya bajo dicha ley comparando sus promedios.

2. Ley de Stefan-Boltzmann a altas temperaturas.

Bajo las mediciones esperamos establecer la relación que existe entre la potencia de radiación y la temperatura.

3. Radiación.

La temperatura de los cuerpos radia (sale), esto lo podemos notar cuando su temperatura disminuye. Esperamos conocer que materiales pierden menos calor debido a sus propiedades químicas.

2. Bitácora de laboratorio

El experimento se realizó con éxito en 96 minutos con la colaboración del equipo y del profesor en el aula de electromagnetismo. Todos los integrantes del equipo colaboramos

y fue enriquecedor en el aspecto del desarrollo del experimento.

2.1. Material

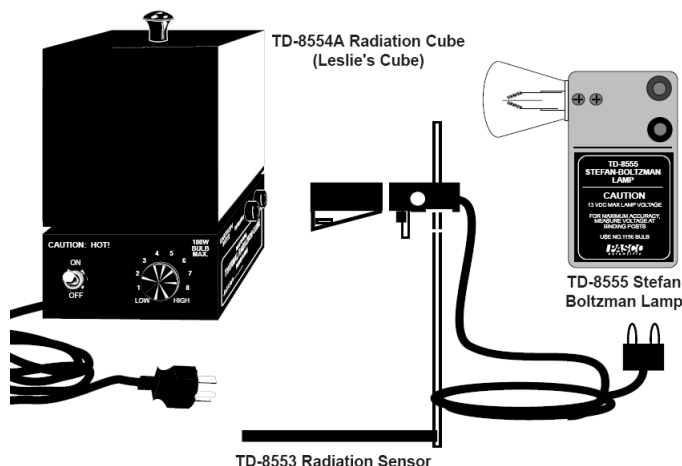


Figura 4: Sistema de radiación térmica by PASCO, modelo TD-8553/8554A/8555.

- Un sistema de radiación térmica by PASCO, modelo TD-8553/8554A/8555, como el de la figura 4.
- Agua a máxima y mínima temperaturas.
- 3 contenedores, uno de aluminio, uno de plástico y una de metal pintado de negro.
- 3 termómetros.
- Cables (bananas).
- Tres multímetros.
- Regla graduada (longitud 100 cm).
- Cronómetro.
- Fuente de voltage.

2.2. Instalación y Procedimiento

2.2.1. Ley del inverso al cuadrado

1. Desempacamos el sensor de radiación TD-8553, Lámpara de Stefan-Boltzmann TD-8555, la regla, el multímetro y los cables.
2. A lo largo de la mesa, colocamos la regla y la entrada del sensor de radiación a la altura de 0 cm y en dirección del filamento de la lámpara. Conectamos los cables del

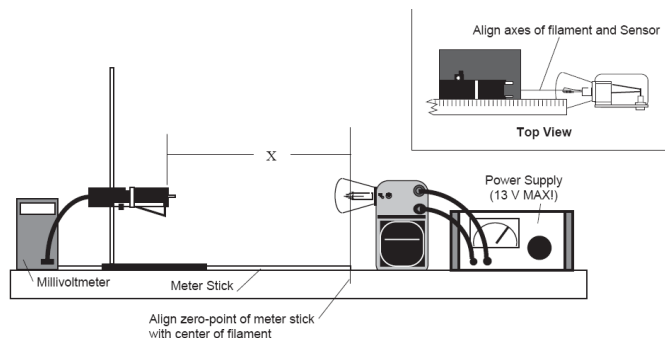


Figura 5: Esquema de arreglo para el experimento de la ley del inverso al cuadrado.

sensor de radiación al multímetro y lo encendemos en el rango de mV. Después colocamos el filamento del foco a 10 cm, según la regla, como se ilustra en la figura 5.

3. Una vez conectado el multímetro y el sensor de radiación, hacemos la prueba para obtener el nivel de radiación ambiente de la tabla 2.1 del manual de PASCO, y después obtenemos el promedio, mostrado en el cuadro 1 de este reporte.
4. Conectamos la fuente de poder con el foco a 13 V máximo!
5. Las mediciones deben ser rápidas, para evitar que el calor del filamento del foco tenga efecto sobre las mediciones.
6. Después hacemos las mediciones para llenar la tabla 2.2 del manual de PASCO que hemos colectado en el cuadro 2 de este reporte.

