

Radiación de un cuerpo negro y uno plateado

Walter Bussenius Cortada⁸

Instituto de Matemática y Física
Universidad de Talca

Resumen:

Se presenta un experimento, realizado con material de bajo costo, que permite verificar la ley de Stefan-Boltzmann. Se trabaja en forma cualitativa, apreciando las curvas de calentamiento y enfriamiento de dos cuerpos de similares características que sólo difieren en el color de su superficie exterior. Se logra determinar que el de color negro absorbe e irradia más energía que el plateado.

En un segundo experimento, más cuantitativo, se mide la potencia irradiada por dos cuerpos y las temperaturas superficiales de los mismos. El experimento permite obtener la relación de la energía irradiada por unidad de tiempo con la cuarta potencia de la temperatura y también comparar el coeficiente de emisividad para dos cuerpos de diferente color.

La simpleza del experimento permite ser realizado por alumnos universitarios de pregrado y, mediante una ayuda más guiada, también es posible trabajarlo con alumnos de Enseñanza Media.

En él son suficientes una fuente de poder, un termómetro digital, un amperímetro, un voltímetro, un par de ampollitas de vehículo, papel de aluminio y pintura negra de chimenea.

Introducción:

En Física existe leyes que resultan evidentes porque guardan estrecha relación con nuestra vivencia diaria, por ejemplo, cuando en verano usamos ropa oscura notamos que al ponernos al Sol dichas prendas se calientan rápidamente. Por nuestra vivencia diaria tenemos claro que, al estar en contacto con los rayos del Sol, si portamos ropa oscura ésta se calentará más de prisa que si llevamos ropa de color claro. Esta es una ley de la naturaleza y de ella podemos deducir que: si ponemos al Sol dos tarros conteniendo agua fría en su interior, uno plateado y el otro pintado de negro, se calentará más de prisa el que esta pintado de negro respecto del plateado. No obstante lo anterior, esa misma ley del cuerpo negro también dice que si llenamos con agua caliente dos tarros, uno negro y otro plateado, al ponerlos a la sombra el oscuro se enfriará más rápido. Esto se debe a la misma propiedad, dado si es mejor para absorber la energía también tendrá que ser mejor para irradiarla. Esta segunda parte de la ley no es tan evidente porque no la vivenciamos.

En este trabajo se presenta experimentos correspondientes a ambas situaciones. Además se hace un estudio de la relación entre la potencia radiada por un cuerpo y la temperatura de aquél, análisis que también se realizó con un cuerpo negro y otro plateado. Este segundo estudio

⁸ wbussen@utalca.cl

se llevó a cabo empleando dos ampollitas. Ambas se forraron con papel de aluminio, uno se dejó plateado mientras el otro se pintó de negro y se estudió la potencia irradiada en función de la temperatura. Dado que en esta actividad se mide potencia irradiada y temperatura, permite determinar la relación entre dichas variables, es decir, la ley de Stefan-Boltzmann; el experimento permite constatar también que la temperatura del cuerpo negro es inferior a la del plateado para la misma potencia irradiada.

Los objetivos que permite alcanzar el presente trabajo son:

- ❖ Comparar curvas tanto el calentamiento como el enfriamiento de un cuerpo negro con uno plateado.
- ❖ Contrastar la ley de Steffan-Boltzmann para un cuerpo negro y uno plateado que irradian energía.

Teoría:

Análisis cualitativo

Un cuerpo negro es un objeto capaz de absorber toda la energía que recibe, para así reemitirla después (ver ref.1).

Así al poner bajo la luz del Sol dos cuerpos, uno negro y otro plateado, el negro absorberá toda, o casi toda, la energía que recibe. En cambio el plateado absorberá sólo una parte de la radicación que recibe y otra parte al reflejará. De manera que es esperable que el cuerpo de color negro aumente más de prisa su temperatura; esta idea se bosqueja en el gráfico 1a.



Gráfico 1 a

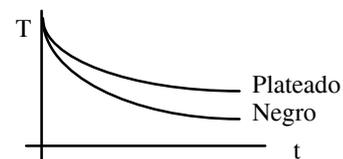


Gráfico 1 b

Al presentarse la situación opuesta, es decir, dejar dos cuerpos de diferente color y a una elevada temperatura en un lugar oscuro y frío (donde es más la radiación que emiten que la que reciben), debería constatarse una mayor radiación emitida por el cuerpo negro en relación al otro, por ello la temperatura del cuerpo negro debería bajar más de prisa; esta idea se bosqueja en el gráfico 1 b.

