

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Física

Segundo semestre de 2022

Profesor Ernesto Montero Zeledón

Práctica # 5.2.

Simulaciones de cuerpos radiantes y cantidades fotométricas¹

La Práctica #5 consta de dos partes. En la primera parte se realiza una práctica de laboratorio donde se busca familiarizar al estudiante con el proceso de medición de la intensidad luminosa y la iluminancia, pero también con los instrumentos de medición y con las unidades de medida. En la segunda, se estudia el fenómeno de emisión de luz por emisión térmica y los conceptos asociados con la radiometría y la fotometría utilizando plataformas de simulación computacional.

Objetivo general:

Realizar ensayos por simulación computacional y experimentos sencillos para comprender las propiedades radiométricas y fotométricas más importantes.

Objetivos específicos:

1. Repasar las leyes y los conceptos de emisión térmica por cuerpos radiantes.
2. Diferenciar entre cantidades radiométricas y fotométricas.
3. Utilizar simulaciones computacionales sobre la emisión térmica de cuerpos radiantes para facilitar la asimilación de sus principios.
4. Utilizar simulaciones computacionales para comprender el significado y la aplicación de los conceptos fotométricos.

Introducción

Todos los cuerpos emiten radiación electromagnética debido a su temperatura. Cuando los cuerpos están cerca del cero absoluto, su emisión es muy baja con longitudes de onda muy largas, que corresponden a fotones de baja energía. Por ejemplo, la Teoría de la Gran Explosión que generó el Universo liberó muchísima energía a una elevadísima temperatura, pero 13700 millones de años después, el Universo se ha expandido y enfriado tal que su temperatura actual es cercana a los 3 K. A una temperatura tan baja, el Universo produce una emisión térmica en la región de microondas del espectro proveniente de todas partes del Universo.

Como resulta evidente, si un cuerpo está emitiendo radiación electromagnética, su energía interna irá disminuyendo. Si su energía interna disminuye y no hay ninguna reacción química, entonces la temperatura del cuerpo también disminuye. Es decir, los cuerpos que emiten radiación, disminuyen su temperatura. Esta emisión de energía por efecto de la temperatura del cuerpo, se conoce como

¹ Guía elaborada por el profesor Ernesto Montero Zeledón

emisión por radiación o simplemente, **radiación**, y es uno de los tres mecanismos de transferencia de calor [1].

El primero en estudiar la emisión de energía radiante fue el físico alemán Wilhelm Wien, quien en 1893 formuló la ley que lleva su nombre. Esta ley física, establece que los cuerpos radiantes, presentan un máximo de emisión a una determinada longitud de onda, que está relacionada con la temperatura absoluta del cuerpo. La forma habitual de escribir esta ley es la siguiente:

$$\lambda_{max}T = C \quad (\text{ec. 5.1})$$

donde la constante, $C = 2898 \mu\text{m K}$ [2]. Igualmente, como el producto de la temperatura de cualquier cuerpo por la longitud de onda de su máximo de emisión es constante, también se puede escribir como

$$\lambda_{max1}T_1 = \lambda_{max2}T_2 \quad (\text{ec. 5.2})$$

Pero la Ley de Wien, está contenida en otra ley más general que describe la emisión de radiación de un cuerpo por efecto de su temperatura para distintas longitudes de onda. Esta otra ley se conoce como Ley de Planck para la radiación de cuerpo negro y establece que los cuerpos negros presentan un espectro de emisión que depende únicamente de su temperatura. Para una temperatura determinada, el cuerpo negro emite (y absorbe) la máxima cantidad de energía posible. El cuerpo negro es una entidad teórica, pero en la práctica se han conseguido cuerpos con una emisión muy semejante a la de un cuerpo negro ideal, y por ello se utilizan como patrones de calibración.

