



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera

Doña ELOÍSA TORRES JIMÉNEZ , tutora del Trabajo Fin de Grado titulado: CONFIRMACIÓN EXPERIMENTAL DE LA LEY DE RADIACIÓN DEL CUERPO NEGRO EN FUNCIÓN DE SU TEMPERATURA, que presenta FUENSANTA M^a QUERO PERABÁ, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, SEPTIEMBRE de 2014

El alumno:

La tutora:

FUENSANTA M^a QUERO PERABÁ

ELOÍSA TORRES JIMÉNEZ

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES	3
1.2. EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO	4
2. LA RADIACIÓN DEL CUERPO NEGRO	6
2.1. PROPIEDADES DE LA SUPERFICIE DE UN CUERPO	6
2.2. EL CUERPO NEGRO	7
2.3. DISTRIBUCIÓN DE PLANCK	9
2.4. LEY DE DESPLAZAMIENTO DE WIEN	11
2.5. LEY DE ESTEFAN-BOLTZMANN	12
3. CONFIRMACIÓN EXPERIMENTAL DE LA LEY DE RADIACIÓN DEL CUERPO NEGRO	14
3.1. OBJETO DE LA PRÁCTICA	14
3.2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	14
3.3. ELEMENTOS DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL	15
3.4. MONTAJE DEL DISPOSITIVO	16
3.5. MEDIDAS DE SEGURIDAD	19
3.6. DESARROLLO DEL EXPERIMENTO	19
3.7. RESULTADOS	21
3.8. CONCLUSIONES	29
3.9. CÁLCULO DE LA CONSTANTE DE STEFAN-BOLTZMANN	31
4. DISEÑO DE LA PRÁCTICA EN LABORATORIO PARA LA ASIGNATURA DE INGENIERÍA TÉRMICA	34
4.1. ANTECEDENTES	34
4.2. DISEÑO DE PRÁCTICA	35
Bibliografía	42
APÉNDICES	43

1. INTRODUCCIÓN

La transferencia de calor mediante radiación térmica es un proceso en extremo importante, y en el sentido físico es quizá el más interesante de los modos de transferencia de calor, ya que no requiere materia. Es relevante para muchos procesos industriales de calentamiento, enfriamiento y de secado, así como también para métodos que incluyen la utilización de combustibles fósiles y radiación solar.

1.1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES

Consideramos un sólido que inicialmente está a una temperatura más alta T_s que la de sus alrededores T_{alr} , pero en torno al cual existe un vacío. La presencia del vacío evita la pérdida de energía desde la superficie del sólido por convección o conducción. Sin embargo, nuestra intuición nos dice que el sólido finalmente alcanzará el equilibrio termodinámico con sus alrededores. Este enfriamiento está asociado con una reducción en la energía interna almacenada por el sólido y es una consecuencia directa de la *emisión* de radiación térmica desde la superficie. A su vez la superficie interceptará y absorberá la radiación originada desde los alrededores. Sin embargo, si $T_s > T_{alr}$ la transferencia neta de calor por radiación $q_{rad,net}$ es desde la superficie, y la superficie se enfriará hasta que T_s alcance T_{alr} .

Asociamos la radiación térmica a la intensidad con que la materia emite energía como resultado de su temperatura finita. En este momento toda la materia que lo rodea está emitiendo radiación: por los muebles y paredes de la habitación, si está dentro de la casa o por la tierra, edificios, y la atmósfera y el Sol si está en el exterior. El mecanismo de emisión se relaciona con la energía liberada como consecuencia de oscilaciones o transiciones de los muchos electrones que constituyen la materia.

Estas oscilaciones, a su vez, son sostenidas por la energía interna y por tanto la temperatura de la materia. Por consiguiente asociamos la emisión de radiación térmica con condiciones térmicamente dentro de la materia.

Todas las formas de materia emiten radiación. Para gases y para sólidos semitransparentes, como vidrio y cristales de sal a temperatura elevadas, la emisión es un *fenómeno volumétrico*. Es decir, que la radiación que emerge de un volumen finito

de materia es el efecto integrado de la emisión local a través del volumen. Sin embargo, hay situaciones en las que la radiación es un *fenómeno superficial*. En la mayoría de los sólidos y líquidos, la radiación se emite desde las moléculas que están a una distancia de aproximadamente 1 μm de la superficie expuesta. Es por esta razón que la emisión desde un sólido o líquido en un gas contiguo o en el vacío se ve como un fenómeno superficial.

Sabemos que la radiación se origina por emisiones de la materia y que su posterior transferencia no requiere la presencia de materia alguna. Una teoría considera a la radiación como la propagación de una acumulación de partículas denominadas *fotones* o *cuantos (quanta)*. Alternativamente, la radiación se puede ver como la propagación de *ondas electromagnéticas*. En cualquier caso deseamos atribuir a la radiación las propiedades características de las ondas, frecuencia ν y longitud de onda λ . Para la radiación que se propaga en un medio particular, las dos propiedades se relacionan mediante $\lambda = \frac{c}{\nu}$, siendo c la velocidad de la luz en el medio.

1.2. EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

El espectro electromagnético completo se señala en la figura 1.2. La parte intermedia del espectro, que se extiende de 10^{-4} a 10^{-7} m de longitud de onda, se *denomina radiación térmica* y está relacionada con la transferencia de calor. Esta franja del espectro incluye una parte de la radiación ultravioleta (UV), todo el espectro visible y el infrarrojo.

La radiación térmica que emite una superficie abarca un rango de longitudes de onda. La magnitud de la radiación varía con la longitud de onda, y el término *espectral* se utiliza para referirse a la naturaleza de esta dependencia. La radiación emitida consiste en una distribución continua no uniforme de componentes *monocromáticos* (una sola longitud de onda). La magnitud de la radiación en cualquier longitud de onda y la *distribución espectral* varían con la naturaleza y temperatura de la superficie emisora.

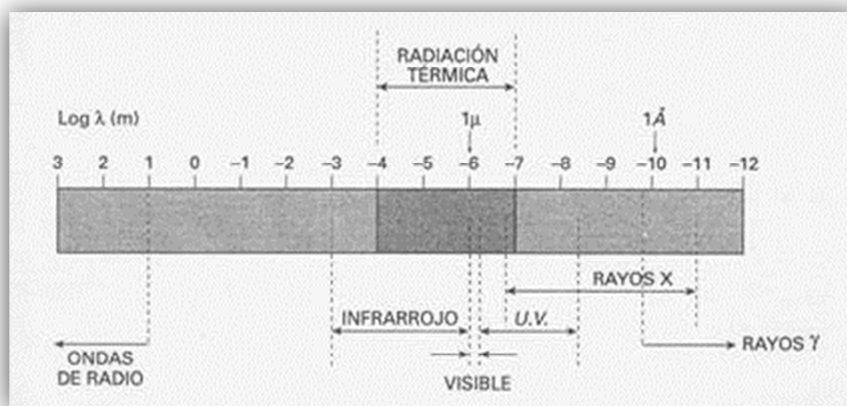


Figura 1.2 Espectro de la radiación electromagnética

La naturaleza espectral de la radiación térmica es una de las dos características que complica su descripción; la segunda característica se relaciona con su *direccionalidad*. Una superficie puede emitir de forma relevante en ciertas direcciones, con lo que crea una distribución direccional de la radiación emitida. Para cuantificar de forma apropiada la transferencia de calor por radiación, debemos de ser capaces de tratar ambos efectos, espectrales y direccionales.

La radiación que emite una superficie se propaga en todas las direcciones posibles, y a menudo estamos interesados en conocer su distribución direccional. También, la radiación incidente sobre una superficie puede venir de diferentes direcciones, y la forma en que la superficie responde a esta radiación depende de la dirección.

En las tablas que vienen a continuación se proporcionan los espectros de emisión de metales y gases. La longitud de onda se da en *angstrom* (10^{-10} m). La mayor parte de las líneas se encuentran dentro del espectro visible.

Aluminio (arco)	Cobre (arco en el vacío)	Mercurio (lámpara de arco)	Sodio (en llama)	Cadmio (arco)	Cinc (arco en el vacío)
		3126		3261	
		3131		3404	3036
3083	3248	3650		3466	3072
3093	3274	4047		3611	3345
3944	4023	4358		3982	4680
3962	4063	4916	5890	4413	4722
4663	5105	4960	5896	4678	4811
5057	5153	5461		4800	4912
5696	5218	5770		5086	4925
5723	5700	5791		5338	6103
	5782	6152		5379	6332
		6232		6438	

Argón	Helio	Hidrógeno	Neón	Nitrógeno
			4538	
			4576	
3949			4704	5754
4044			4709	5803
4159			4715	5853
4164			4789	5904
4182			5331	5957
4190	3889		5341	6012
4191	4026	4102	5358	6068
4198	4221	4340	5401	6251
4201	5016	4341	5853	6321
4251	5876	4861	5882	6393
4259	6678	6563	5965	6467
4266	7065		6143	6543
4272			6266	6622
4300			6383	6703
4334			6402	6787
4335			6506	
			7174	
			7245	

Fuente: Koshkin N. I., Shirkévich M. G.. *Manual de Física Elemental*. Editorial Mir 1975.

2. LA RADIACIÓN DEL CUERPO NEGRO

2.1. PROPIEDADES DE LA SUPERFICIE DE UN CUERPO

Sobre la superficie de un cuerpo incide constantemente energía radiante, tanto desde el interior como desde el exterior, la que incide desde el exterior procede de los objetos que rodean al cuerpo. Cuando la energía radiante incide sobre la superficie una parte se refleja y la otra parte se transmite.

Consideremos la energía radiante que incide desde el exterior sobre la superficie del cuerpo. Si la superficie es lisa y pulimentada, como la de un espejo, la mayor parte de la energía incidente se refleja, el resto atraviesa la superficie del cuerpo y es absorbido por sus átomos o moléculas (*figura 2.1 a*).

Si r es la proporción de energía radiante que se refleja, y a la proporción que se absorbe, se debe de cumplir que $r+a=1$. La misma proporción r de la energía radiante que incide desde el interior se refleja hacia dentro, y se transmite la proporción $a=1-r$ que se propaga hacia afuera y se denomina por tanto, energía radiante emitida por la superficie.

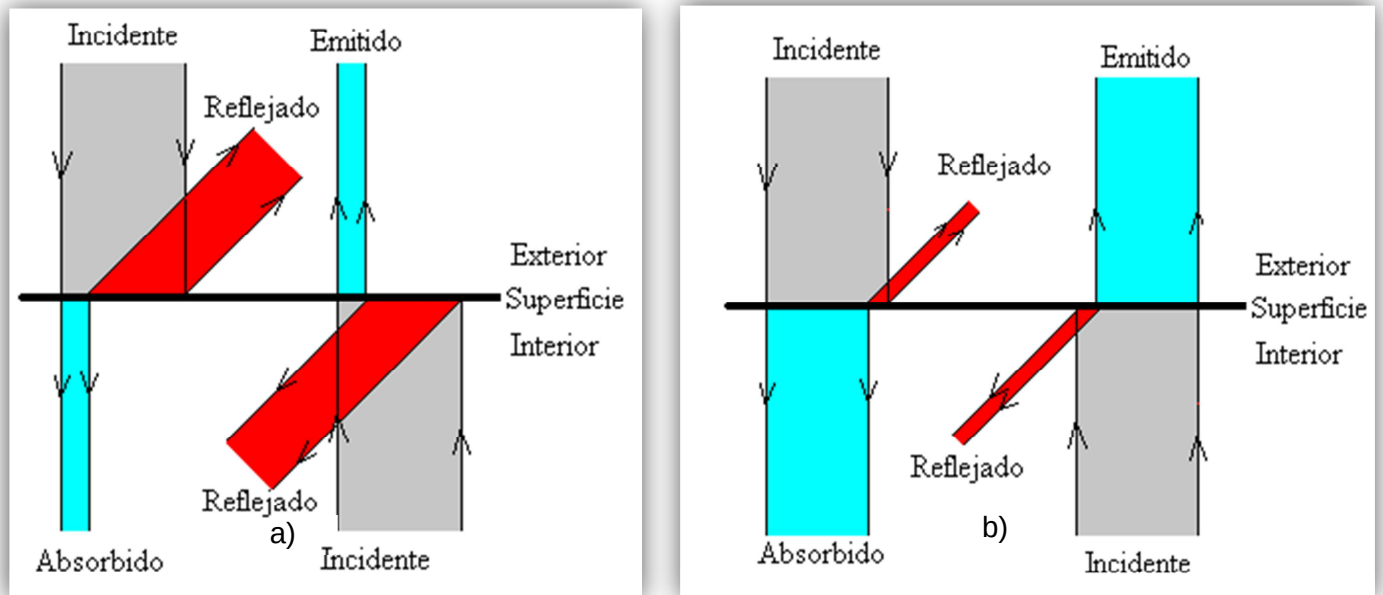


Figura 2.1 Energía radiante sobre superficie (a) lisa y pulimentada (b) no lisa ni pulimentada.

