

# Determinación de la constante de Stefan-Boltzmann a partir de dos sistemas (Hollín - Cobre, Esmalte Acrílico - Cobre) como cuerpos grises.

Pérez Flores Julio Alfonso\*

Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.†

(Dated: 9 de noviembre de 2024)

Se determinó la constante de Stefan-Boltzmann para dos sistemas: un cable de cobre recubierto con hollín y otro recubierto con esmalte acrílico negro, ambos considerados cuerpos grises. La determinación se realizó de forma indirecta mediante un circuito resistivo, manteniendo el alambre en condiciones de bajo vacío y aumentando gradualmente la potencia eléctrica hasta que el alambre alcanzó temperaturas elevadas. Se obtuvieron los siguientes valores promedio: para el sistema hollín-cobre,  $6.25 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$  con una desviación estándar de  $1.27 \times 10^{-8}$ , y para el sistema esmalte acrílico-cobre,  $6.15 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$  con una desviación estándar de  $1.37 \times 10^{-8}$ . Estos valores presentan errores porcentuales del 10.18 % y 8.48 %, respectivamente, con base en la constante de Stefan-Boltzmann teórica reportada en la literatura, y calculada de forma teórica en función de otras constantes fundamentales ( $k$ ,  $h$ ). Además, se realizó una comparación de similitud con un cuerpo negro, siendo el sistema esmalte acrílico-cobre el más cercano a un comportamiento de cuerpo negro. Se realiza una revisión a la metodología para reducir factores aleatorios en la determinación de la constante y disminuir la desviación estándar

Keywords: Stefan-Boltzmann constant.

## I. INTRODUCCIÓN

### A. Derivación ley de Stefan-Boltzmann.

Todo objeto con una temperatura superior al cero absoluto emite radiación electromagnética en una amplia gama de longitudes de onda. Esta emisión resulta del movimiento aleatorio de partículas (átomos y moléculas) en el objeto, asociado a su energía térmica y, por lo tanto, a su temperatura.

Este tipo de radiación se conoce como radiación térmica o radiación de cuerpo negro. Un cuerpo negro es un objeto teórico ideal que absorbe completamente toda la luz incidente sin reflejar ninguna, y emite radiación de manera perfecta en todas las longitudes de onda. La intensidad de esta emisión alcanza un valor máximo en una longitud de onda específica. Max Planck describió matemáticamente la densidad espectral de esta radiación electromagnética emitida por un cuerpo negro en equilibrio térmico a una temperatura dada [1]. A partir de esto, se deriva la ley de Stefan-Boltzmann, que relaciona la emisión radiante de un cuerpo negro ideal en equilibrio térmico con su temperatura absoluta, siendo una herramienta fundamental en el estudio de cuerpos celestes como las estrellas entre otras áreas. [2]

Varios autores [3], [4], [5], [6] aunque principalmente Condon y Ransom [3], y Haggstrom [4] muestran que dada la ley de Planck sobre la radiación espectral de un cuerpo negro con frecuencia  $\nu$  y temperatura absoluta  $T$ , con  $k$  la constante de Boltzmann (ec. 1), si se desea conocer La potencia radiada por una superficie de área  $A$  a través de un ángulo sólido  $d\Omega$  en el El rango de frecuencia diferencial ( $\nu$ ,  $\nu + d\nu$ ) a partir de esta ley se obtiene la expresión 3

$$U_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1} \quad (1)$$

$$\frac{P}{A} = \int_0^\infty U_\nu(T) \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos\theta \sin\theta d\theta = \pi \int_0^\infty U_\nu(T) \quad (2)$$

realizando el cambio de variable  $u = \frac{h\nu}{kT}$  se obtiene el desarrollo de la ecuación 3

$$\frac{P}{A} = I = \frac{2\pi k^4 T^4}{c^2 h^3} \int_0^\infty \frac{u^3}{\exp(u) - 1} du \quad (3)$$