Análisis cuantitativo

En un análisis cuantitativo, la ley de radiación de un cuerpo, más conocida como ley de Stefan-Boltzmann se expresa mediante:

$$P = A \sigma \varepsilon (T^4 - T_0^4) \tag{1}$$

donde **A** es el área del cuerpo que irradia, **T** la temperatura absoluta en la superficie de aquél, **T₀**

la temperatura ambiente, también expresada en grados Kelvin, ϵ un coeficiente que en un cuerpo negro vale **1** y σ una constante universal cuyo valor es $\sigma = 5,67 \exp(-8) [\text{W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)]$ (ver ref. 1). Esta ley expresa que la potencia neta que irradia un cuerpo es la diferencia entre lo que emite al ambiente ($A \sigma \epsilon T^4$) y la que recibe del ambiente ($A \sigma \epsilon T_0^4$).

Para hacer cuantitativo el análisis anterior en base a dicha ley será necesario disponer de dos cuerpos de diferente color, además es necesario conocer la energía irradiada por dichos cuerpos. Puesto que en el transporte de calor siempre están presentes los fenómenos de convección y conducción además del de radiación, para estudiar sólo este último se hace necesario disponer de un cuerpo en el que la conducción y convección sean despreciables. Esto se puede lograr haciéndole llegar energía al cuerpo en otra forma y logrando que alcance una alta temperatura y así la radiación prime sobre las otras formas de propagación de calor.

Tomemos una ampollita, recubramosla o pintémosla con algo (algún material no transparente) de manera que absorba toda la energía que emite su filamento, de este modo la superficie de ella reemitirá la energía que recibe del filamento, y aquélla será mucho mayor que la escasa radiación que pudiera recibir del ambiente, de manera que la superficie exterior de dicha ampollita se comportará como un radiador, por lo cual entre la temperatura de dicha superficie y la potencia irradiada por aquélla, deberá satisfacer la ley de Stefan- Boltzmann.

Recordemos que la energía que emite el filamento por unidad de tiempo se puede determinar mediante la expresión:

$$P = I V \quad (2)$$

donde **P** denota la potencia, **V** el voltaje aplicado e **I** la corriente que circula por aquél.

De este modo, cuando el sistema alcance el equilibrio térmico y despreciando la pérdida de energía por convección y conducción, la temperatura en la superficie de la ampollita se relaciona con la potencia que ésta irradia mediante la expresión (1). A objeto de contrastar experimentalmente dicha expresión y poder establecer una comparación entre teoría y experimento, resulta práctico graficar las variables potencia (**P**) versus temperatura elevada a la cuarta potencia (T^4). Al confeccionar dicho gráfico la curva esperada es una recta, cuya pendiente corresponde al producto de términos ($A \sigma \epsilon$) y el punto en que esa recta corta el eje de las ordenadas sería dicho producto multiplicado por la temperatura ambiente elevada a la cuarta potencia ($- A \sigma \epsilon T_0^4$). esto se aprecia mejor en la expresión (3).

$$P = A \sigma \epsilon T^4 - A \sigma \epsilon T_0^4 \quad (3)$$

Así el gráfico 2 a expresa esta situación.

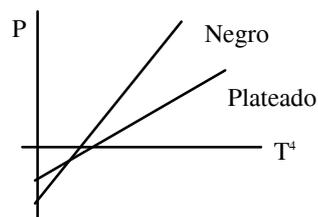


Gráfico 2 a

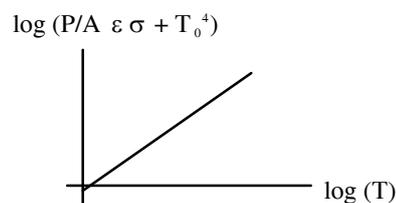


Gráfico 2 b

Para visualizar la dependencia de la cuarta potencia con la temperatura resulta útil graficar las variables $\log (P/A \sigma \varepsilon + T_0^4)$ versus $\log (T)$, gráfico cuya curva esperamos que sea una recta que pase por el origen y su pendiente debería corresponder al exponente de la temperatura (4) como muestra el gráfico 2b; la expresión entre las variables toma la forma:

$$\log (P/A \sigma \varepsilon + T_0^4) = 4 \log (T) \tag{4}$$

la que resulta fácil de contrastar experimentalmente.