En la *figura 2.1 b*, se muestra el comportamiento de la superficie de un cuerpo que refleja una pequeña parte de la energía incidente. Las anchuras de las distintas bandas corresponden a cantidades relativas de energía radiante incidente, reflejada y transmitida a través de la superficie.

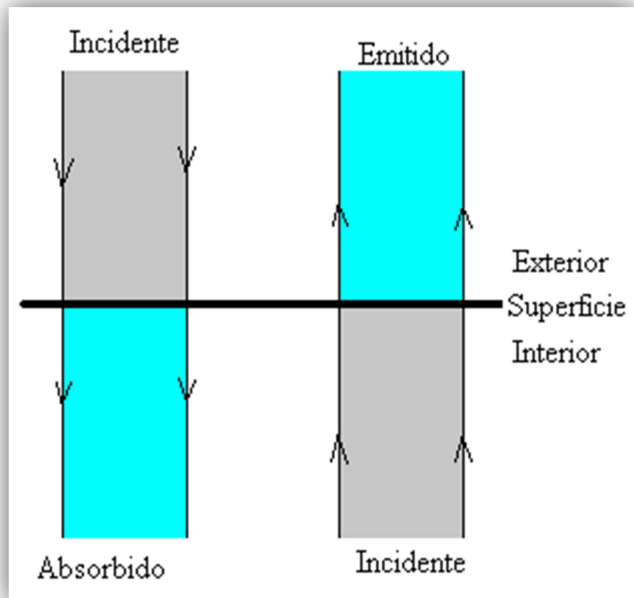
Comparando ambas figuras, vemos que un buen absorbedor de radiación es un buen emisor, y un mal absorbedor es un mal emisor. También podemos decir, que un buen reflector es un mal emisor, y un mal reflector es un buen emisor.

2.2. EL CUERPO NEGRO

Cuando se describen las características de radiación de superficies reales, es útil introducir el concepto de *cuerpo negro*. El cuerpo negro es una superficie *ideal* que tiene las siguientes propiedades:

1. Un cuerpo negro absorbe toda la radiación incidente, sin importar la longitud de onda y la dirección.
2. Para la temperatura y longitud de onda establecidas, ninguna superficie puede emitir más energía que un cuerpo negro.

3. Aunque la radiación emitida por un cuerpo negro es una función de la longitud de onda y la temperatura, es independiente de la dirección. Es decir, el cuerpo negro es un emisor difuso.



Por tanto, la superficie de un cuerpo negro (*figura 2.2 a*) es un caso límite, en el que toda la energía incidente desde el exterior es absorbida, y toda la energía incidente desde el interior es emitida. Como absorbedor y emisor perfecto, el cuerpo negro sirve como *modelo* contra el que se pueden comparar las propiedades radiativas de superficies reales.

Figura 2.2 (a) Radiación en un cuerpo negro

Aunque aproximado muy de cerca por algunas superficies, es importante notar que ninguna superficie tiene precisamente las propiedades de un cuerpo negro. No existe en la naturaleza un cuerpo negro, incluso el negro de humo refleja el 1% de la energía incidente.

La aproximación más cercana se logra con una *cavidad* cuya superficie interna está a una temperatura uniforme. Si entra radiación a la cavidad a través de una pequeña apertura (*figura 2.2 b*), probablemente experimentará muchas reflexiones antes de resurgir. Por ello es casi absorbida por completo por la cavidad, y se aproxima el comportamiento del cuerpo negro.

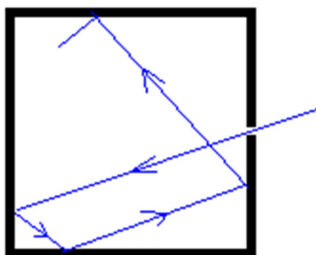
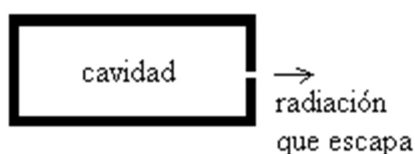


Figura 2.2 (b) Cavidad

Partiendo de los principios termodinámicos se puede demostrar que la radiación que sale de la apertura depende sólo de la temperatura de la superficie y que corresponde a la emisión del cuerpo negro.

Consideremos una cavidad cuyas paredes están a una cierta temperatura. Los átomos que componen las paredes están emitiendo radiación electromagnética y al mismo tiempo absorben la radiación emitida por otros átomos de las paredes. Cuando la radiación encerrada dentro de la cavidad alcanza el equilibrio con los átomos de las paredes, la cantidad de energía que emiten los átomos en la unidad de tiempo es igual a la que absorben. En consecuencia, la densidad de energía del campo electromagnético existente en la cavidad es constante.

A cada frecuencia corresponde una densidad de energía que depende solamente de la temperatura de las paredes y es independiente del material del que están hechas y si éste es altamente reflejante o absorbente.



Si se abre un pequeño agujero en el recipiente, parte de la radiación se escapa y se puede analizar. El agujero se ve muy brillante cuando el cuerpo está a alta temperatura, y se ve completamente negro a bajas temperaturas.

2.3. DISTRIBUCIÓN DE PLANCK

Históricamente, el nacimiento de la Mecánica Cuántica, se sitúa en el momento en el que Max Planck explica el mecanismo que hace que los átomos radiantes produzcan la distribución de energía observada. Max Planck sugirió en 1900 que:

1. La radiación dentro de la cavidad está en equilibrio con los átomos de las paredes que se comportan como osciladores armónicos de frecuencia dada f .
2. Cada oscilador puede absorber o emitir energía de la radiación en una cantidad proporcional a f . Cuando un oscilador absorbe o emite radiación electromagnética, su energía aumenta o disminuye en una cantidad hf .

La segunda hipótesis de Planck, establece que la energía de los osciladores está cuantizada. La energía de un oscilador de frecuencia f sólo puede tener ciertos valores que son $0, hf, 2hf, 3hf \dots nhf$.

La distribución espectral de radiación es continua y tiene un máximo dependiente de la temperatura. La distribución espectral se puede expresar en términos de la longitud de onda o de la frecuencia de la radiación.

dE_f/df es la densidad de energía por unidad de frecuencia para la frecuencia f de la radiación contenida en una cavidad a la temperatura absoluta T . Su unidad es $(J \cdot m^{-3}) \cdot s$.

$$\frac{dE_f}{df} = \frac{8\pi h}{c^3} \frac{f^3}{\exp\left(\frac{hf}{kT}\right) - 1} \quad (Ec.1)$$

donde k es la constante de Boltzmann cuyo valor es $k=1.3805 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$.

$dE_\lambda/d\lambda$ es la densidad de energía por unidad de longitud de onda para la longitud de onda λ de la radiación contenida en una cavidad a la temperatura absoluta T . Su unidad es $(J \cdot m^{-3}) \cdot m^{-1}$.

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad \frac{df}{d\lambda} = -\frac{c}{\lambda^2}$$

$$\frac{dE_\lambda}{d\lambda} = -\frac{dE_f}{df} \frac{df}{d\lambda} = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1} \quad (Ec. 2)$$

Esta ecuación conocida como *distribución de Planck* se representa en la siguiente figura (figura 2.3) para temperaturas seleccionadas. Se deben constatar varias características importantes:

1. La radiación emitida varía de forma *continua* con la longitud de onda.
2. En cualquier longitud de onda la magnitud de la radiación emitida aumenta al ascender la temperatura.

3. La región espectral en la que la radiación se concentra depende de la temperatura, dándose comparativamente más radiación para longitudes de onda más pequeñas a medida que aumenta la temperatura.
4. Una fracción significativa de la radiación emitida por el Sol, que se puede aproximar como un cuerpo negro a 5800K, está en la región visible del espectro. Por el contrario, para $T \leq 800 \text{ K}$, la emisión está de manera predominante en la región infrarroja del espectro y no es visible para el ojo.

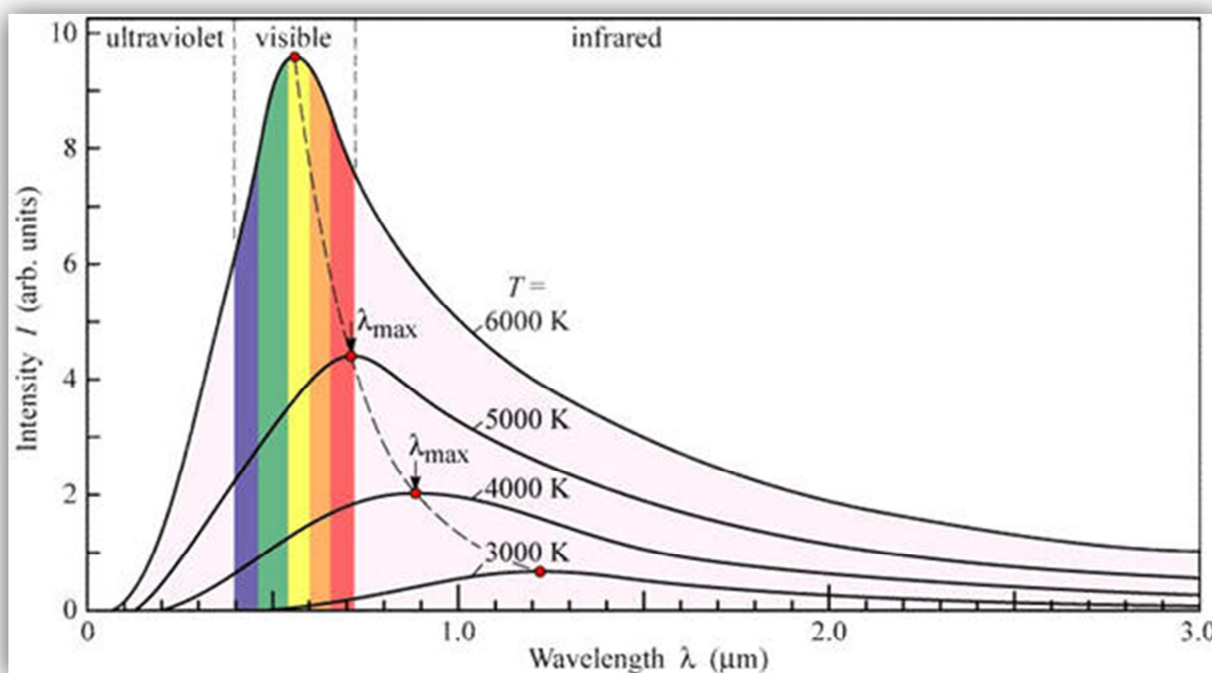


Figura 2.3 Potencia emisiva espectral del cuerpo negro

2.4. LEY DE DESPLAZAMIENTO DE WIEN

En la figura 2.3 vemos que la distribución espectral del cuerpo negro tiene un máximo y que la longitud de onda correspondiente $\lambda_{\text{máx}}$ depende de la temperatura. La naturaleza de esta dependencia se puede obtener al derivar la ecuación de Planck con respecto a λ y hacer el resultado igual a cero.