integrando que puede ser representado mediante serie de potencias (ec. 4), y para cada uno de los terminos se obtiene como resultado de la integral la expresión de la ecuación 5, de tal forma que se obtiene el siguiente resultado (ec. 6)

$$I = \frac{2\pi k^4 T^4}{c^2 h^3} \int_0^\infty u^3 \left( \sum_{m=1}^\infty \exp(-mu) \right) du \quad (4)$$

$$\int_0^\infty u^3 e^{(-mu)} du = \frac{6}{m^4} \quad (5)$$

$$I = \frac{2\pi k^4 T^4}{c^2 h^3} \int_0^\infty u^3 \left( \sum_{m=1}^\infty e^{(-mu)} \right) du = \frac{2\pi k^4 T^4}{c^2 h^3} \Gamma(4) \sum_{m=1}^\infty \frac{1}{m^4} \quad (6)$$

expresión que converge a la la función zeta de Riemann evaluada  $\Gamma(4)\zeta(4)$ , y reorganizando obtenemos la ecuación ec. 7, de tal forma que se obtiene la ley de Stefan-Boltzmann.

$$I = \frac{12\pi k^4 T^4}{c^2 h^3} \frac{\pi^4}{90} = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} T^4 = \sigma T^4 \quad (7)$$

Otro resultado significativo para el estudio de cuerpos negros es la ley de desplazamiento de Wien (8), la cual establece una relación entre el máximo de emisión de un

\* julio\_perez@ciencias.unam.mx

† Reporte práctica Laboratorio Contemporánea I, Semestre 2025-1.

cuerpo negro y su temperatura [7], esta ley es derivada de la resolución del máximo de la radiación espectral de un cuerpo negro con frecuencia  $\nu$  y temperatura absoluta  $T$ , y cuya solución esta dada por la función  $W$  de Lambert, y cuyos desarrollo completo puede ser apreciado en [8][9]

$$\lambda_{\max} T = 2.898 \times 10^{-3} [mK] \quad (8)$$

### B. Constante de Stefan-Boltzmann, y emisividad.

De la ecuación 7, se puede apreciar que la constante de Stefan - Boltzmann se puede establecer en términos de otras constantes fundamentales de tal forma que se obtiene la expresión 9, no obstante de la misma ecuación 7 se deriva una expresión para determinar la constante de Stefan - Boltzman de forma experimental para un cuerpo negro (10)

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} \quad (9)$$

$$\sigma = \frac{I}{T^4} = \frac{P}{AT^4} \quad (10)$$

Para el caso de un alambre de cobre, debido a sus características de material conductor este puede ser modelado como un elemento resistivo, por lo que este cumple la ley de Ohm, así como la ley de Joule[10] de tal forma que el calor emitido por un alambre de cobre esta dado por la expresión 11. En un sistema que se encuentra al vacío este calor solo puede ser transmitido a los alrededores a través de radiación térmica [11], por lo que en un sistema ideal toda la potencia eléctrica, se convierte en potencia irradiada, no obstante un remplazo directo a la expresión 10, debido a que un alambre de cobre no es un cuerpo negro[12], este concepto es un modelo ideal.

$$H = R^2 I t = P t \quad (11)$$

Por su parte para un sistema compuesto por un alambre de cobre el cual emita radiación y permita mantener una temperatura, recubierto de un material oscuro con la capacidad de absorber así como de re-emitir la radiación absorbida se aproxima a un cuerpo negro ideal. Como menciona Wellons [13] se debe de tomar en cuenta la potencia neta del sistema a temperatura  $T$  en una temperatura ambiente (12), debido a que al no estar en el cero absoluto existe una emisión electromagnética [1]. No obstante debido al planteamiento experimental del presente trabajo, la temperatura para todas las mediciones se mantiene a 1356.15 K [14], contra 298.15 K de la temperatura ambiente, por lo que las aportaciones a la potencia neta son despreciables. De tal forma que si la hipótesis de que este sistema es un cuerpo negro la expresión 10 se puede expresar como la ecuación 13 expresando la potencia eléctrica en términos del voltaje y corriente incidente sobre el alambre.