Materiales:

- 1 tarro de pintura para chimenea
- 2 tarros metálicos (uno pintado de negro y el otro no)
- 2 ampolletas de automóvil (de 24 Volts y 20 Watts)
- 1 termómetro digital (termocupla)
- 1 Voltímetro (0 - 25 Volt DC)
- 1 Amperímetro (0 - 1 Amper DC)
- 1 Fuente de poder con voltaje variable 0 - 25 Volt
- 2 Trozo de papel de aluminio de 20 x 20 cm.
- Cables, soportes, bases y nueces para montaje

Experimento:

Experimento cualitativo

A continuación se presenta un experimento cualitativo que muestra cómo un cuerpo negro absorbe más energía que uno plateado al ponerlos al sol, para ello se usó sendos tarros metálicos, uno de los cuales se pintó de negro. Ambos se llenaron con agua a temperatura cercana a los 0 °C. al permanecer más de dos horas al sol la curva de calentamiento acusa una significativa diferencia.

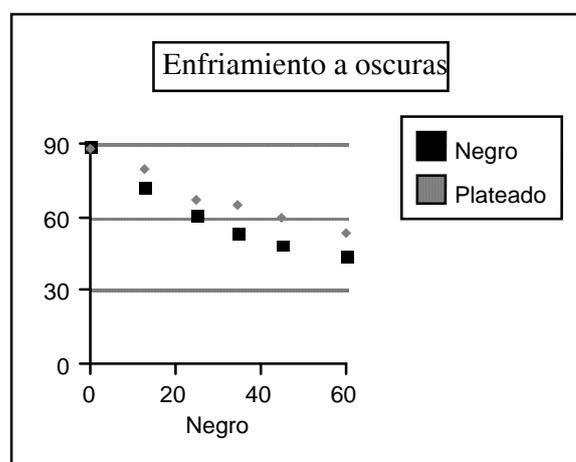
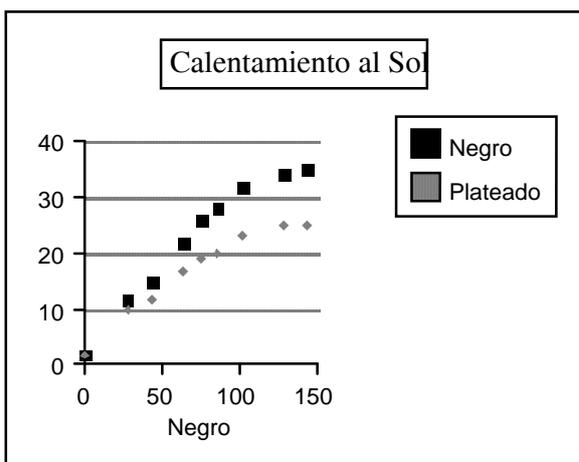
El experimento anterior se revirtió, para ello se empleó los mismos tarros, sólo que se les

llenó con agua caliente, temperatura cercana a los 90 °C y se dejaron enfriar por espacio de una hora en un lugar cuya temperatura ambiente bordeaba los 20 °C y en el cual había oscuridad.

Ambos cuerpos acusan una marcada diferencia en la disminución de su temperatura.

Calentamiento al Sol			
Negro		Plateado	
t (min)	T (°C)	t (min)	T (°C)
0	2	0	2
28	12	28	10
43	15	43	12
63	22	63	17
75	26	75	19
85	28	85	20
102	32	102	23
128	34	128	25
144	35	144	25

Enfriamiento a oscuras			
Negro		Plateado	
t (min)	T (°C)	t (min)	T (°C)
0	89	0	88
13	72	13	80
25	61	25	67
35	54	35	65
45	49	45	60
60	43	60	54



Experimento cuantitativo

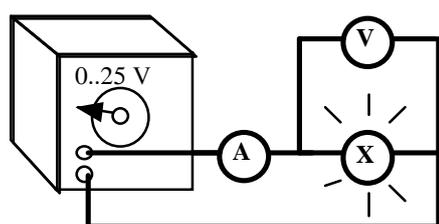
Se conecta una ampollita a una fuente de voltaje regulable (0 - 25 Volt) de modo que se pueda medir corriente y voltaje en ella (ver fig. 2). Para medir temperatura en la superficie de la ampollita, se cubre ésta con papel de aluminio, dejando el termómetro digital (termocupla) en la parte superior de la ampollita y bajo el papel de aluminio.