$$\frac{d}{d\lambda} \left[\frac{1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1} \right] = 0$$

Obtenemos la siguiente ecuación:

$$5(e^x - 1) - xe^x = 0 \quad x = \frac{hc}{\lambda_m kT} = 4.965 \quad (\text{Ec. 3})$$

Este resultado constituye la ley de desplazamiento de Wien, que establece que el máximo de la densidad de energía $dE_\lambda/d\lambda$ por unidad de longitud de onda a distintas temperaturas $T_1, T_2, T_3, \dots$, se produce a las longitudes de onda $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$ tales que

$$\lambda_1 T_1 = \lambda_2 T_2 = \lambda_3 T_3 = \dots = \frac{hc}{k \cdot 4.965} = 2.898 \cdot 10^{-3} mK \quad (\text{Ec. 4})$$

La ecuación anterior se conoce como ley de desplazamiento de Wien, y el lugar geométrico de los puntos que describe la ley se representa como la línea punteada de la figura 2.3. De acuerdo con este resultado, la potencia emisiva espectral máxima se desplaza a longitudes de onda más cortas al aumentar la temperatura. Esta emisión está a la mitad del espectro visible ($\lambda \approx 0.50 \mu m$) para radiación solar, pues el Sol emite como un cuerpo negro a aproximadamente 5800 K. Al aumentar la temperatura, las longitudes de onda más cortas se vuelven más prominentes, hasta que finalmente ocurre una emisión significativa en todo el espectro visible.

2.5. LEY DE ESTEFAN-BOLTZMANN

La intensidad (energía por unidad de área y unidad de tiempo) por unidad de longitud de onda (λ), de un cuerpo negro a la temperatura absoluta T , viene dada por la expresión.

$$\frac{dW_\lambda}{d\lambda} = \frac{c}{4} \frac{dE_\lambda}{d\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1}$$

Su unidad es $(W \cdot m^{-2}) \cdot m^{-1}$.

La intensidad (energía por unidad de área y unidad de tiempo) por unidad de frecuencia (f), de un cuerpo negro a la temperatura absoluta T , viene dada por la expresión:

$$\frac{dW_f}{df} = \frac{c}{4} \frac{dE_f}{df} = \frac{2\pi h}{c^2} \frac{f^3}{\exp\left(\frac{hf}{kT}\right) - 1}$$

La intensidad total en $W \cdot m^{-2}$, de la radiación emitida por un cuerpo negro, se obtiene integrando la expresión anterior para todas las longitudes de onda (o frecuencias).

$$W = \int_0^{\infty} dW_{\lambda} = \int_0^{\infty} dW_f = \frac{2\pi k^4 T^4}{c^2 h^3} \int_0^{\infty} \frac{x^3}{e^x - 1} dx = \frac{2\pi k^4 T^4}{c^2 h^3} \frac{\pi^4}{15} = \frac{2\pi^5 k^4}{15 c^2 h^3} T^4$$

O bien,

$$W = \sigma T^4, \text{ con } \sigma = 5.670 \cdot 10^{-8} (W m^{-2} K^{-4}) \quad (Ec. 5)$$

Este resultado simple, pero importante, se denomina *ley de Stefan-Boltzmann*. La energía emitida por un cuerpo negro por unidad de área y unidad de tiempo es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta T . Permite el cálculo de la cantidad de radiación emitida en todas las direcciones y sobre todas las longitudes de onda simplemente a partir del conocimiento de la temperatura del cuerpo negro.

Para objetos calientes distintos al cuerpo negro, la ley se expresaría de la siguiente forma:

$$W = \varepsilon \sigma T^4, \text{ siendo} \quad (Ec. 6)$$

ε = emisividad del objeto (valor entre 0 y 1, el valor 1 sería para el cuerpo negro)

$$\sigma = 5.670 \cdot 10^{-8} (W m^{-2} K^{-4})$$

3. CONFIRMACIÓN EXPERIMENTAL DE LA LEY DE RADIACIÓN DEL CUERPO NEGRO

3.1. OBJETO DE LA PRÁCTICA

- Introducir experimentalmente el concepto de radiación térmica.
- Comprobar la Ley de Stefan-Boltzmann plasmando en un gráfico la relación entre la intensidad radiante y la temperatura absoluta.

3.2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Todos los cuerpos irradian calor. La intensidad de esta radiación electromagnética, térmicamente estimulada, aumenta con la temperatura del cuerpo y también va a depender de la superficie de éste. En una longitud de onda dada, mientras más calor emita un cuerpo, mejor puede absorber esta radiación.

Ya hemos hablado anteriormente del cuerpo negro y sus características, que recordamos, es aquél que absorbe toda la radiación incidente, sin importar la longitud de onda y la dirección; y aquél que para la temperatura y longitud de onda establecidas, emite más energía que ningún otro cuerpo.

La ley de Stefan-Boltzmann nos dice que la radiación total emitida por un cuerpo negro aumenta proporcionalmente a la temperatura absoluta T elevada a la cuarta potencia (Ec. 5)

$$W = \sigma T^4, \text{ con } \sigma = 5.670 \cdot 10^{-8} (Wm^{-2}K^{-4})$$

Pero, a la misma vez, el cuerpo negro absorbe radiación de su entorno. Por lo que en este experimento no mediremos la intensidad total de la radiación emitida W , sino la intensidad radiante W' la cuál calcularemos de la siguiente forma:

La intensidad absorbida por el ambiente es

$$W_0 = \sigma T_0^4$$

Por lo tanto, la intensidad emitida total W' sería:

$$W' = \sigma(T^4 - T_0^4) \quad (\text{Ec. 7})$$

3.3. ELEMENTOS DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

En este experimento se utiliza un **horno eléctrico tubular** con un **accesorio para formar el “cuerpo negro”**. Este accesorio de cuerpo negro consiste en un cilindro metálico de latón pulido y un diafragma. El cilindro metálico, sellado por un extremo está introducido en el horno eléctrico y es calentado a la temperatura deseada. En el extremo cerrado se le ha practicado una perforación para permitir la fijación de un termómetro, mediante un sensor de temperatura NiCr-Ni. La pantalla o diafragma, que se puede refrigerar con agua si es necesario, se sitúa delante de la abertura de emisión térmica del horno eléctrico. Éste está construido en acero y latón, y está provisto de un revestimiento aislante térmico en el lado posterior, de manera que sólo se mida la radiación térmica del cilindro pulido, y no la pared de fuera del horno caliente (*para más información consultar la ficha técnica “Suplemento de cuerpo negro” incluida en el Apéndice 1*)

La radiación térmica es medida usando una **pila termoeléctrica de Moll** a la que se le conecta un microvoltímetro. La termopila tiene forma cilíndrica, hueca, que contiene un número determinado de termopares conectados en serie en su interior. Las paredes interiores son cónicas y plateadas para que reflejen la radiación incidente y la enfoquen en los termopares. La radiación absorbida calienta los termopares produciendo una fuerza electromotriz (f.e.m.) termoeléctrica de unos pocos milivoltios, proporcional a la potencia de radiación térmica incidente (factor de conversión: 1 mW = 0.16 mV). Esto se produce debido a que unos puntos de soldadura/medición, de los termoelementos conectados en serie, se encuentran en contacto directo con una superficie negra que absorbe la radiación y se calienta, mientras el punto comparativo se encuentra a la temperatura de la caja, es decir, prácticamente a la temperatura ambiente. Por lo que podemos tomar el voltaje de salida como una medida relativa de la intensidad de radiación **W'**. Si no incide ninguna radiación térmica en la pila termoeléctrica, el punto de soldadura/medición y el punto de soldadura comparativo se encuentran a la misma temperatura, es decir, a la temperatura ambiente (*para más información consultar la ficha técnica “Pila termoeléctrica de Moll” incluida en el Apéndice 1*).

En el siguiente cuadro se enumeran todos los componentes del dispositivo experimental. Las fichas técnicas de cada uno de ellos están incluidas en el Apéndice 1.

<u>Componentes</u>
1 Horno eléctrico, 230 V
1 Accesorio cuerpo negro
1 Soporte para horno eléctrico
1 Termómetro digital con una entrada
1 Sensor de temperatura, NiCr-Ni
1 Termopila de Moll
1 Microvoltímetro
1 Pequeño banco óptico
1 Base grande con forma de V
4 Multiabrazaderas Leybold
1 Abrazadera universal S

3.4. MONTAJE DEL DISPOSITIVO

Se deben seguir las siguientes instrucciones:

- Montar el horno eléctrico, la pantalla del accesorio de cuerpo negro y la termopila como se ve puede observar en la figura 3.3, de modo que la varilla de la termopila esté a unos 15 cm delante de la apertura del horno eléctrico. La pantalla del accesorio del cuerpo negro debe estar a unos 5-10 mm delante del horno, con el lado de metal mirando hacia la termopila.
- Sacar la ventana de cristal de la termopila.
- Conectar el sensor de temperatura NiCr-Ni al termostato digital insertarlo en el agujero central pequeño del cilindro metálico pulido tanto como sea posible.
- Montar el sensor de temperatura en su lugar con la abrazadera S y enchufar el termómetro (rango de medida $> 200^{\circ}\text{C}$).
- Alinear las aperturas del horno eléctrico, la pantalla del accesorio de cuerpo negro y la termopila, para que el calor radiante incida directamente en la apertura de la termopila.

- Si se usa la refrigeración por agua, enchufar la bomba. Figura 3.4.2.
- Conectar la termopila al microvoltímetro como se muestra en la figura 3.4.1 (rango de medida 10^{-4}). Hay que asegurarse de que el enchufe rojo de la termopila está conectado al enchufe rojo del microvoltímetro.
- Encender el microvoltímetro unos 10 minutos antes de iniciar el experimento con el interruptor que se encuentra en la parte posterior de la carcasa. Si es necesario, realizar una compensación offset (función “tara”) presionando el pulsador hasta poner el display digital a cero. Al accionar el pulsador, la unidad almacena la tensión aplicada a la entrada y la suministra internamente con el signo contrario, de tal manera que unos 1,5 s después de soltar el pulsador se compensan a cero la indicación y la salida analógica (en forma aproximada) *(para más información consultar la ficha técnica “Microvoltímetro” incluida en el Apéndice 1)*.

Nota: La intensidad que se va a medir es muy baja, por lo que la medición es extremadamente susceptible a la interferencia recibida por influencias ambientales. Esta interferencia puede ser causada por radiación directa del calor del cuerpo en la termopila, por el reflejo/reflexión de radiación en superficies reflectantes (ejemplo, ropa de color claro), por radiadores presentes en la sala, por la luz solar o por otras fuentes de luz.

Es por ello aconsejable seguir las siguientes recomendaciones:

- No tocar nunca la termopila con la mano mientras se está midiendo.
- No trabajar cerca de la termopila, y en particular, delante de ella.
- Evitar corrientes y variaciones de temperatura en la sala durante el experimento.
- Evitar intervenir en la radiación; proteger, si fuera necesario, el montaje con cartón.
- Oscurecer la habitación si fuese necesario.