$$P_{net} = P_T - P_o = \sigma A_s (T^4 - T_o^4) \quad (12)$$

$$\sigma = \frac{I}{T^4} = \frac{VI}{AT^4} \quad (13)$$

Debido a que el concepto de cuerpo negro es un modelo ideal se debe de tomar en cuenta la emisividad la cual mide el nivel de radiación emitido por la superficie de un material. Es la relación entre la energía irradiada por la superficie del material y la de un cuerpo negro en las mismas condiciones, por lo que se establece en una escala de 0 a 1. De la ley de Stefan-Boltzmann se establece que la potencia radiada se calcula como la relación entre la energía emitida y la unidad de superficie. Parte de esta radiación es reflejada por la superficie, por lo que la energía emitida suele ser menor que en la superficie de un cuerpo negro, es decir menor que 1[15], por lo que la ecuación 13 queda expresada como la ecuación 14.

$$\sigma = \frac{I}{T^4} = \frac{VI}{\epsilon AT^4} \quad (14)$$

## II. MÉTODO.

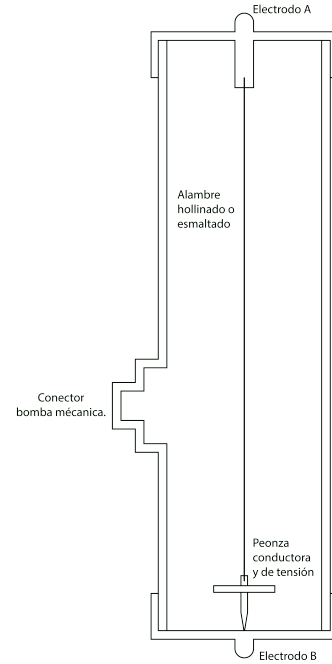


Fig. 1: Configuración del alambre enrollado o esmaltado con esmalte acrílico negro mate *Comex® AeroComex®*, dentro de la cámara de vacío eléctricamente conductora.

Veinte y cinco alambres de cobre calibre 32 AWG (presentación magneto) y de 30 cm de largo fueron cortados y divididos en dos grupos de 15 y 10. En el primer grupo (15 alambres), a cada alambre se le retiró el esmalte protector antes de instalarlo y se midió el diámetro del cable utilizando un micrómetro. La instalación se realizó fijando un extremo del alambre en un electrodo incrustado en una tapa de una cámara de vacío cilíndrica conductora, mientras que el otro extremo se fijó a una peonza metálica, como se muestra en la figura 1. El alambre se cubrió con hollín y se encapsuló dentro de la cámara al colocar una segunda tapa conductora, asegurando la continuidad eléctrica entre la peonza y la tapa.

Se extrajo el aire de la cámara de vacío mediante una bomba mecánica. Con la cámara en condiciones de vacío, se conectó el sistema en el circuito mostrado en la figura 2. La corriente máxima de salida de la fuente se estableció en 10 A, mientras que el voltaje se ajustó progresivamente para aumentar la potencia eléctrica en el alambre hasta que este se fundió (aprox. 1356.15 K [14]). Se registraron los valores de voltaje y corriente mediante un voltímetro y un amperímetro justo antes de la fusión del alambre, y con ellos se calculó la potencia eléctrica aplicada, que luego se utilizó en la ecuación 14 para determinar la constante de Stefan-Boltzmann.