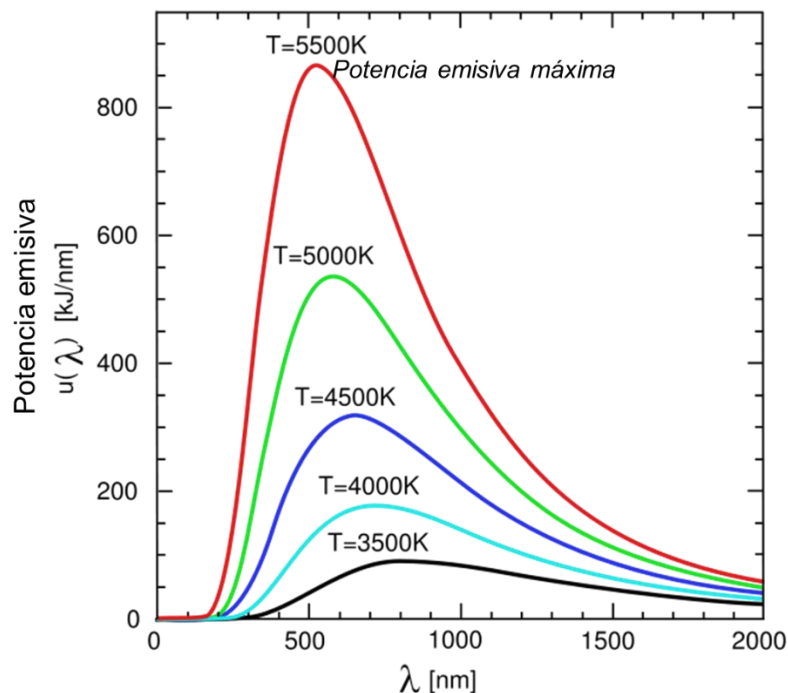


Figura 1. Potencia emisiva de un cuerpo negro para distintas temperaturas [3].

La Figura 1 presenta varios espectros de emisión de un cuerpo negro para distintas temperaturas. Se aprecia que el máximo de emisión aumenta a longitudes de onda más largas (menos energía) conforme disminuye la temperatura.

Si ahora consideramos la potencia total emitida por un cuerpo a una cierta temperatura, debemos integrar la curva de Ley de Planck para todas las longitudes de onda en las que emite. A partir de esta lógica, llegamos a la Ley de Stefan-Boltzmann, la cual establece que la potencia emitida por un cuerpo es proporcional al área de su superficie, A , a su emisividad, ε , y a la cuarta potencia de su temperatura absoluta, T^4 . La constante de proporcionalidad, σ , se denomina constante de Stefan-Boltzmann y está dada por, $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ [1].

$$H = A\varepsilon\sigma T^4 \quad (\text{ec. 5.3})$$

La emisividad indica la fracción que la emisión de energía de un cuerpo real se aparta de la de un cuerpo negro, cuya emisividad es máxima ($\varepsilon = 1$). En otras palabras, para un cuerpo real, la emisividad toma valores entre 0 y 1. Por norma general, la emisividad de cuerpos de color oscuro suele ser mayor que la de cuerpos claros, pero no demasiado, pues la mayoría de los materiales tienen emisividades mayores de 0,7. Como referencia, el valor de la emisividad del asfalto puede tomar valores entre 0,9 y 0,98, mientras que la emisividad de la nieve es 0,83 [4]. Debe recordar que la emisividad no solo se asocia con la capacidad emisiva de un cuerpo, sino también su capacidad de absorción. Cuando un cuerpo que irradia energía alcanza el equilibrio térmico con el entorno, es porque lo que está emitiendo es igual a lo que está absorbiendo. Así, entre mayor sea la emisividad de un cuerpo, éste emite mayor energía, pero también absorberá con mayor facilidad la radiación.

Conforme aumenta la temperatura de un cuerpo, este comienza a emitir más radiación y su máximo de emisión se produce a menores longitudes de onda. Si la temperatura aumenta lo suficiente, llega un momento en que su emisión se vuelve importante en la franja roja del espectro y se comienza a ver su emisión, como se deduce la Figura 1. La temperatura a partir de la cual un cuerpo comienza a emitir luz visible está por encima de 500 °C (unos 800 K), cuando se dice que el cuerpo comienza a estar al “rojo vivo”. Como una parte importante de las estrellas tienen temperaturas de 3000 K o más, entonces su máximo de emisión se alcanza en la región visible del espectro. De hecho, el máximo de emisión en las estrellas solo depende de su temperatura, no de su composición. El Sol, por ejemplo, presenta su máximo de emisión cerca de 5700 K, y a esta temperatura el color que se produce es lo que llamamos blanco incandescente.