A continuación, se detalla, mediante unas figuras, la disposición de dichos componentes:

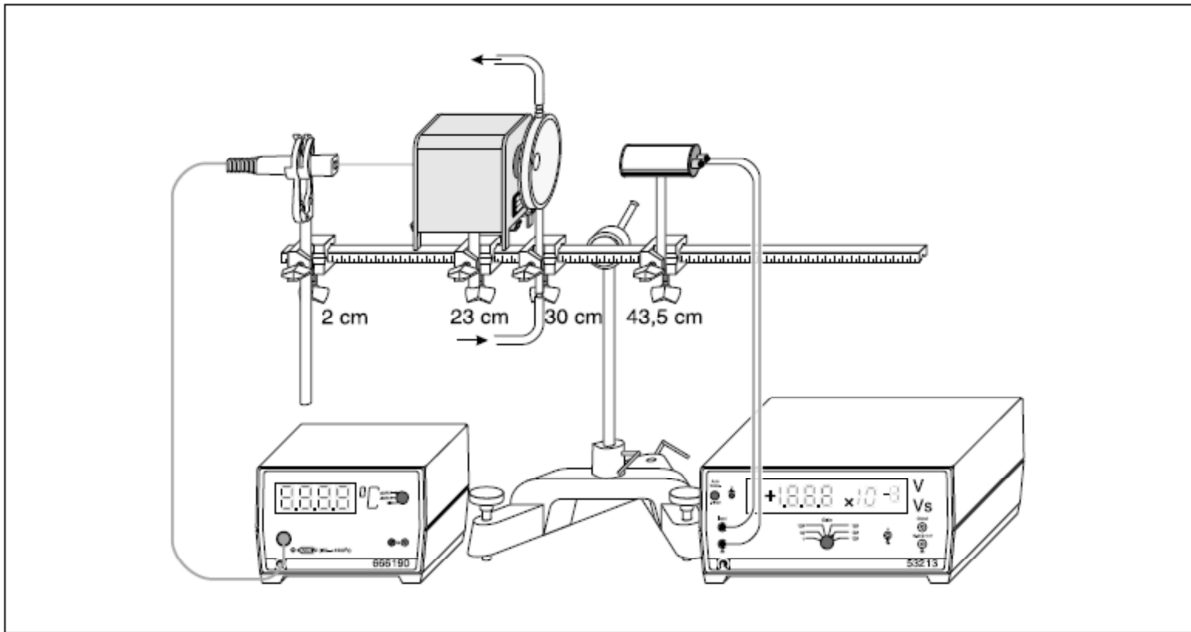


Figura 3.4.1 Disposición del dispositivo de ensayo.

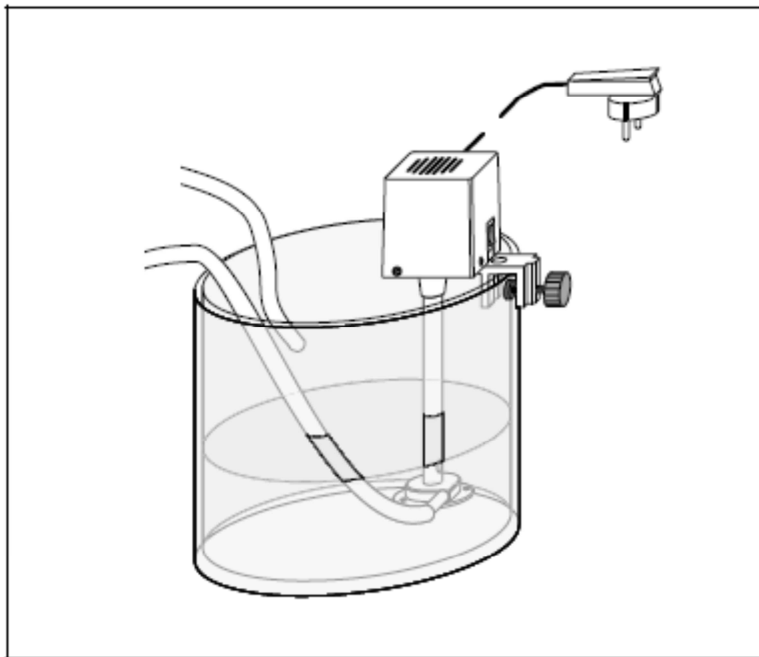


Figura 3.4.2. Ejemplo de montaje de la bomba de inmersión sobre un recipiente con agua.

3.5. MEDIDAS DE SEGURIDAD

Se recomienda seguir las siguientes medidas de seguridad al trabajar con el horno eléctrico:

- Evitar tocar el horno eléctrico, ya que la pared exterior del horno puede exceder los 200°C.
- Operar con el horno sólo sobre la superficie de apoyo destinada para tal uso, la cuál debe ser resistente al calor.

En el caso de utilizar la refrigeración por agua, el agua puede entrar en el motor de la bomba de inmersión y puede provocar un cortocircuito, por lo que se recomienda:

- La profundidad de inmersión de la bomba no debe exceder los 17 cm.
- Una vez finalizado el experimento, no dejar la bomba mojada de tal forma que pueda causar un fallo en sus componentes eléctricos

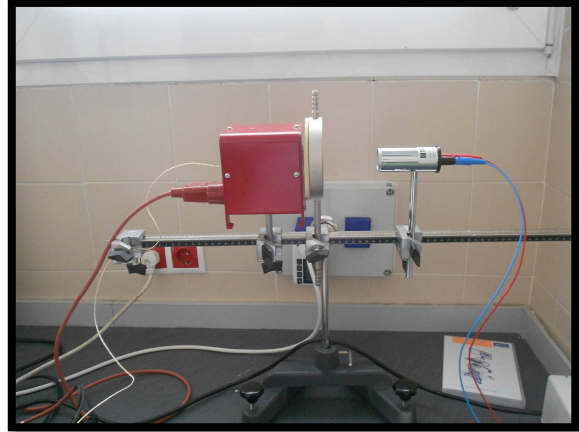
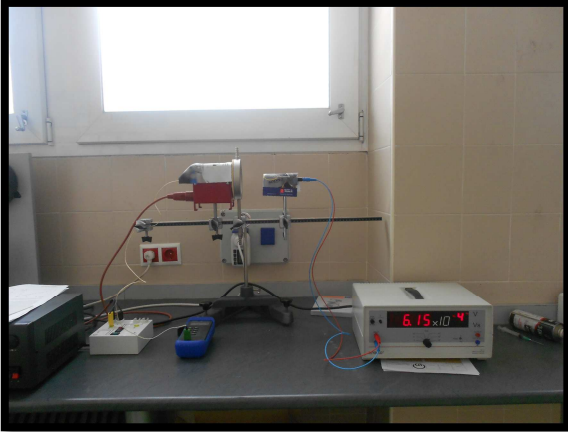
3.6. DESARROLLO DEL EXPERIMENTO

Para el desarrollo de la práctica se aconseja seguir los siguientes pasos:

- Enchufar el microvoltímetro al menos 10 minutos antes de iniciar el experimento para que se caliente.
- Quitar la ventanilla de cristal que protege la termopila.
- Apantallar la termopila con un cartón oscuro y verificar el punto cero del microvoltímetro.
- Medir la temperatura de la habitación y apuntar dicho valor.
- Medir la temperatura del cilindro de latón y el voltaje V de salida inicial de la termopila y apuntar estos valores.
- Encender el horno eléctrico y por cada incremento de temperatura de 25°C, apuntar el valor del voltaje correspondiente hasta llegar a los 450°C.
- Una vez alcanzada una temperatura de entre 400°C y 500°C se apagará el horno eléctrico.
- Por cada descenso de temperatura de 25°C apuntar, de nuevo, el valor de la tensión.

- Cuando la temperatura alcance un valor de entre 50°C y la temperatura de la habitación, sacar el sensor de temperatura del horno eléctrico, medir la temperatura de la habitación y anotar este valor.

A continuación se muestran algunas fotos del montaje del equipo en el laboratorio y de sus componentes:



Figuras 3.6.1 y 3.6.2. Montaje del equipo en laboratorio



Figura 3.6.3. Microvoltímetro

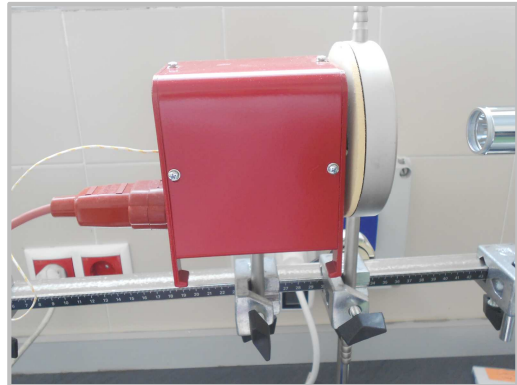


Figura 3.6.4. Horno eléctrico y accesorio negro y accesorio bomba agua



Figura 3.6.5. Termopila

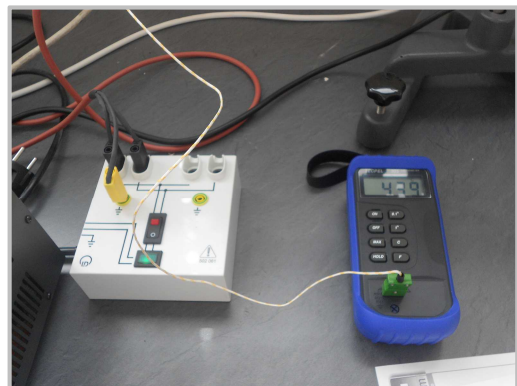


Figura 3.6.6. Control de encendido y apagado del horno eléctrico y termómetro digital

3.7. RESULTADOS

Se han realizado 7 ensayos en diferentes días, con diferentes temperaturas de inicio en habitación y utilizando, en algún ensayo refrigeración y en otros no. También se ha realizado un ensayo sin quitar previamente la ventana de cristal de protección de la termopila, para comprobar cómo influía ésta en las medidas.

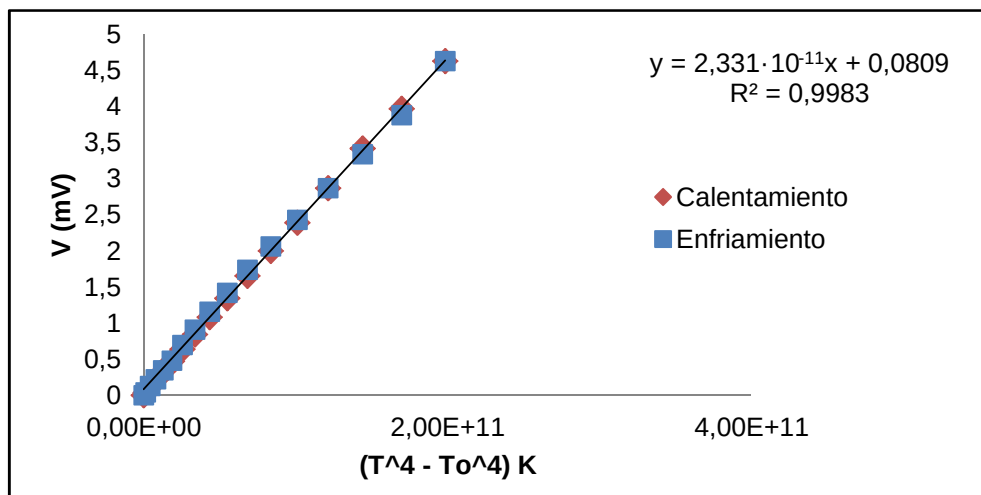
El ensayo completo, es decir, con curva de calentamiento y de enfriamiento, sólo se ha realizado en tres ocasiones, debido al gran tiempo necesario para conseguir el enfriamiento completo del cuerpo negro; y considerando la falta de relevancia de esta parte del ensayo, ya que sólo se realiza para comprobar que los datos medidos del voltaje de salida de la termopila en las diferentes temperaturas del enfriamiento, corresponden, o son muy similares, a las medidas en las diferentes temperaturas en el proceso de calentamiento.