Para el segundo grupo de alambres, a cada uno se le retiró el esmalte protector y se recubrió con esmalte acrílico negro mate en aerosol (*Comex<sup>®</sup> AeroComex<sup>®</sup>*), y se midió el diámetro del cable utilizando un micrómetro. Cada alambre se instaló de manera similar en la cámara de vacío conductora, retirando el esmalte de los extremos que se conectaban con la tapa y la peonza. Se repitieron los mismos procesos de vacío y registro de corriente que en el primer grupo.

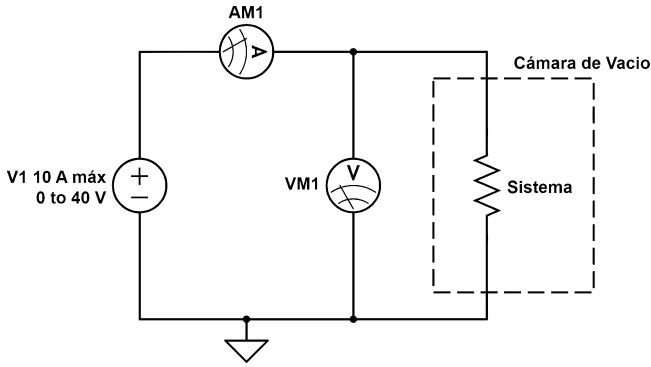


Fig. 2: Circuito resistivo equivalente que conecta el cable a una fuente de voltaje y corriente ajustable, con un amperímetro para medir la corriente y un voltímetro para medir el voltaje a través del alambre, permitiendo calcular la potencia eléctrica.

### III. RESULTADOS.

Se obtuvo una constante de Stefan - Boltzmann promedio de  $6.25 \times 10^{-8}$ ,  $s = 1.27 \times 10^{-8}$  [ $Wm^{-2}K^{-4}$ ], donde  $s$  denota la desviación estándar, para el sistema hollín - cobre utilizando una constante de emisividad de **0.96** estipulada por [16] con un error del **10.18%** con respecto al valor estipulado por la teoría ( $5.6697 \times 10^{-8}$  estipulado por [17], y derivado de la ecuación 9). Por su parte para el sistema esmalte acrílico - cobre se obtuvo una constante promedio de  $6.15 \times 10^{-8}$ ,  $s = 1.37 \times 10^{-8}$  [ $Wm^{-2}K^{-4}$ ] utilizando una constante de emisividad de **0.95** estipulada por [18] con un error del **8.48%** con respecto al valor estipulado por la teoría. Cabe destacar que se toma como error la desviación estándar debido a que no se realiza la caracterización del diámetro a lo largo de la longitud para cada alambre, y al ser lijados a mano se puede presentar variación de esta cantidad, la presión dentro de la cámara de vacío nunca es medida por lo que no es una cantidad estandarizada y los factores aleatorios predominan en cada medición.

Si se desprecia el hecho de que ambos sistemas son cuerpos grises y se toma  $\epsilon = 1$  se obtiene un valor de la constante de Stefan - Boltzmann de  $5.99 \times 10^{-8}$ ,  $s = 1.2 \times$

$10^{-8}$  [ $Wm^{-2}K^{-4}$ ] para el sistema hollín - cobre, mientras que para el sistema esmalte acrílico - cobre se obtuvo un valor del  $5.84 \times 10^{-8}$ ,  $s = 1.3 \times 10^{-8}$  [ $Wm^{-2}K^{-4}$ ], siendo el sistema esmalte - cobre, el más aproximado a un cuerpo negro con un error del **3.06%** con respecto al valor teórico de el cual es 1.88 veces menor que el del sistema hollín - cobre, dado los datos experimentales en las condiciones establecidas en la metodología.