El color que adquiere un cuerpo incandescente, depende fundamentalmente de la temperatura y es independiente del material. Este hecho permite asociar el color de la fuente a su temperatura. En otras palabras, una fuente luminosa se puede caracterizar por la temperatura de color, es decir, la temperatura a la cual un cuerpo negro produciría la misma sensación de color. Por lo tanto, la **temperatura de color**, es la temperatura a la cual un cuerpo negro incandescente tendría el mismo color que una fuente luminosa dada. La temperatura de color se representa en kelvin y sus valores típicos suelen ir de 1000 K a 10000 K. Como los espectros de emisión de las estrellas se ajustan bien al espectro de emisión de un cuerpo negro, su color permite saber a qué temperatura está la superficie de la estrella. A pesar de su gran utilidad, la temperatura de color no sirve para representar el color de cualquier fuente, esta temperatura solo permite representar las

características luminosas de algunas fuentes que producen colores en una determinada gama, como se aprecia en la Figura 2.

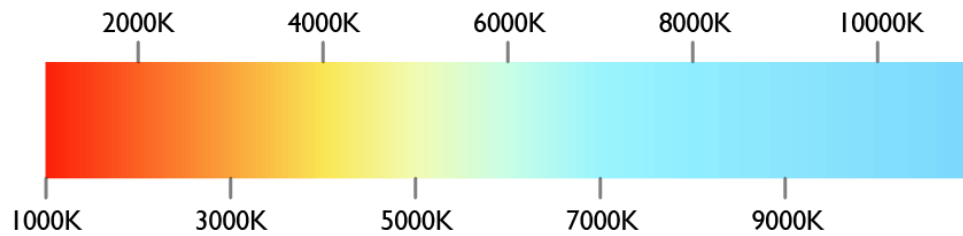


Figura 2. Temperatura de color de diferentes fuentes incandescentes [5].

En la actualidad son pocas las fuentes luminosas comerciales que emiten luz según la Ley de Planck, porque existen distintos principios y fenómenos que generan luz, como los tubos fluorescentes o las luminarias LED. Sin embargo, aunque los espectros de estas fuentes son distintos a los de un cuerpo negro, éstas presentan un color que es posible asociar, por semejanza, con el color que produciría un cuerpo negro a una temperatura y, por lo tanto, también es posible asociar con tal fuente, una temperatura de color que sirve para caracterizarla.

También es importante mencionar que como el color es un atributo de la percepción visual de los seres humanos, podemos caracterizar cualquier fuente luminosa desde una perspectiva humana pero también desde una perspectiva más objetiva. Aunque la objetividad es el propósito de la ciencia, la ciencia no puede prescindir de la caracterización de las fuentes luminosas desde el punto de vista de los seres humanos. Por este mismo motivo, hubo que crear una magnitud física y una unidad en el Sistema Internacional de Unidades que permitiera introducir la variable humana dentro de la medida de la luz, dicha magnitud es la intensidad luminosa, cuya unidad es la candela. La fotometría permite la caracterización de la luz desde la perspectiva humana, mientras que la radiometría sirve para caracterizar la luz desde una perspectiva más general y objetiva. Los conceptos más importantes de la fotometría (iluminancia, intensidad luminosa y flujo luminoso) y de la radiometría (intensidad radiante y flujo radiante) se desarrollaron con suficiente profundidad en la Práctica 5.1.

Trabajo para la introducción del informe

En la introducción de su informe de la Práctica #5, sobre cuerpos radiantes y cantidades fotométricas, debe revisar los siguientes temas. Recuerde que la introducción se debe escribir en prosa y en tercera persona del singular:

1. Indique cuál es la ecuación matemática que describe la Ley de Planck e indique el significado de sus términos.
2. Mencione cuáles son las longitudes de onda características de la región visible del espectro electromagnético y, además, construya una tabla donde muestren las longitudes de onda representativas de los colores violeta, azul, verde, amarillo, naranja y rojo.
3. Busque información y reescriba, en sus propias palabras, el concepto de temperatura de color.
4. Busque si en alguna área de la ciencia o la técnica existe un método para determinar la temperatura de cuerpo incandescente a partir de su color.