Para efecto de calcular el área que irradia se supuso a la ampollita de forma esférica, de este modo se usó la expresión:

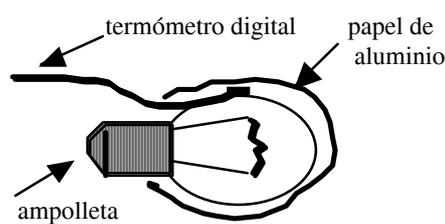
$$A = 4 \pi (d/2)^2 \tag{5}$$

en que d corresponde al diámetro de la ampollita.

Una vez montado el experimento, para medir se procedió a aplica el máximo voltaje posible a una de las ampollitas, que puede ser entre 20 y 25 (V), luego se esperó un tiempo suficiente para que alcance el equilibrio térmico y se registró valores de voltaje, corriente y temperatura. Al ir bajando el voltaje se soplaba la ampollita para favorecer el enfriamiento y así completar la tabulación más rápidamente.



(Fig. 1)



(Fig. 2)

Las mediciones se realizaron cada un volt y se tabularon como se muestra a continuación. Luego se procedió de igual forma para la otra ampollita.

Se procedió a graficar la potencia recibida por la ampollita en función de la cuarta potencia de a temperatura absoluta. Como se mencionó en la teoría, la curva esperada es una recta. Efectivamente las curvas obtenidas para ambas ampollitas se aproximan en buena medida a una recta, cuya pendiente representa el producto del área (A) por el coeficiente de emisividad (ϵ) y por la constante de radiación (σ). Las funciones de las rectas vienen dadas por:

$$\text{Plateado} \quad P = (0,65 \pm 0,02) 10^{-10} T^4 - 2,1 \pm 0,3 \tag{6 a}$$

$$\text{Negra} \quad P = (2,00 \pm 0,06) 10^{-10} T^4 - 1,6 \pm 0,3 \tag{6 b}$$

estas expresiones nos permiten confiar en que la ley parece verificarse ya que pese a las estimaciones de parámetros como el área de la ampollita, al asumir que se trata de un cuerpo negro, efectivamente se obtiene un valor cercano al de la constante de radiación.

Al intentar contrastar la expresión (4) y reemplazar el valor de la pendiente de las funciones de las rectas anteriores en el término que divide a la potencia, se obtiene las rectas:

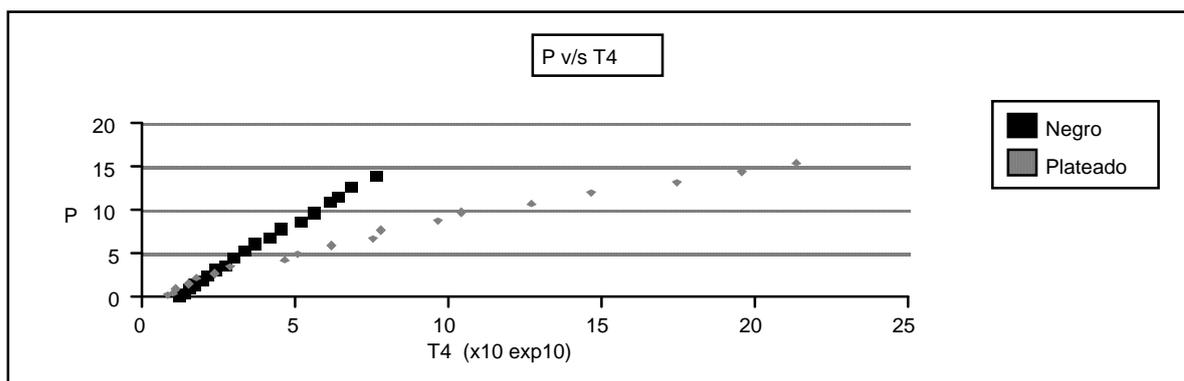
$$\text{Plateado} \quad \log (P/0,65 \cdot 10^{-10} + T^4) = 3,07 \pm 0,02 \log (T) - 2,6 \pm 0,2 \tag{7 a}$$