A continuación exponemos los resultados de las mediciones de dichos ensayos en una tabla y la representación gráfica del voltaje de salida V en función de $(T^4 - T_0^4)$:

Ensayo 1:

Fecha:	Febrero 2014
Refrigeración:	NO
Tª Inicial habitación:	12,9 °C

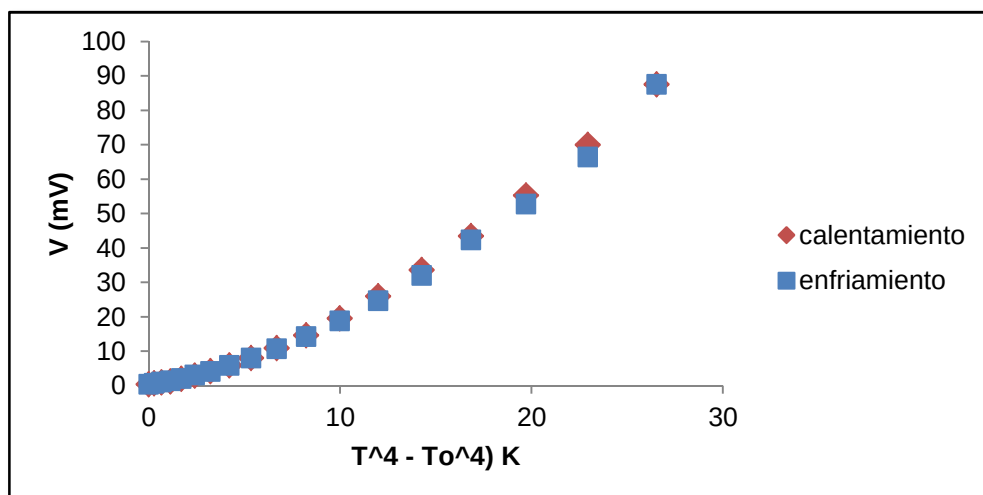
$T (^{\circ}C)$	$T (K)$	$T^4 - T_0^4 (K^4)$ ($\times 10^{-10}$)	$V \uparrow$ (mV)	$V \downarrow$ (mV)
12,9	285,9	0,00	0	0
25	299	0,12	0,036	0,04
50	323	0,42	0,116	0,13
75	348	0,80	0,213	0,223
100	373	1,27	0,331	0,345
125	398	1,84	0,47	0,48
150	423	2,53	0,637	0,697
175	448	3,36	0,842	0,907
200	473	4,34	1,08	1,155
225	498	5,48	1,345	1,419
250	523	6,81	1,654	1,74
275	548	8,35	2	2,06
300	573	10,11	2,39	2,43
325	598	12,12	2,87	2,87
350	623	14,40	3,42	3,34
375	648	16,96	3,97	3,88
400	673	19,85	4,63	4,63



Ensayo 2: Con cristal en la termopila

Fecha:	12/06/2014
Refrigeración:	NO
Tª Inicial habitación:	26,4 °C

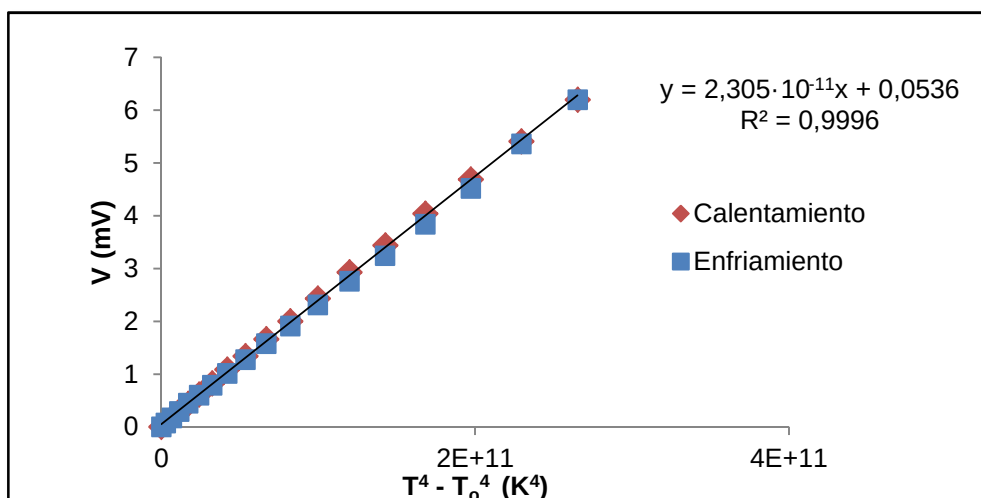
$T (^{\circ}C)$	$T (K)$	$T^4 - T_0^4 (K^4)$ ($\times 10^{-10}$)	$V \uparrow$ (mV)	$V \downarrow$ (mV)
26,4	299,4	0	0,4	0,39
50	323	0,28	0,7	0,7
75	348	0,66	1	1,1
100	373	1,13	1,3	1,4
125	398	1,71	2	2,1
150	423	2,40	2,9	3,1
175	448	3,22	4,2	4,1
200	473	4,20	5,9	5,9
225	498	5,35	8	8
250	523	6,68	10,9	10,7
275	548	8,21	14,6	14,3
300	573	9,98	19,6	18,8
325	598	11,98	26	24,7
350	623	14,26	33,6	32
375	648	16,83	43,5	42,4
400	673	19,71	55,3	52,8
425	698	22,93	70	66,4
450	723	26,52	87,6	87,6



Ensayo 3

Fecha:	23/06/2014
Refrigeración:	SI
Tª Inicial habitación:	26 °C

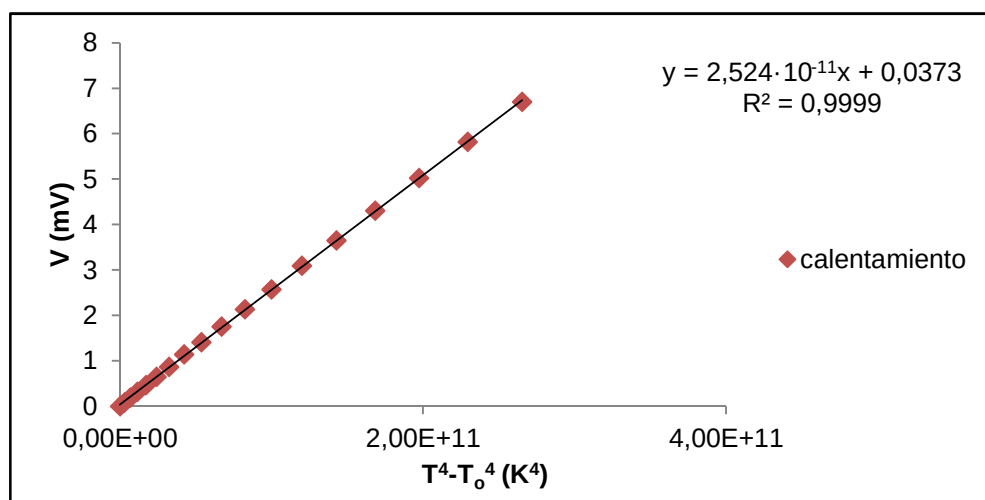
$T (^{\circ}C)$	$T (K)$	$T^4 - T_0^4 (K^4)$ ($\times 10^{-10}$)	$V \uparrow$ (mV)	$V \downarrow$ (mV)
26	299	0	0	0
50	323	0,29	0,07	0,07
75	348	0,67	0,17	0,17
100	373	1,14	0,29	0,29
125	398	1,71	0,44	0,45
150	423	2,40	0,61	0,60
175	448	3,23	0,82	0,79
200	473	4,21	1,09	1,01
225	498	5,35	1,34	1,28
250	523	6,68	1,66	1,58
275	548	8,22	2,00	1,91
300	573	9,98	2,43	2,31
325	598	11,99	2,93	2,76
350	623	14,27	3,44	3,24
375	648	16,83	4,04	3,84
400	673	19,72	4,69	4,52
425	698	22,94	5,41	5,36
450	723	26,53	6,20	6,20



Ensayo 4:

Fecha:	24/06/2014
Refrigeración:	NO
Tª Inicial habitación:	24,5 °C

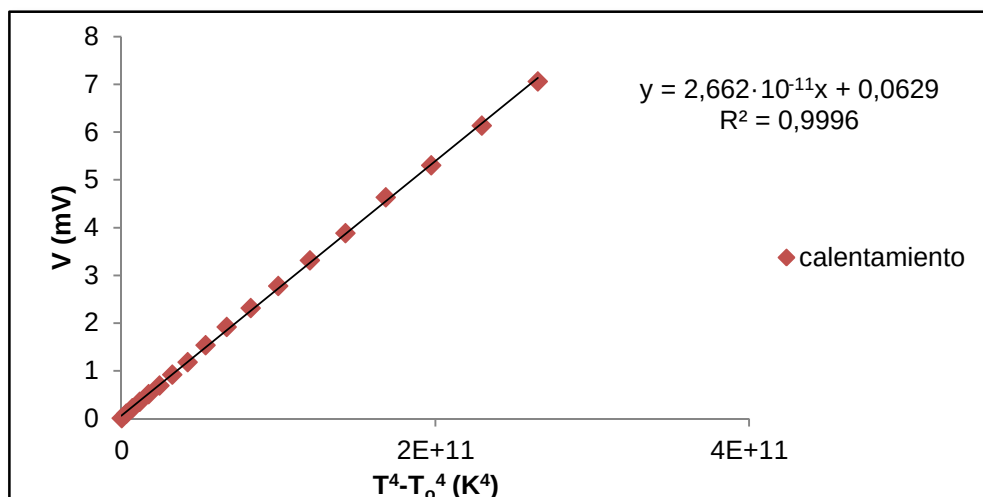
$T (^{\circ}\text{C})$	$T (\text{K})$	$T^4 - T_0^4 (\text{K}^4)$ ($\times 10^{-10}$)	$V \uparrow$ (mV)
24,5	297,5	0,31	0
50	323	0,68	0,085
75	348	1,15	0,187
100	373	1,73	0,315
125	398	2,42	0,466
150	423	3,24	0,65
175	448	4,22	0,866
200	473	5,37	1,14
225	498	6,70	1,41
250	523	8,23	1,75
275	548	10,00	2,13
300	573	12,00	2,57
325	598	14,28	3,09
350	623	16,85	3,65
375	648	19,73	4,3
400	673	22,95	5,02
425	698	26,54	5,82
450	723	30,31	6,7



Ensayo 5:

Fecha:	30/06/2014
Refrigeración:	NO
Tª Inicial habitación:	25,6 °C

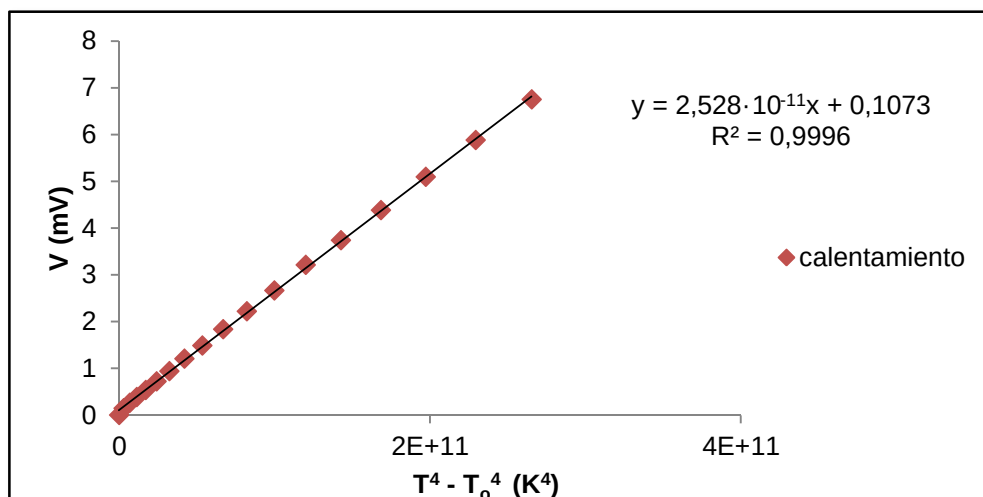
$T (^{\circ}\text{C})$	$T (\text{K})$	$T^4 - T_0^4 (\text{K}^4)$ ($\times 10^{-10}$)	$V \uparrow$ (mV)
25,6	298,6	0	0
50	323	0,29	0,099
75	348	0,67	0,212
100	373	1,14	0,345
125	398	1,71	0,503
150	423	2,41	0,689
175	448	3,23	0,913
200	473	4,21	1,179
225	498	5,36	1,53
250	523	6,69	1,915
275	548	8,22	2,31
300	573	9,99	2,77
325	598	11,99	3,31
350	623	14,27	3,88
375	648	16,84	4,63
400	673	19,72	5,3
425	698	22,94	6,13
450	723	26,53	7,06



Ensayo 6:

Fecha:	01/07/2014
Refrigeración:	NO
Tª Inicial habitación:	25,3 °C

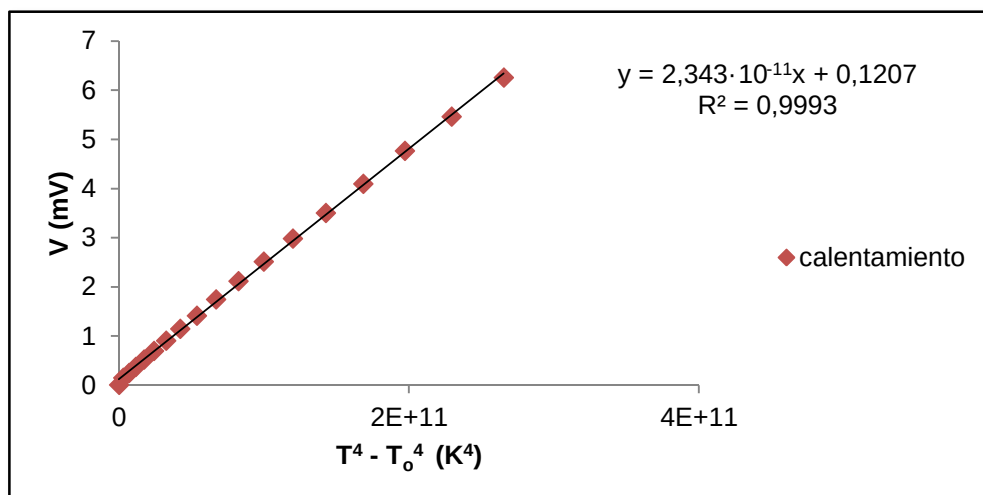
$T (^{\circ}\text{C})$	$T (\text{K})$	$T^4 - T_0^4 (\text{K}^4)$ ($\times 10^{-10}$)	$V \uparrow$ (mV)
25,3	298,3	0	0
50	323	0,30	0,145
75	348	0,67	0,26
100	373	1,14	0,383
125	398	1,72	0,537
150	423	2,41	0,721
175	448	3,24	0,94
200	473	4,21	1,206
225	498	5,36	1,486
250	523	6,69	1,833
275	548	8,23	2,22
300	573	9,99	2,66
325	598	12,00	3,21
350	623	14,27	3,74
375	648	16,84	4,38
400	673	19,72	5,09
425	698	22,94	5,88
450	723	26,53	6,75



Ensayo 7:

Fecha:	02/07/2014
Refrigeración:	SI
Tª Inicial habitación:	24,5 °C

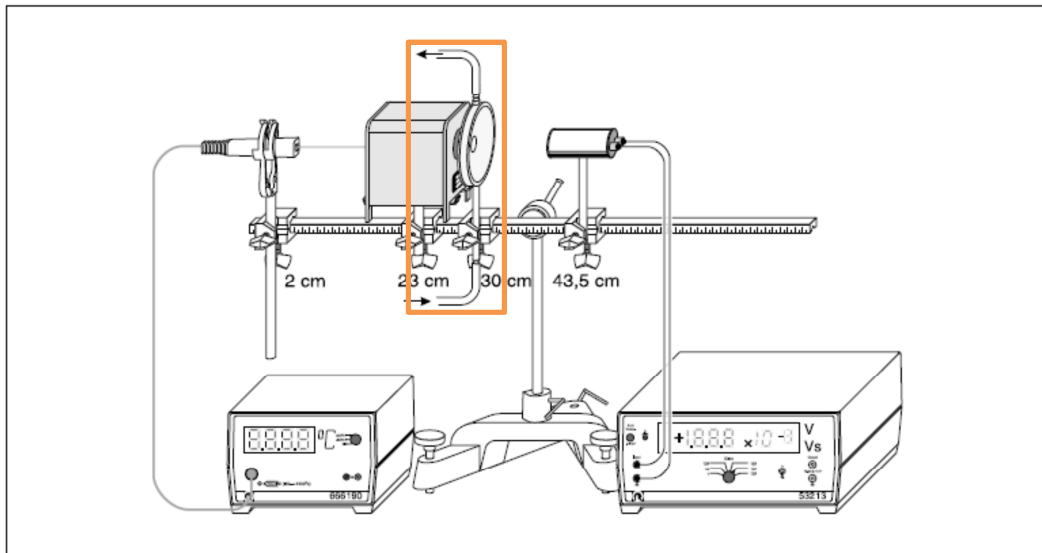
$T (^{\circ}\text{C})$	$T (\text{K})$	$T^4 - T_0^4 (\text{K}^4)$ ($\times 10^{-10}$)	$V \uparrow$ (mV)
24,5	297,5	0	0
50	323	0,31	0,145
75	348	0,68	0,245
100	373	1,15	0,37
125	398	1,73	0,519
150	423	2,42	0,69
175	448	3,24	0,902
200	473	4,22	1,142
225	498	5,37	1,412
250	523	6,70	1,738
275	548	8,23	2,11
300	573	10,00	2,51
325	598	12,00	2,98
350	623	14,28	3,5
375	648	16,85	4,09
400	673	19,73	4,76
425	698	22,95	5,46
450	723	26,54	6,25



3.8. CONCLUSIONES

De los resultados en las medidas se desprenden las siguientes conclusiones:

- 1) Podemos observar, que en todos los ensayos (excepto Ensayo 2 con cristal) se **cumple la relación lineal entre el voltaje de salida de la termopila y la diferencia de temperaturas entre la temperatura del cuerpo negro y la ambiental elevados a la cuarta potencia**, ya que como se puede ver en las gráficas, una vez dibujados los puntos de las medidas tomadas, se ha podido realizar un ajuste lineal, dando como resultado una línea recta con coeficiente de determinación R^2 muy cercano a la unidad.
- 2) Se ha realizado un **ensayo con el cristal (Ensayo 2)** puesto en la termopila. En este ensayo, como podemos observar, **no se cumpliría la relación lineal** entre V y $(T^4 - T_0^4)$. Si dibujamos su línea de tendencia sería más aproximada a una tendencia exponencial y no lineal como en los demás casos. Esto es debido a que se realizó el ensayo sin quitar el cristal de protección de la termopila y cuando una radiación incide sobre un cristal, una parte se refleja, otra es absorbida por el vidrio y una tercera es transmitida. Además un cristal absorbe más la radiación de onda larga que la de onda corta, hecho que falseó sistemáticamente la medida de la temperatura en la termopila dependiente de la intensidad radiante.
- 3) Si observamos los resultados de los ensayos con refrigeración (**Ensayos 3 y 7**) y el **Ensayo 1**, realizado en invierno, con temperatura ambiental de 12,9 °C; podemos comprobar que las **pendientes en las rectas son menores** que en los ensayos donde no se utilizó refrigeración. Esto se debe al sistema de refrigeración, ya que éste consiste en el paso de agua a través del accesorio destinado para ello, el cuál se encuentra justo a la salida del horno eléctrico, como podemos ver en la siguiente figura:



Aunque el sistema de refrigeración está destinado a evitar el calentamiento de la carcasa de la termopila cuando el horno alcanza grandes temperaturas, éste puede producir interferencias en la emisión de la radiación del cuerpo negro hacia la termopila, y perder parte de ésta radiación por convección, por lo que el interior de la termopila recibiría menos radiación, lo que se traduce en una diferencia de potencial menor (ver “Instrucciones de funcionamiento de la termopila” en Apéndice 1)

- 4) En los **Ensayos 4, 5 y 6**, podemos observar una **pendiente** muy parecida entre ellos y algo **más pronunciada** que en los anteriores ensayos debido a que en estos casos la **diferencia de potencial detectada por la termopila es algo mayor** que en los casos anteriores ya que en éstos no se ha utilizado refrigeración. Destacar también, que el de **mayor pendiente** (**Ensayo 5**), corresponde al de **mayor temperatura ambiental**; debido a que los valores del eje de ordenadas son menores, ya que al calcular $(T^4 - T_0^4)$ y siendo T_0 la temperatura ambiente, la diferencia será menor, cuanto mayor sea T_0 y la pendiente de la recta se calcula como:

$$m = \frac{V_{\text{cuerpo negro}} - V_{\text{carcasa}}}{(T^4 - T_0^4)} \quad (\text{Ec. 8})$$

donde $V_{\text{cuerpo negro}}$ es la tensión en el cuerpo negro y V_{carcasa} es la tensión en la carcasa.

3.9. CÁLCULO DE LA CONSTANTE DE STEFAN-BOLTZMANN

Hemos comprobado que en los ensayos realizados se cumple la Ley de Stefan-Boltzmann, la cuál nos dice que la radiación total emitida por un cuerpo negro aumenta proporcionalmente a la temperatura absoluta T elevada a la cuarta potencia:

$$W = \sigma T^4, \text{ con } \sigma = 5,670 \cdot 10^{-8} (Wm^{-2}K^{-4})$$

A continuación podemos comprobar si la constante obtenida en los ensayos corresponde al valor de la constante de Boltzmann, $\sigma = 5,670 \cdot 10^{-8} (Wm^{-2}K^{-4})$, o a un valor muy similar al mismo.

Para ello, primero vamos a obtener las ecuaciones que nos relacionan las magnitudes medidas con las que queremos obtener:

La potencia P que llega al sensor se puede expresar en función de la diferencia de potencial ΔV que genera:

$$P = \frac{1}{\Gamma} \Delta V$$

Donde Γ es el factor de respuesta lineal que según las características técnicas de la termopila es de 0,16 mV/mW.