2.2.2. Ley de Stefan-Boltzmann a altas temperaturas

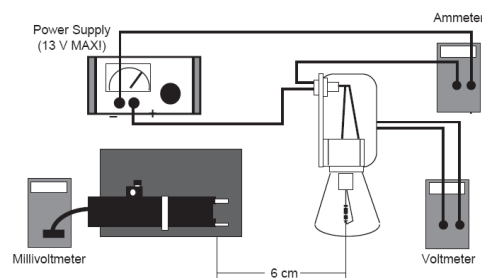


Figura 6: Esquema de arreglo para el experimento de la ley de Stefan-Boltzmann a altas temperaturas.

1. Colocamos sobre la mesa tres multímetros, la fuente de poder, sensor termoelectrico y la lámpara de Stefan-Boltzmann. Armamos el arreglo de la figura 7: un

1. Conectamos el voltímetro en la escala mV conectado al sensor termoelectrico, la lámpara a una distancia de 6 cm de la entrada del sensor, la fuente de poder alimentando la lámpara y en serie un amperímetro, el tercer voltímetro estará en paralelo con la lámpara, éste sirve para chacar la entrada del voltaje efectivo a la lámpara.
2. Checamos la temperatura de referencia T_{ref} y la resistencia de referencia del filamento de la lámpara R_{ref} .
3. Antes de encender, diremos que tomaremos 12 medidas dadas por la fuente de poder y el multímetro que está en paralelo con la lámpara. De modo que iniciamos con un voltaje de 1 V registrado en dicho voltímetro. Después a 2 V y así sucesivamente hasta llegar a 12 V, de acuerdo con la Tabla 3.1 del manual de PASCO.
4. Lo que registraremos será la intensidad de corriente i dada por el amperímetro y la radiación térmica dada por el voltímetro conectada al sensor Rad .
5. Dicho todo esto, comencemos a medir!

5. Una vez obtenidos los datos R_{rm} y T_{lab} , encendemos el cubo colocando con la perilla de la parte inferior una potencia de 10.
6. Cuando la temperatura esté al rededor de los 12 Celcius, equivalente a 64 kΩ del termistor, apagamos el cubo, quitamos la lámina y activamos el sensor y comenzamos a hacer mediciones para llenar la tabla 4.1 del manual de PASCO.

2.2.3. Radiación

Este experimento consiste en medir los cambios de temperatura de los cuerpos respecto al tiempo. Para este experimento necesitamos los tres contenedores, el agua caliente al extremo, los termómetros, el sensor de radiación y el voltímetro en el rango de mV. Realizamos este experimento bajo las siguientes indicaciones.

1. Conectamos el voltímetro al sensor de radiación y colocamos en el rango de mV.
2. Colocamos los tres contenedores en la mesa y con mucho cuidado, vaciamos el agua caliente en cada uno de ellos hasta llenarlos.
3. Insertamos inmediatamente un termómetro en cada uno de ellos y tomamos la temperatura en el tiempo cero, al igual que el nivel de radiación de cada contenedor.
4. Repetimos el procesimiento anterior en dos tiempos más.

2.3. Recolección e interpretación de datos observados

2.3.1. Ley del inverso al cuadrado

Obtuvimos las mediciones de los cuadros 1 y 2. Para el cuadro 1, tenemos el nivel de radiación ambiente y su promedio. En el cuadro 2, los datos corresponden cuando la lámpara está encendida a 13 V a distintos valores de la distancia. Las figuras 8 y 9 muestran el nivel de radiación vs distancia y vs inverso cuadrado de la distancia respectivamente. En las gráficas observamos lo siguiente.

- La figura 9, nivel de radiación vs inverso cuadrado de la distancia es más lineal que la de la figura 8. Esto quiere decir que el nivel de radiación está en función directa (lineal) con el inverso cuadrado de la distancia, es decir, la radiación que emite un cuerpo por su temperatura disminuye bajo la ley de inverso al cuadrado de la distancia.