Debido a que el valor de emisividad proporcionado por ThermoWorks [18], es una generalización de las pinturas negras basadas en polímeros, así como al hecho que durante la medición de potencia con los alambres recubiertos en esmalte, este se degrada, se realizó la estimación de  $\epsilon$  para el esmalte mediante métodos estadísticos, la figura 3 muestra un ajuste lineal realizado a los datos de potencia eléctrica con respecto a  $AT^4$  donde al dividir por la expresión 9 se obtiene una constante de emisividad para el esmalte acrílico negro mate, no obstante de la misma figura se puede apreciar que los datos no siguen ningún comportamiento lineal ni constante por lo que no es posible determinar la constante de emisividad de forma estadísticamente significativa a pesar que el estimador  $\hat{\epsilon}\sigma$  es de  $5.78 \times 10^{-8}$ , del orden de la constante de Stefan - Boltzmann

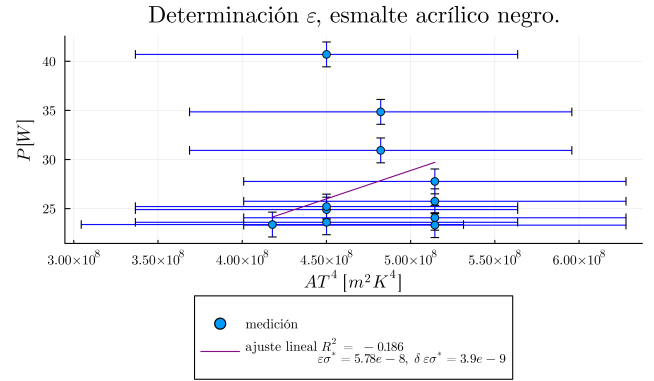


Fig. 3: Ajuste lineal realizado para la obtención de la constante de emisividad del esmalte acrílico, donde se puede apreciar que los datos medidos no corresponden a un modelo lineal.

Una hipótesis de la discrepancia entre las constantes de emisividad de los sistemas, y los comportamientos apreciados de forma experimental, es debida a la presencia de una cantidad significativa de aire dentro de la cámara de vacío que permitió la combustión del esmalte acrílico así como en ambos casos la dispersión de calor mediante convección, por lo que una mayor cantidad de potencia eléctrica puede ser disipada.

Cabe destacar que los resultados obtenidos presentan una desviación estándar comparable a la constante de Stefan-Boltzmann. Por ello, se recomienda aumentar la población de datos para reducir la desviación, en caso de que exista un fenómeno de correlación entre las variables medidas. Asimismo, la aleatoriedad del experimento podría disminuirse mediante el uso de un radiómetro o una termopila para medir la intensidad  $I$  emitida por el sistema, y de un medidor pirán o un termopar para medir la presión dentro de la cámara de vacío. Además, la caracterización de la resistividad del cobre en función de la temperatura permitiría interpolar más puntos de medición, facilitando la aplicación de ajustes lineales para obtener resultados en lugar de recurrir a promedios.

Finalmente los datos utilizados para determinar las constantes de Boltzmann promedio, así para realizar la figura 3 se pueden apreciar en el anexo A (tabs. II, I), donde los errores fueron determinados utilizando los manuales correspondientes a los multímetros, (MUL-285, MUL-286 ) y utilizando regla de la cuadratura.

#### IV. CONCLUSIONES.

Se determino la constante de Stefan-Boltzmann promedio de  $6.25 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$  con una desviación estándar de  $1.27 \times 10^{-8}$ , y para el sistema esmalte acrílico-cobre,  $6.15 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$  con una desviación estándar de  $1.37 \times 10^{-8}$ , con errores del 10.18 % y 8.48 % respecto al valor teórico, respectivamente.

Al considerar la emisividad  $\epsilon = 1$ , ambos sistemas muestran valores más cercanos a los de un cuerpo negro, en especial el sistema esmalte acrílico-cobre, que presenta un error menor en comparación con el sistema hollín-cobre, no obstante esta discrepancia es consecuencia de la presencia de aire en la cámara de vacío, lo cual facilita la combustión del esmalte y permite la disipación de calor por convección, afectando la potencia disipada y la precisión de las mediciones .