5. Explique cómo funcionan los termómetros infrarrojos e indique cuáles son las longitudes de onda con las que trabaja.
6. Indique cuáles son las unidades en el SI de la iluminancia, la intensidad luminosa, el flujo luminoso, la intensidad radiante y el flujo radiante.
7. Comente la semejanza entre la curva de emisión del Sol y la curva de sensibilidad del ojo humano. ¿Habrá alguna relación o influencia entre uno y el otro?

Equipo requerido

Para realizar esta práctica se requiere una computadora con conexión a Internet. Para la simulación, se recomienda la simulación de la plataforma “Física en la escuela - HTML5” de Vladimir Vascak. Para ello puede utilizar los vínculos que se indican en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Direcciones electrónicas de las simulaciones empleadas en esta práctica.

Tema	Vínculos electrónicos
Cuerpo negro	https://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool/template.php?f=opt_certaleso&l=es
Flujo luminoso	https://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool/template.php?f=opt_svtok&l=es
Intensidad luminosa	https://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool/template.php?f=opt_svitivost&l=es
Iluminancia ²	https://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool/template.php?f=opt_osvetleni&l=es

Procedimiento

A. *Cuerpo negro*

1. Utilice la simulación de cuerpo negro (Cuadro 1) para realizar esta parte.
2. Practique el uso del simulador de cuerpo negro, determine cómo se cambia la temperatura y para qué sirven los botones interactivos.
3. Una vez que sabe cómo utilizarla, capture una imagen de pantalla de los espectros generados en la simulación (puede utilizar el programa “Recortes” de Windows) para las siguientes temperaturas: 3000 K, 3500 K, 4000 K, 4500 K, 5000 K, 5500 K y 6000 K. Note que la posición del máximo de emisión sigue la Ley de Wien.
4. Ponga cuidado en que la energía emitida en la región visible comienza a partir de una cierta temperatura. Estime cuál es esa temperatura, según la simulación.

B. *Flujo luminoso*

1. Utilice la simulación de flujo luminoso (Cuadro 1) para realizar esta parte.
2. Practique el uso del simulador de flujo luminoso, determine cómo se enciende y apaga la luminaria y cómo se cambia de tipo de fuente luminosa.
3. A partir de su conocimiento, de su experiencia, del apoyo de sus compañeros o de otras estrategias, identifique y anote los cuatro tipos de fuentes luminosas de la simulación de flujo luminoso.
4. Indique cuál es la temperatura de color de cada fuente según la simulación. Además, tome nota de si el flujo luminoso y la temperatura de color de cada fuente permanecen constantes o cambian con el tiempo.

² La versión en español de la plataforma de simulación llama a esta cantidad Emitancia luminosa (M), pero en su versión en inglés, se llama *illuminance*, que corresponde a la iluminancia (E), este debería ser el nombre en español. En todo caso, ambos son conceptos semejantes, pero diferentes, de la fotometría.

5. Recuerde que el flujo luminoso depende del sistema de visión, pues solo se consideran los fotones que estimulan nuestro sistema visual, dando más importancia a los que se encuentran cerca del máximo de sensibilidad de la visión.

C. Flujo luminoso por unidad de ángulo sólido (Intensidad luminosa)

1. Utilice la simulación de intensidad luminosa (Cuadro 1) para realizar esta parte.
2. Practique el uso del simulador de intensidad luminosa, determine cómo se detiene la simulación y cómo se cambia de fuente luminosa.
3. Observe y comente qué ocurre con la intensidad luminosa cuando cambia el flujo luminoso de una fuente puntual.

D. Flujo luminoso por unidad de área (Iluminancia)

1. Utilice la simulación para estudiar la iluminancia (Cuadro 1) para realizar esta parte. No se confunda por el nombre (incorrecto) de esta simulación en la versión en español.
2. Practique el uso del simulador de iluminancia, determine cómo se activa la regla de distancia y el transportador. Aprenda a colocar la fuente a diferentes distancias y posiciones angulares de la cartilla de Snellen que aparece como pantalla. Cuando haga lecturas angulares o de distancia, utilice el valor que aparece en el recuadro, no utilice los instrumentos geométricos directamente.
3. Para una posición frontal de la fuente ($\alpha = 0^\circ$), determine cómo varía la iluminancia de la superficie conforme aleja la fuente luminosa para distancias de 0,3 m, 0,6 m, 0,9 m, 1,2 m y 1,5 m. Elabore una tabla para anotar estos resultados.
4. Para una distancia fija entre la fuente y la pantalla de 0,6 m, determine cómo varía la iluminancia para las posiciones angulares (ángulos de incidencia) de 0° , 10° , 20° , 30° , 40° , 50° y 60° . Elabore una tabla para anotar estos resultados.