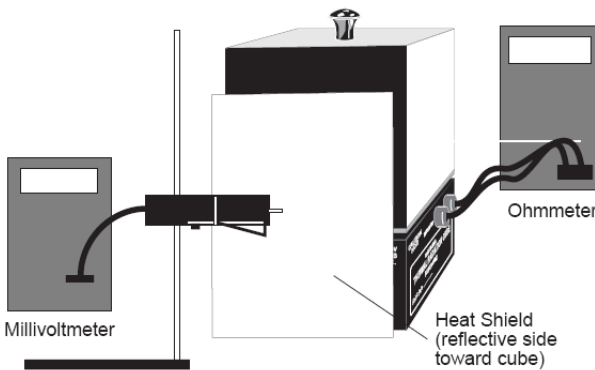


Figura 7: Esquema de arreglo para el experimento de la ley de Stefan-Boltzmann a bajas temperaturas.

1. Para esta parte del experimento, colocamos en la mesa el sensor de radiación, un voltímetro, un cubo de radiación térmica y un ohmmetro.
2. Montamos el arreglo como el de la figura 7. El sensor de radiación debe estar colocado directamente al centro de una de las superficies de la cara del cubo.
3. Cuando el cubo está apagado, mide la resistencia R_m del termistor a temperatura del laboratorio.
4. Entre la cara del cubo y el sensor colocamos una superficie con cara reflejante, que puede ser una lámina delgada de metal.

Cuadro 1: Nivel de radiación ambiente (Nra).

x (cm)	Nra (mV)
10	0.1
20	0.1
30	0.1
40	0.1
50	0.1
60	0.0
70	0.0
80	0.0
90	0.1
100	0.0
$Nra_{promedio}$	0.06

- Los adtos obtenidos afirman y sostienen la ley del inverso al cuadrado que establece que la energía por unidad de área emitida por una fuente puntual de radiación decrece bajo la relación del inverso cuadrado de la distancia, conforme ésta aumenta.
- Dicho lo anterior, la el finalemto de la lámpara de Stefan-Boltzmann utilizada debe comportarse como una fuente puntual de radiación. Podemos corregir este problema fijando una placa pegada a la lámpara con un pequeño agujero para que deje salir luz en dirección al sensor de radiación.

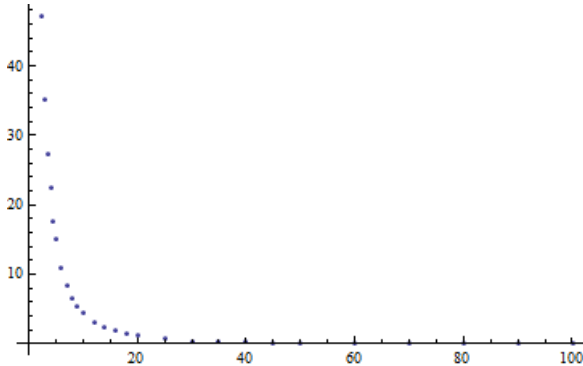


Figura 8: Gráfica del nivel de radiación ambiente vs distancia del cuadro 2.

Como observamos en la figura 9, que es basada en los datos de las columnas 3 y 4 del cuadro 2, vemos una dependencia lineal del nivel de radiación (eje vertical) y el inverso cuadrado de la distancia.

2.3.2. Ley de Stefan-Boltzmann a altas temperaturas

1. Registramos la temperatura del laboratorio T_{ref} y resistencia R_{ref} de referencia del filamento de la lámpara

Cuadro 2: Distancia y niveles de radiación.

x (cm)	Rad (mV)	$\frac{1}{x^2}$	Rad-Amb (mV)
2.5	47.2	0.1600	47.14
3	35.2	0.1111	35.14
3.5	27.2	0.0816	27.14
4	22.4	0.0625	22.34
4.5	17.7	0.0494	17.64
5	15	0.0400	14.94
6	10.8	0.0278	10.74
7	8.3	0.0204	8.24
8	6.5	0.0156	6.44
9	5.4	0.0123	5.34
10	4.4	0.0100	4.34
12	3.1	0.0069	3.04
14	2.4	0.0051	2.34
16	1.8	0.0039	1.74
18	1.4	0.0031	1.34
20	1.2	0.0025	1.14
25	0.7	0.0016	0.64
30	0.4	0.0011	0.34
35	0.3	0.0008	0.24
40	0.2	0.0006	0.14
45	0.1	0.0005	0.04
50	0.1	0.0004	0.00
60	0.0	0.0003	0.0
70	0.0	0.0002	0.0
80	0.0	0.0002	0.0
90	0.0	0.0001	0.0
100	0.0	0.0001	0.0