Si llamamos k a una constante que sería el producto del área colectora (A) de radiación de la termopila (no conocida) por la eficiencia (ξ) de la misma:

$$k = A \cdot \xi$$

Entonces la irradiencia W_{neto} que llega al sensor será:

$$W_{neto} = \frac{P}{k} = \frac{1}{\Gamma k} \Delta V = \frac{1}{\Gamma k} \cdot m \cdot (T^4 - T_{amb}^4) \quad (Ec. 9)$$

Teniendo en cuenta el ajuste lineal realizado en cada ensayo, en el cuál podemos obtener m , podemos relacionar la anterior ecuación con la de la ley de Stefan-Boltzmann y obtener de este modo la constante de Stefan-Boltzmann σ :

$$W_{neto} = W_{abs} - W_{amb} = \sigma(T^4 - T_{amb}^4) \quad (Ec. 10)$$

Relacionando la Ecuación 9 y 10 obtenemos la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{m}{\Gamma k} \quad (\text{Ec.11})$$

Con esta fórmula, primero vamos a obtener la constante media k de todos los ensayos, ya que el área de colección no la conocemos ni tampoco la eficiencia de la termopila, fijando σ con el valor real de Boltzmann y $\Gamma = 0,16 \text{ mV/mW}$.

A continuación, en el siguiente cuadro podemos observar los resultados obtenidos:

ENSAYOS	m (mV/mW)	k (m ²)
1	$2,331 \cdot 10^{-11}$	$2,5694 \cdot 10^{-6}$
3	$2,305 \cdot 10^{-11}$	$2,5408 \cdot 10^{-6}$
4	$2,524 \cdot 10^{-11}$	$2,7821 \cdot 10^{-6}$
5	$2,662 \cdot 10^{-11}$	$2,9343 \cdot 10^{-6}$
6	$2,528 \cdot 10^{-11}$	$2,7866 \cdot 10^{-6}$
7	$2,343 \cdot 10^{-11}$	$2,5826 \cdot 10^{-6}$

Con estos datos obtenemos un $k_{\text{medio}} = 2,6993 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$

A continuación, obtendremos el valor de la constante σ en cada ensayo, tomando como k , el valor medio obtenido:

ENSAYOS	$\sigma (\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-4})$	Error (%)
1	$5,3873 \cdot 10^{-8}$	4,9858
3	$5,3371 \cdot 10^{-8}$	5,8712
4	$5,8442 \cdot 10^{-8}$	3,0723
5	$6,1637 \cdot 10^{-8}$	8,7072
6	$5,8535 \cdot 10^{-8}$	3,2363
7	$5,4251 \cdot 10^{-8}$	4,3192

Si observamos la tabla podemos comprobar que las constantes de Boltzmann obtenidas en los ensayos son muy similares al valor real y si calculamos la media de todos los ensayos obtenemos una constante de Boltzmann:

$$\sigma_{medio} = 5,6685 \cdot 10^{-8} (W m^{-2} K^{-4})$$

que, como podemos comprobar, coincide prácticamente con el valor real.

$$A = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 = \pi \left(\frac{0,01}{2} \right)^2 = 7,854 \cdot 10^{-5} m^2$$

Aunque el área de colección A de la termopila no la conocemos, si observamos atentamente la ficha técnica de la termopila encontramos lo siguiente acerca de este área:

1 Datos técnicos	
Resistencia interna:	aprox. 10 Ω
Sensibilidad:	aprox. 0,16 mV/mW
Intervalo de longitud de onda:	150 nm — 15 μ m
Duración de regulación:	2 s — 3 s
Termoelementos:	16 cintas de constantan-manganesina, conectadas en serie, soldadas con plata. <u>Diámetro de la superficie de medida: 10 mm</u> ; 5 μ m espesor. Distancia a (entre termoelementos y abertura anterior): aprox. 50 mm (véase fig. 2)
Dimensiones:	Caja: 80 mm largo; 34 mm ϕ Mango: 100 mm largo; 10 mm ϕ
Peso:	aprox. 0,5 kg

Figura 3.9.1. Diámetro de la superficie de medida

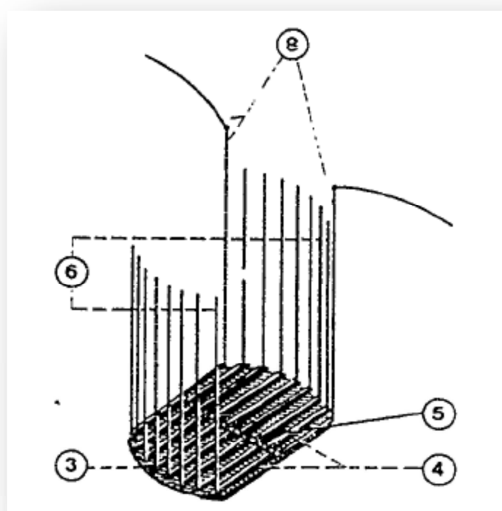


Figura 3.9.2. Forma de la superficie de medida

Según estos datos (figura 3.9.1) podemos hacer una estimación del área, quedando claro que sólo es una estimación y que no se puede conocer realmente:

$$A = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 = \pi \left(\frac{0,01}{2} \right)^2 = 7,854 \cdot 10^{-5} m^2$$

Pero según la figura 3.9.2, el área no sería de un círculo completo, por lo que estimaremos la mitad de éste:

$$A = \frac{7,854 \cdot 10^{-5}}{2} = 3,927 \cdot 10^{-5} m^2$$

Según el área aproximada y tomando el valor de k_{medio} podemos estimar, de igual forma, la eficiencia ξ de la termopila:

$$k_{medio} = A \cdot \xi$$

$$\xi = \frac{k_{medio}}{A} = \frac{2,6993 \cdot 10^{-6}}{3,927 \cdot 10^{-5}} = 0,0687$$

Como podemos comprobar, hemos estimado una eficiencia del 6,87 %, dato que podemos considerar como coherente, ya que la eficiencia de una placa solar está en torno al 10-20%.

4. DISEÑO DE LA PRÁCTICA EN LABORATORIO PARA LA ASIGNATURA DE INGENIERÍA TÉRMICA

4.1. ANTECEDENTES

A continuación se va a diseñar la práctica para realizar en el laboratorio la comprobación experimental de la Ley de Estefan Boltzmann.

La práctica se impartirá en el 2º curso de los Grados de Ingeniería Mecánica, Ingeniería Eléctrica, Ingeniería Electrónica Industrial, e Ingeniería de Organización Industrial; en la asignatura de Ingeniería Térmica, durante el desarrollo del Tema 12. Radiación, cuyo contenido es el siguiente:

12.1.- Introducción. 12.2.- Intensidad de la radiación. 12.2.1.- Definiciones. 12.2.2 Relación con la emisión. 12.2.3 Relación con la irradiación. 12.2.4 Relación con la radiosidad. 12.3.- Radiación de un cuerpo negro. 12.3.1 Distribución de Planck. 12.3.2 Ley de desplazamiento de Wien. 12.3.3 Ley de Stefan-Boltzmann. 12.3.4 Emisión de banda. 12.4.- Emisión superficial. 12.5. Absorción, reflexión y Transmisión superficiales. 12.5.1 Absortividad. 12.5.2 Reflectividad. 12.5.3 Transmisividad. 12.5.4 Consideraciones especiales. 12.6. Ley de Kirchhoff. 12.7. Superficie gris.

Como se puede observar queda totalmente justificado el desarrollo de esta práctica como refuerzo y aplicación práctica de las clases teóricas.

4.2. DISEÑO DE PRÁCTICA

Notas:

- La práctica estaría diseñada para un grupo de 20 alumnos, aunque podría adaptarse para el número de alumnos disponibles.
- Al estar la duración de la práctica limitada a 2 horas, sólo se tomarán datos para la realización de la curva de calentamiento en un grupo, y el siguiente grupo, al ser consecutivos, realizarán la curva de enfriamiento, aunque al ser el proceso de enfriamiento excesivamente lento, se tomarán sólo los datos que de tiempo en una hora y se complementarán con los datos del proceso de calentamiento del grupo anterior de prácticas.
- Toda la práctica, incluidos el dibujo de la curva y la resolución de los problemas propuestos (Ver Apéndice 3), se realizarán durante las dos horas de la práctica, entregándose al final de la misma una pequeña memoria debidamente cumplimentada.
- El alumno podrá utilizar los apuntes dados en el desarrollo del tema y la bibliografía que el alumno estime oportuna.
- Se ha confeccionado una ficha para el alumno de información acerca de la práctica a realizar (Ver Apéndice 2). Esa ficha se le entregará a los alumnos con antelación al día del desarrollo de la práctica.
- El profesor/ra tendrá un guión de la práctica (ver Apéndice 4), que a continuación se incluye, para que le sirva de apoyo en el desarrollo de la misma.
- También se ha confeccionado una ficha para que el alumno haga en ésta las tareas propuestas (Ver Apéndice 4) y la entregue al final de la práctica.

Ficha para el alumno: Incluida en Apéndice 2

UNIVERSIDAD DE JAÉN		
GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA		
FICHA PARA PRÁCTICAS EN LABORATORIO		
FECHA:	CÓDIGO:	VERSIÓN:
INFORMACIÓN BÁSICA		
ASIGNATURA: INGENIERÍA TÉRMICA		
NOMBRE DE LA PRÁCTICA: DEMOSTRACIÓN EXPERIMENTAL LEY ESTEFAN-BOLTZMANN		
TEMA DE LA PRÁCTICA: RADIACIÓN TÉRMICA		
LABORATORIO: 004	DURACIÓN: 2 HORAS	
CONTENIDO DE LA PRÁCTICA		
OBJETIVOS:		
- Introducir experimentalmente el concepto de radiación térmica. - Comprobar la Ley de Stefan-Boltzmann.		
INTRODUCCIÓN:		
Esta práctica está dirigida a los alumnos de la asignatura de Ingeniería Térmica y será impartida en el tema de radiación térmica. Con esta práctica se tratará de demostrar experimentalmente la ley de radiación del cuerpo negro, Ley de Stefan Boltzmann, mediante la utilización de un banco de ensayo, con el cual se demostrará la relación lineal entre la intensidad radiante que emite un cuerpo con la temperatura absoluta a la que se somete dicho cuerpo, cuando éste se asemeja a un cuerpo negro.		
FUNDAMENTOS TEÓRICOS:		
Todos los cuerpos irradian calor. La intensidad de esta radiación electromagnética, térmicamente estimulada, aumenta con la temperatura del cuerpo y también va a depender de la superficie de éste. En una longitud de onda dada, mientras más calor emita un cuerpo, mejor puede absorber esta radiación. Un cuerpo negro es aquél que absorbe toda la radiación incidente, sin importar la longitud de onda y la dirección; y aquél que para la temperatura y longitud de onda establecidas, emite más energía que ningún otro cuerpo. La ley de Stefan-Boltzmann nos dice que la radiación total emitida por un cuerpo negro aumenta proporcionalmente a la temperatura absoluta T elevada a la cuarta potencia. $W = \sigma T^4$, con $\sigma = 5,670 \cdot 10^{-8} \text{ (Wm}^{-2}\text{K}^{-4}\text{)}$ Pero, a la misma vez, el cuerpo negro absorbe radiación de su entorno. Por lo que en este experimento no mediremos la intensidad total de la radiación emitida W, sino la intensidad radiante W' la cuál calcularemos de la siguiente forma: La intensidad absorbida por el ambiente es $W_0 = \sigma T_0^4$ Por lo tanto, la intensidad emitida total W' sería: $W' = \sigma (T^4 - T_0^4)$		
DESARROLLO DE LA PRÁCTICA:		
Al inicio, el profesor explicará los fundamentos teóricos de la práctica y cómo deberá desarrollarse. Posteriormente se realizarán, entre los alumnos, grupos de 3/4 personas y cada grupo realizará 3 medidas, las cuales serán apuntadas posteriormente en una tabla conjunta en la pizarra. Una vez tomadas las medidas y apuntadas en la pizarra, los alumnos tendrán que dibujar la gráfica en la ficha de la práctica, la cuál represente la relación existente entre el voltaje de salida del microvoltímetro con la temperatura absoluta ($T^4 - T_0^4$). Finalizada ésta, se resolverán los problemas propuestos (dos por cada grupo). Por último, se hará entrega de una pequeña memoria, una por grupo, debidamente cumplimentada, en donde se indicarán los miembros del grupo.		
Procedimiento:		
- Enchufar el microvoltímetro al menos 10 minutos antes de iniciar el experimento para que se caliente. - Quitar la ventanilla de cristal que protege la termopila. - Apantallar la termopila con un cartón oscuro y verificar el punto cero del microvoltímetro. - Medir la temperatura de la habitación y apuntar dicho valor. - Medir la temperatura del cilindro de latón y el voltaje V de salida inicial de la termopila y apuntar estos valores. - Encender el horno eléctrico y por cada incremento de temperatura de 25°C, apuntar el valor del voltaje correspondiente hasta llegar a los 450°C. - Una vez alcanzada una temperatura de entre 400°C y 500°C se apagará el horno eléctrico. - Por cada descenso de temperatura de 25°C apuntar, de nuevo, el valor de la tensión. - Cuando la temperatura alcance un valor de entre 50°C y la temperatura de la habitación, sacar el sensor de temperatura del horno eléctrico, medir la temperatura de la habitación y anotar este valor.		