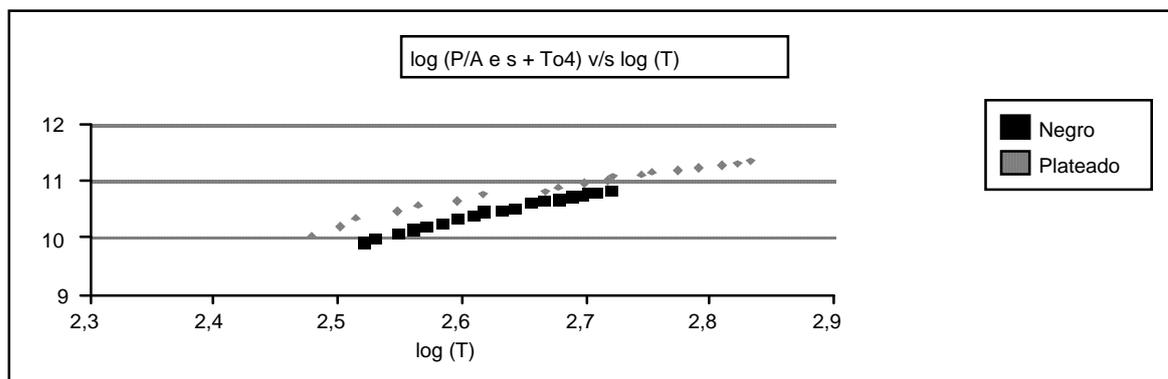
$$\text{Negro} \quad \log (P/2,00 \cdot 10^{-10} + T^4) = 4,56 \pm 0,09 \log (T) - 1,5 \pm 0,2 \tag{7 b}$$

en las que el valor de la pendiente se acerca al esperado (4.0) y que es el exponente de la temperatura absoluta.

Cuerpo Negro				
Dif Pot.	Corrien	Temp	T Ab	Pot
(V) ±0,1	(A) ±0,1	(°C) ±1	(°K) ±1	(W)
20	0,76	280	553	15,20
19	0,74	253	526	14,06
18	0,71	238	511	12,78
17	0,69	229	502	11,73
16	0,68	224	497	10,88
15	0,65	213	486	9,75
14	0,63	203	476	8,82
13	0,61	188	461	7,93
12	0,59	178	451	7,08
11	0,56	165	438	6,16
10	0,54	154	427	5,40
9	0,50	141	414	4,50
8	0,48	132	405	3,84
7	0,45	121	394	3,15
6	0,42	110	383	2,52
5	0,38	100	373	1,90
4	0,35	90	363	1,40
3	0,32	80	353	0,96
2	0,27	66	339	0,54
1	0,22	58	331	0,22
0	0,00	25	298	0,00

Cuerpo Plateado				
Dif Pot.	Corrien	Temp	T Ab	Pot
(V) ±0,1	(A) ±0,1	(°C) ±1	(°K) ±1	(W)
20	0,85	424	697	17,00
19	0,82	407	680	15,58
18	0,80	392	665	14,40
17	0,78	373	646	13,26
16	0,75	346	619	12,00
15	0,72	324	597	10,80
14	0,70	295	568	9,80
13	0,68	284	557	8,84
12	0,65	256	529	7,80
11	0,62	251	524	6,82
10	0,59	225	498	5,90
9	0,56	202	475	5,04
8	0,53	191	464	4,24
7	0,50	140	413	3,50
6	0,46	121	394	2,76
5	0,43	94	367	2,15
4	0,39	80	353	1,56
3	0,34	54	327	1,02
2	0,30	45	318	0,60
1	0,23	28	301	0,23
0	0,00	22	295	0,00





Conclusiones:

- Los objetivos planteados se cumplen satisfactoriamente.
- El usar una ampolleta de esas características es debido a que la mayoría de las fuentes de poder poseen ese rango de voltajes y a que su precio es bajo.
- La pendiente en el gráfico logarítmico se aproxima a 4 y el valor de σ es al menos del orden de magnitud.
- El tiempo que toma realizar cada experimento es de alrededor de 2 hora cronológica, no obstante con un menor número de mediciones es factible de reducir.
- El experimento es sencillo y puede realizarse con material de bajo costo.
- Nótese que si se grafica los logaritmos de las variables de potencia y temperatura absoluta la curva obtenida no corresponde a una recta, salvo en la zona de altas temperaturas, en la cual la radiación recibida por la ampolleta desde el ambiente puede ser despreciada.
- Los coeficientes de correlación en las rectas expresadas es siempre superior a 0,99.

Bibliografía:

1. Zemansky, Mark *Calor y Termodinámica*. Editorial Aguilar 1973.