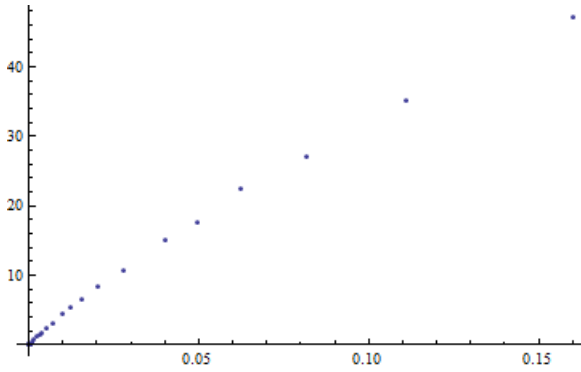


Figura 9: Gráfica del nivel de radiación ambiente vs inverso cuadrado de la distancia del cuadro 2.

de Stefan-Boltzmann:

$$T_{ref} = 296,3K$$

$$R_{ref} = 0,6\Omega.$$

- Después comenzamos encendiendo la fuente de poder a 1 V, según el voltímetro y vaciamos los datos en las columnas 2 y 3 del cuadro 3.

Después calculamos la columna 4 referente a la resistencia utilizando los datos de la columna 1 y 2 bajo la ecuación

$$R = \frac{V}{i}.$$

- Después calculamos la temperatura de del filamento de la lámpara en cada voltaje con la ecuación

$$T = \frac{R - R_{ref}}{\alpha} + T_{ref}$$

donde T es la temperatura buscada a cada voltaje, R resistencia a la temperatura T , T_{ref} temperatura del laboratorio, R_{ref} resistencia a la temperatura del laboratorio y α el coeficiente de resistividad para el filamento de tungsteno con valor de $4,5 \times 10^{-3} \frac{1}{K}$. Dicha ecuación es válida sólo para cambios de temperatura pequeños.

- Por último, utilizamos cada valor de la columna 5 para elevarlo a la cuarta potencia y llenar la columna 6 del cuadro 3.

La ley de Stefan-Boltzmann relaciona R , que es la potencia por unidad de área por parte de un objeto con la temperatura absoluta T de dicho objeto. La relación matemática es

$$R = \sigma T^4$$

donde $\sigma = 5,6703 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$. La figura 10, basada en los datos de las columnas 3 y 6 del cuadro 3, nos muestra una

Cuadro 3: Datos del experimento de Stefan-Boltzmann para altas temperaturas. La columna de T^4 están en $\times 10^{12}$.

V(V)	i(A)	Rad(mV)	R(Ω)	T(K)	T ⁴ (K ⁴)
1	0.9	0.3	1.11	364.45	0.0176
2	1.16	0.6	1.72	712.65	0.258
3	1.38	1.3	2.17	879.23	0.598
4	1.56	2.2	2.56	1023.75	1.1
5	1.74	3.5	2.87	1138.36	1.68
6	1.91	4.8	3.14	1235.54	2.35
7	2.07	6.4	3.38	1326.54	3.1
8	2.22	7.9	3.60	1408.75	3.94
9	2.35	9.7	3.83	1492.52	4.96
10	2.47	11.3	4.05	1573.55	6.13
11	2.6	13.4	4.23	1641.03	7.25
12	2.74	15.5	4.38	1696.14	8.28

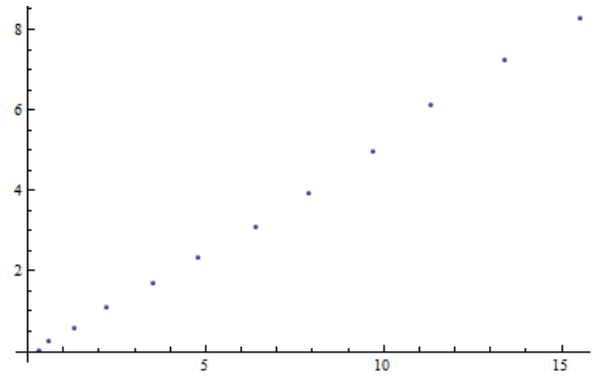


Figura 10: Nivel de radiación vs cuarta potencia de la temperatura. Eje horizontal en unidades de $\times 10^{12} K^4$ y vertical en mV.