Se intentó determinar una constante de emisividad para el esmalte acrílico negro mate mediante un ajuste lineal de los datos experimentales de potencia radiada en función de la temperatura. Sin embargo, los datos no se ajustaron a un modelo lineal, impidiendo una estimación precisa de la emisividad, y a su vez se muestra la necesidad de aumentar el tamaño de la muestra a estudiar para reducir el error estándar de las mediciones.

Para próximos acercamientos al problema es recomendable realizar ajustes al método de adquisición de datos incluyendo un radiómetro o termopila para medir la intensidad de la radiación emitida, sensores de presión, para estandarizar la presión en la cámara de vacío, así como la implementación de una válvula de admisión a la misma. A la par se recomienda realizar una caracterización de la resistividad del alambre de cobre en función de la temperatura para interpolar más puntos de medición, lo que permitiría aplicar ajustes lineales en lugar de promedios, mejorando así la fiabilidad de los resultados.

#### V. APÉNDICE A: MEDICIONES.

$P \pm \Delta P [W]$	$AT^4 \pm \Delta AT^4 [m^2 K^4]$
$1.27 \pm 1.265$	$450071441.05 \pm 113498641.449$
$0.78 \pm 0.784$	$417916517.2 \pm 109453324.412$
$1.16 \pm 1.159$	$482227436.24 \pm 117404679.119$
$0.81 \pm 0.808$	$450071441.05 \pm 113498641.449$
$0.79 \pm 0.787$	$514384502.77 \pm 121184905.947$
$0.82 \pm 0.817$	$450071441.05 \pm 113498641.449$
$0.97 \pm 0.967$	$482227436.24 \pm 117404679.119$
$0.82 \pm 0.817$	$514384502.77 \pm 121184905.947$
$0.74 \pm 0.736$	$514384502.77 \pm 121184905.947$
$0.89 \pm 0.892$	$514384502.77 \pm 121184905.947$
$0.75 \pm 0.751$	$450071441.05 \pm 113498641.449$

Tabla I: Datos de potencia y  $AT^4$ , para cada uno de los diez alambres esmaltados con esmalte acrílico negro mate *Comex<sup>®</sup> AeroComex<sup>®</sup>*

Sistema hollín - alambre.				
Voltaje corte(V)	Corriente corte (A)	Potencia (W)	D $\pm$ 0.000005 (m)	Area (m <sup>2</sup> )
5.53 $\pm$ 0.05	4.74 $\pm$ 0.14	26.21 $\pm$ 0.832	0.00014	0.00013 $\pm$ 0.000034
5.27 $\pm$ 0.05	4.32 $\pm$ 0.14	22.77 $\pm$ 0.746	0.00014	0.00013 $\pm$ 0.000032
5.31 $\pm$ 0.05	4.43 $\pm$ 0.14	23.52 $\pm$ 0.764	0.00013	0.00012 $\pm$ 0.000035
5.25 $\pm$ 0.05	4.58 $\pm$ 0.14	24.05 $\pm$ 0.773	0.00014	0.00013 $\pm$ 0.000034
6.93 $\pm$ 0.05	4.58 $\pm$ 0.14	31.74 $\pm$ 1.013	0.00013	0.00012 $\pm$ 0.000036
7.31 $\pm$ 0.06	4.79 $\pm$ 0.15	35.01 $\pm$ 1.1	0.00014	0.00013 $\pm$ 0.000034
4.95 $\pm$ 0.04	4.58 $\pm$ 0.14	22.67 $\pm$ 0.73	0.00015	0.00014 $\pm$ 0.000035
7.36 $\pm$ 0.06	4.68 $\pm$ 0.14	34.44 $\pm$ 1.09	0.00014	0.00013 $\pm$ 0.000036
6.35 $\pm$ 0.05	4.63 $\pm$ 0.14	29.4 $\pm$ 0.937	0.00014	0.00013 $\pm$ 0.000036
4.78 $\pm$ 0.04	4.2 $\pm$ 0.13	20.08 $\pm$ 0.667	0.00014	0.00013 $\pm$ 0.000036
5.69 $\pm$ 0.05	4.51 $\pm$ 0.14	25.66 $\pm$ 0.827	0.00013	0.00012 $\pm$ 0.000034
5.19 $\pm$ 0.05	4.27 $\pm$ 0.14	22.16 $\pm$ 0.73	0.00015	0.00014 $\pm$ 0.000035
7.01 $\pm$ 0.06	4.43 $\pm$ 0.14	31.05 $\pm$ 1.002	0.00013	0.00012 $\pm$ 0.000035
5.07 $\pm$ 0.05	4.63 $\pm$ 0.14	23.47 $\pm$ 0.753	0.00014	0.00013 $\pm$ 0.000035