SISTEMA DE EVALUACIÓN CRITERIOS DE CALIFICACIÓN			
ASPECTO	CRITERIOS	INSTRUMENTO	PESO
Asistencia y participación	Asistencia a la práctica y participación activa en ésta	Hojas de firma Comentarios de profesor	20%
Realización de trabajos, casos y ejercicios	Entrega de memoria y ejercicios bien resueltos. Se analizará la estructura, calidad de la documentación, ortografía y presentación	Evaluación de la memoria	50%
Conceptos teóricos sobre radiación	Dominio de conocimientos teóricos y operativos del Tema 12: Radiación	Preguntas orales al alumnado	30%
COMPETENCIAS BÁSICAS			
CB1	Capacidad para la resolución de los problemas matemáticos que puedan plantearse en el tema. Aptitud para aplicar los conocimientos sobre: álgebra lineal; geometría; geometría diferencial; cálculo diferencial e integral; ecuaciones diferenciales y en derivadas parciales; métodos numéricos; algorítmica numérica; estadística y		
CB2	Comprensión y dominio de los conceptos básicos sobre las leyes generales de la radiación, termodinámica, campos y ondas y electromagnetismo y su aplicación para la resolución de problemas.		
CC1	Conocimientos de termodinámica aplicada y transmisión de calor. Principios básicos y su aplicación a la resolución de problemas de		
CT1	Capacidad para trabajar, dirigir y gestionar conflictos en un grupo multidisciplinar y/o un entorno multilingüe.		
RESULTADOS DEL APRENDIZAJE			
Resultado 1	Dominio de los conceptos básicos asociados a la termodinámica clásica y a los		
Resultado 2	Cálculo de propiedades y características asociadas a la transferencia de		
Resultado 3	Dominio en la realización de balances energéticos y exergéticos de sis		
Resultado 4	Conocimiento de las leyes de la radiación y en especial de la Ley de Stefan Boltzmann y de su comprobación práctica.		
Resultado 5	Conocimiento de las propiedades de radiación de un cuerpo negro y sus posibles aplicaciones en ingeniería.		
BIBLIOGRAFÍA			
- Fundamentos de transferencia de calor. Edición: 4ª ed. Autor: Incropera, Frank P. Editorial: México [etc.]: Pearson, cop.1999. - Transferencia de calor y masa: un enfoque práctico. Edición: 3ª ed. Autor: Çengel, Yunus A.. Editorial: México [etc.]: McGraw Hill, 2007.			

Guión para el profesor/ra:

A modo de ejemplo, a continuación se desarrolla una práctica tipo para que sirva de orientación o guión para el profesorado:

FUNDAMENTOS TEÓRICOS:**Introducción**

- El cuerpo negro.
- Ley de Stefan Boltzmann.

Desarrollo

Todos los cuerpos irradian calor. La intensidad de esta radiación electromagnética, térmicamente estimulada, aumenta con la temperatura del cuerpo y también va a depender de la superficie de éste. En una longitud de onda dada, mientras más calor emita un cuerpo, mejor puede absorber esta radiación.

Un cuerpo negro es aquél que absorbe toda la radiación incidente, sin importar la longitud de onda y la dirección; y aquél que para la temperatura y longitud de onda establecidas, emite más energía que ningún otro cuerpo.

La ley de Stefan-Boltzmann nos dice que la radiación total emitida por un cuerpo negro aumenta proporcionalmente a la temperatura absoluta T elevada a la cuarta potencia.

$$W = \sigma T^4, \text{ con } \sigma = 5.670 \cdot 10^{-8} (Wm^{-2}K^{-4})$$

Pero, a la misma vez, el cuerpo negro absorbe radiación de su entorno. Por lo que en este experimento no mediremos la intensidad total de la radiación emitida W , sino la intensidad radiante W' la cuál calcularemos de la siguiente forma:

$$\text{La intensidad absorbida por el ambiente es: } W_0 = \sigma T_0^4$$

$$\text{Por lo tanto, la intensidad emitida total } W' \text{ sería: } W' = \sigma(T^4 - T_0^4)$$

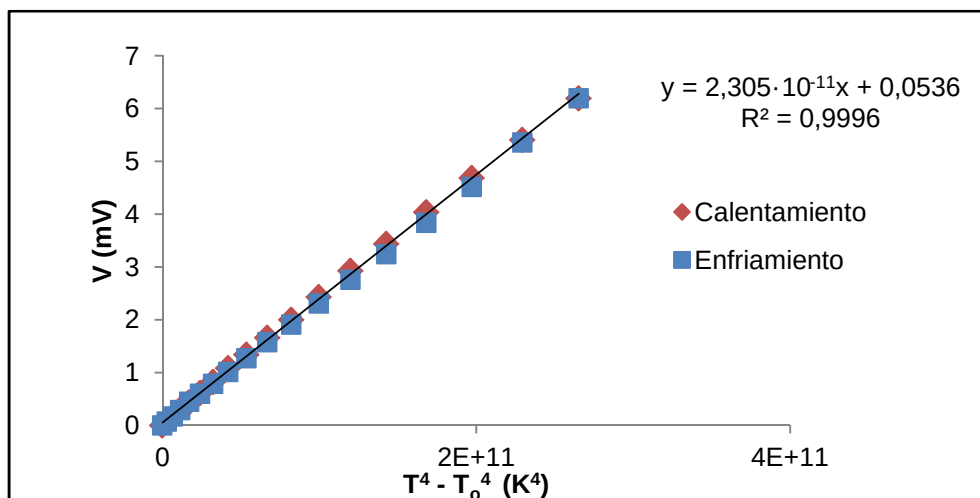
DESARROLLO DE LA PRÁCTICA:

- Enchufar el microvoltímetro al menos 10 minutos antes de iniciar el experimento para que se caliente.
- Quitar la ventanilla de cristal que protege la termopila.
- Apantallar la termopila con un cartón oscuro y verificar el punto cero del microvoltímetro.
- Medir la temperatura de la habitación y apuntar dicho valor.
- Medir la temperatura del cilindro de latón y el voltaje V de salida inicial de la termopila y apuntar estos valores.
- Encender el horno eléctrico y por cada incremento de temperatura de 25°C , apuntar el valor del voltaje correspondiente hasta llegar a los 450°C .
- Una vez alcanzada una temperatura de entre 400°C y 500°C se apagará el horno eléctrico.
- Por cada descenso de temperatura de 25°C apuntar, de nuevo, el valor de la tensión.
- Cuando la temperatura alcance un valor de entre 50°C y la temperatura de la habitación, sacar el sensor de temperatura del horno eléctrico, medir la temperatura de la habitación y anotar este valor.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES**Tabla:** Mediciones de T^a y V para el calentamiento y enfriamiento

$T (^{\circ}C)$	$T (K)$	$T^4 - T_0^4 (K^4)$ ($\times 10^{-10}$)	$V \uparrow$ (mV)	$V \downarrow$ (mV)
26	299	0	0	0
50	323	0,29	0,07	0,07
75	348	0,67	0,17	0,17
100	373	1,14	0,29	0,29
125	398	1,71	0,44	0,45
150	423	2,40	0,61	0,60
175	448	3,23	0,82	0,79
200	473	4,21	1,09	1,01
225	498	5,35	1,34	1,28
250	523	6,68	1,66	1,58
275	548	8,22	2,00	1,91
300	573	9,98	2,43	2,31
325	598	11,99	2,93	2,76
350	623	14,27	3,44	3,24
375	648	16,83	4,04	3,84
400	673	19,72	4,69	4,52
425	698	22,94	5,41	5,36
450	723	26,53	6,20	6,20

Gráfica: Representación gráfica del voltaje de salida V en función de $(T^4 - T_0^4)$



En la figura se muestra el voltaje de salida V de la termopila como una función de la diferencia entre la temperatura T del horno y la temperatura T_0 de la habitación, cada una elevada a la cuarta potencia. Como se puede apreciar en la figura esta relación es una aproximación a una línea recta, tal como predijo Stefan Boltzman en su ley.

Si examinamos detenidamente la recta, podemos observar en algunos puntos una ligera desviación, que puede ser debida a alguna de las siguientes causas:

- La medida en la termopila puede verse afectada por una pérdida radiante debido a la convección.
- Influencias ambientales.
- Aumento de temperatura de los puntos de comparación de la carcasa por calentamiento de ésta debido al aumento de temperatura del horno.

TAREAS

- A partir de los datos compartidos para varias temperaturas, comprueba la ley de Stefan-Boltzmann, y representa gráficamente el ajuste realizado.
- A partir de la pendiente obtenida en la gráfica, calcular la constante de Stefan-Boltzmann.
- Cada grupo resolverá dos problemas de los propuestos en la relación.

Nombre:	Fecha:	Grupo:
Diagrama $mV - T^4 - T_0^4$		

Bibliografía

Incropera, Frank P. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*. Edición: 4ª ed.

Editorial: Pearson

Çengel, Yunus A. (2007). *Transferencia de calor y masa: un enfoque práctico*.

Editorial McGraw Hill.

Páginas Web consultadas

<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/cuantica/negro/experiencia/experiencia.htm>

<http://fmc.unizar.es/12ciclo/docs/pr3.pdf>

http://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_Stefan-Boltzmann

Artículos consultados

Cardona-Maciel, F. Alberto. *Sistema de radiación térmica*. Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías de la Universidad de Guadalajara. (2010)

E.L. Muñoz, M. Creus, F. Sanjuan, H. Rabal, J. Gallego Sagastume. *Comprobación experimental de la ley de Stefan-Boltzmann en la Cátedra de Física III de Ingeniería de la UNLP*. Dpto. de Cs. Básicas, Fac. de Ingeniería, UNLP, Argentina. (2013)

APÉNDICES

APÉNDICE 1: FICHAS TÉCNICAS

APÉNDICE 2: FICHA DE INFORMACIÓN PARA EL ALUMNO

APÉNDICE 3: RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS PROPUESTOS

APÉNDICE 4: FICHA EJEMPLO DE PRÁCTICA Y FORMULARIO DE ENTREGA
DE PRÁCTICA DEL ALUMNO

APÉNDICE 1: FICHAS TÉCNICAS

APÉNDICE 2: FICHA DE INFORMACIÓN PARA EL ALUMNO

APÉNDICE 3: RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS PROPUESTOS

APÉNDICE 4: FICHA EJEMPLO DE PRÁCTICA Y FORMULARIO DE ENTREGA DE PRÁCTICA DEL ALUMNO