Análisis de resultados

Recuerde que esta es solo una guía para el análisis de resultados. Usted debe redactar dicho análisis en prosa, de modo que la redacción sea continua. No debe responder las preguntas que se formulan como si fuera un cuestionario.

A. Análisis de resultados obtenidos con el simulador de cuerpo negro

1. Indique cuál es esta temperatura, según la simulación, a partir de la cual la fuente comienza a emitir en el visible e indique si coincide con la temperatura que se menciona en las referencias consultadas.
2. Con las imágenes recogidas construya un arreglo fotográfico que permita ver la evolución de la intensidad y de la posición del máximo, al ir aumentando la temperatura.
3. Explique por qué el primer tono que tiene un cuerpo cuya temperatura aumentado hasta la incandescencia es el rojo.
4. Mediante alguna estrategia de los compañeros de equipo, estime si el área bajo en la curva de emisión aumenta de forma proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta.

B. Análisis de resultados sobre flujo luminoso

1. Indique cuáles son las unidades del flujo luminoso y cuál es su relación con la unidad de intensidad luminosa. Solo considere las unidades del SI.

2. Para cada tipo de lámpara, compare la temperatura de color con la que se encuentra en internet (utilice fuentes confiables).
3. Mencione cuáles son los factores que determinan el flujo luminoso según la aplicación, pero también según su experiencia y otras fuentes de consulta.
4. Luego de realizar esta simulación, defina en sus palabras qué es el flujo luminoso.

C. Análisis de resultados sobre intensidad luminosa

1. Explique en sus palabras por qué para fuentes puntuales se mantiene constante la relación de flujo luminoso por unidad de ángulo sólido.
2. Explique qué sucede con los valores de intensidad luminosa si usted cambia el flujo luminoso de la fuente puntual.
3. Explique qué piensa que pasa con la iluminancia, el flujo luminoso y la intensidad luminosa cuando una fuente luminosa está llegando al final de su vida útil, ¿disminuyen, aumentan o se mantienen constantes?

D. Análisis de resultados sobre iluminancia

1. A partir de una revisión teórica, indique el tipo de relación que existe entre la iluminancia, la distancia y el ángulo de incidencia de la luz, sobre la superficie iluminada.
2. Con los datos recopilados, realice una gráfica de iluminancia en función de la distancia. Indique el tipo de relación que se observa. Luego, compruebe que la relación se linealiza si realiza la gráfica de iluminancia en función del inverso del cuadrado de la distancia.
3. Con los datos recopilados, realice una gráfica de la iluminancia en función del ángulo de incidencia. Indique el tipo de relación que se observa. Posteriormente, realice la gráfica de iluminancia en función del coseno del ángulo de incidencia y confirme que la relación se linealiza.

Referencias

- [1] Sears, F.; Zemansky, M.; Young, H. "Física Universitaria". Sexta Edición, Addison-Wesley Iberoamericana. (1986). Capítulo 38.
- [2] Eisberg, R. M., & Resnick, R. "Física cuántica: átomos, moléculas, sólidos y partículas". Limusa. (1978).
- [3] Instituto de Tecnologías Educativas. "Física de la radiación". Ministeris de Educación, Gobierno de España. Recuperado el 5 de octubre de 2021 de: <https://fjferrer.webs.ull.es/Apuntes3/Leccion02/2 fsica de la radiacin.html>
- [4] Equipos de medición Dagatron. "Los termómetros de infrarrojos y la medida de temperatura sin contacto". Blog de la página web de Dagatron. Recuperado el 5 de octubre de 2021: <https://www.dagatron.es/blog/>
- [5] BenQ. "¿Qué es la Temperatura de Color?" Centro de Conocimiento. Recuperado el 6 de octubre de 2021: <https://www.benq.com/es-mx/centro-de-conocimiento/conocimiento/color-temperature.html>