relación lineal entre la radiación que emite un cuerpo y la temperatura a la cuarta potencia. La pendiente nos permite establecer la igualdad, que está dada por

$$m = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{(4,8 - 2,2)mV}{(2,35 - 1,1) \times 10^{12} K^4} = 2,08 \times 10^{-12} \frac{mV}{K^4}$$

correspondiente a $2,08 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$, muy cercano al valor real de σ .

2.3.3. Radiación

Con termómetros dentro de los contenedores y el sensor conectado al voltímetro, logramos obtener las medidas del cuadro 4 cada cinco minutos. Observamos que el frasco hecho de aluminio tarda más en radiar su calor que los otros dos, puesto que en los tres tiempos de toma de lectura el trasco de aluminio conservó su nivel de radiación casi estable.

Cuadro 4:

-	Aluminio	Plastico	Negro
T_{int} (C)	70.6	73.8	71.3
Rad (mV)	3.9	5.4	5.1
T_{int} (C)	66.5	70.4	68.9
Rad (mV)	3.9	5.1	4.7
T_{int} (C)	66.5	66.4	67.8
Rad (mV)	3.8	4.6	4.5

Podemos decir, como dato curioso, que los termos en los que conservamos caliente nuestro café, en su interior contienen una cobertura plateada, esto sirve para reflejar el calor y quede de nuevo en la sustancia, en este caso el café.

2.4. Contraste con los datos esperados

1. Los datos arrojados a la gráfica de la figura 9, nos muestran cómo el nivel de radiación está en función lineal con el inverso cuadrado de la distancia, tal como esperábamos.
2. La ley de Stefan-Boltzmann es representada por la gráfica de la figura 10, en la dependencia lineal que existe en la radiación y la temperatura a la cuarta potencia, tal como esperábamos.
3. La pendiente de nuestra gráfica de la figura 10 es de valor muy similar al de σ , constante de proporcionalidad entre la radiación y la temperatura a la cuarta potencia.
4. La radiación disminuye con el tiempo, es decir, la radiación pierde su intensidad respecto al tiempo.
5. Sin embargo, la pérdida de calor en forma de radiación está en función del material, puesto que observamos que para el aluminio es más lenta que para el contenedor de plástico y el de color negro.

3. Conclusiones

1. La radiación que emite un cuerpo debido a su temperatura puede ser medida en función de la distancia. Su intensidad disminuye en relación al inverso cuadrado de la distancia (fig. 9).
2. La gráfica de radiación contra inversi cuadrado de la distancia es más lineal que la de radiación contra distancia. La característica de la lámpara de no ser una fuente puntual nos lleva a que la gráfica no sea una línea estrictamente recta. Pero nosotros consideramos

al filamento como una fuente puntual, basado en la proporción de las distancias medidas por la regla (máximo de 100 cm) y la longitud del filamento.

3. Podemos corregir al filamento como una fuente puntual con una pequeña lámina con un agujero donde pase la luz en dirección hacia el sensor.
4. Dicho lo anterior, las mediciones obtenidas de la lámpara de Stefan-Boltzmann nos permiten una confianza para establecer la proporcionalidad entre la radiación y la temperatura.
5. En la figura 10, no tenemos una línea estrictamente recta, esto es debido a que el filamento no es una fuente puntual, como se mencionó anteriormente, y por las temperatura variable que adquirió durante el experimento.
6. Las mediciones que realizamos en los contenedores hechos de distintos materiales y con agua en su interior reflejan que el aluminio es un buen retenedor de calor, puesto que en las mediciones y durante 15 minutos conservó su temperatura casi constante al igual que su nivel de radiación. Los otros dos, uno de plástico y otro pintado de negro, perdieron calor reflejado en su temperatura y en su nivel de radiación medido por el sensor y el multímetro.
7. Es importante señalar que las medidas que se tomaron fueron hechas con alta rapidez, esto para evitar pérdidas de energía, afectaciones por el ambiente o nuestros cuerpos, etc.