Sistema esmalte - alambre.				
Voltaje corte(V)	Corriente corte (A)	Potencia (W)	D $\pm$ 0.000005 (m)	Area (m <sup>2</sup> )
5.83 $\pm$ 0.05	4.01 $\pm$ 0.13	23.38 $\pm$ 0.784	0.00013	0.00012 $\pm$ 0.000032
8.67 $\pm$ 0.06	4.02 $\pm$ 0.13	34.85 $\pm$ 1.159	0.00015	0.00014 $\pm$ 0.000035
5.62 $\pm$ 0.05	4.43 $\pm$ 0.14	24.9 $\pm$ 0.808	0.00014	0.00013 $\pm$ 0.000034
5.56 $\pm$ 0.05	4.33 $\pm$ 0.14	24.07 $\pm$ 0.787	0.00016	0.00015 $\pm$ 0.000036
5.69 $\pm$ 0.05	4.43 $\pm$ 0.14	25.21 $\pm$ 0.817	0.00014	0.00013 $\pm$ 0.000034
6.3 $\pm$ 0.05	4.91 $\pm$ 0.15	30.93 $\pm$ 0.967	0.00015	0.00014 $\pm$ 0.000035
5.42 $\pm$ 0.05	4.75 $\pm$ 0.15	25.75 $\pm$ 0.817	0.00016	0.00015 $\pm$ 0.000036
4.74 $\pm$ 0.04	4.92 $\pm$ 0.15	23.32 $\pm$ 0.736	0.00016	0.00015 $\pm$ 0.000036
6.13 $\pm$ 0.05	4.53 $\pm$ 0.14	27.77 $\pm$ 0.892	0.00016	0.00015 $\pm$ 0.000036
4.97 $\pm$ 0.04	4.75 $\pm$ 0.15	23.61 $\pm$ 0.751	0.00014	0.00013 $\pm$ 0.000034

Tabla II: diametro medido para los alambres junto con corrientes y voltajes de ruptura, calculo de potencias y areas

- [1] European Space Agency (ESA), “Blackbody radiation what is thermal – or black body – radiation?” <https://sci.esa.int/web/education/-/48986-blackbody-radiation>, 2019. Accessed: 2024-11-2.
- [2] S. J. Ling, J. Sanny, and W. Moebs, “6.1 blackbody radiation.” <https://openstax.org/books/university-physics-volume-3/pages/6-1-blackbody-radiation>, Sept. 2016. Accessed: 2024-11-3.
- [3] J. J. Condon and S. M. Ransom, “mathematical derivations - essential radio astronomy.” <https://www.cv.nrao.edu/~sransom/web/A2.html>, 2018. Accessed: 2024-11-2.
- [4] P. Haggstrom, “Deriving the Stefan-Boltzmann law from planck’s law.” <https://gotohaggstrom.com/Deriving%20the%20StefanBoltzmann%20law%20from%20Plancks%20law.pdf>, 2023. Accessed: 2024-11-2.
- [5] V. Bitukov, Y. Khudak, and N. Gusein-Zade, “Analytical derivation of the stefan–boltzmann law for integral radiance from planck’s law for spectral radiance,” *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, vol. 45, pp. 46–50, 02 2018.
- [6] J. Tatum, “2.10: Derivation of wien’s and stefan’s laws.” [https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Astronomy\\_\\_Cosmology/Stellar\\_Atmospheres\\_\(Tatum\)/02%3A\\_Blackbody\\_Radiation/2.10%3A\\_Derivation\\_of\\_Wien's\\_and\\_Stefan's\\_Laws](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Astronomy__Cosmology/Stellar_Atmospheres_(Tatum)/02%3A_Blackbody_Radiation/2.10%3A_Derivation_of_Wien's_and_Stefan's_Laws), Apr. 2017. Accessed: 2024-11-2.
- [7] T. Vahabi, C. Lee, M. Nardin, E. Horsley, and R. Serbanescu, “Black body radiation.” [https://www.physics.utoronto.ca/~phy224\\_324/](https://www.physics.utoronto.ca/~phy224_324/)

- [LabManuals/BlackbodyRadiation.pdf](#), 2023. Accessed: 2024-11-2.
- [8] Physics and Math Lectures, “Deriving wien’s law,” 2020.
- [9] B. Das, “Obtaining wien’s displacement law from planck’s law of radiation,” *Phys. Teach.*, vol. 40, no. 3, pp. 148–149, 2002.
- [10] S. J. Ling, W. Moebs, and J. Sanny, “9.3 resistivity and resistance.” <https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/9-3-resistivity-and-resistance>, Oct. 2016. Accessed: 2024-11-4.
- [11] P. P. Urone and R. Hinrichs, “11.2 heat, specific heat, and heat transfer.” <https://openstax.org/books/physics/pages/11-2-heat-specific-heat-and-heat-transfer>, Mar. 2020. Accessed: 2024-11-4.
- [12] A. Oliva, R. Maldonado, E. Díaz, and A. Montalvo, “A high absorbance material for solar collectors’ applications,” *Materials Science and Engineering Conference Series*, vol. 45, pp. 2019–, 06 2013.
- [13] M. Wellons, “The Stefan-Boltzmann law.” [https://physics.wooster.edu/wp-content/uploads/2021/08/Junior-IS-Thesis-Web\\_2007\\_Wellons.pdf](https://physics.wooster.edu/wp-content/uploads/2021/08/Junior-IS-Thesis-Web_2007_Wellons.pdf), 2007. Accessed: 2024-11-2.
- [14] PubChem, “Copper.” <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Copper>. Accessed: 2024-11-4.
- [15] S. R. O. Aletba, N. Abdul Hassan, R. Putra Jaya, E. Aminudin, M. Z. H. Mahmud, A. Mohamed, and A. A. Hussein, “Thermal performance of cooling strategies for asphalt pavement: A state-of-the-art review,” *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, vol. 8, no. 3, pp. 356–373, 2021.
- [16] D. Bonyuet, “Descripción y tablas de emisividad.” [https://www.academia.edu/23762566/Descripci%C3%B3n\\_y\\_tablas\\_de\\_Emisividad?auto=download](https://www.academia.edu/23762566/Descripci%C3%B3n_y_tablas_de_Emisividad?auto=download). Accessed: 2024-11-3.
- [17] H. D. Kambezidis, “The solar resource,” in *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, Elsevier, 2020.
- [18] ThermoWorks, “Infrared emissivity table.” [https://www.thermoworks.com/emissivity-table/?srsltid=AfmB0op4EzXC\\_eix3R0Ur07DqWbj9DgVS104LlzT5stI7YE2lyR28fxP](https://www.thermoworks.com/emissivity-table/?srsltid=AfmB0op4EzXC_eix3R0Ur07DqWbj9DgVS104LlzT5stI7YE2lyR28fxP), 2024. Accessed: 2024-11-3.