

# Práctica #5

## La medición de la luz

Kaled Sequeira — kaledseq@estudiantec.cr — 2020061166,  
Javier Fernández — jjavierf64@estudiantec.cr — 2020425930



### 1. INTRODUCCIÓN

Se puede definir la fotometría como la ciencia que mide la luz, y la radiometría como la ciencia que mide la radiación electromagnética. La fotometría se encarga de medir la intensidad de la luz, como el brillo percibido por el ojo humano. La radiometría se encarga de la medida de la luz en términos de potencia absoluta. [1] [2]

La unidad de intensidad luminosa se define como Candela (cd) y es una unidad fundamental del sistema internacional de medidas. Es equivalente a 1 lumen por estereorradián (lm/sr).

$$I = \frac{F}{\Omega} \quad (1)$$

Realmente es el equivalente a medir la cantidad de luz en una dirección concreta, por lo que está relacionado con el ángulo de la apertura del haz de luz es decir ángulo sólido. [3] Se considera a la candela como una unidad fundamental debido a su función de medir la intensidad luminosa en una determinada dirección, aunque en realidad esté compuesta por unidades de potencia por ángulo sólido.

La curva de sensibilidad del ojo corresponde al rango de ondas de luz que es visible por las personas, y el valor máximo se encuentra alrededor de 510 nm de noche y de día 555 nm. [4] Esto se debe a que el pico de la sensibilidad del ojo cambia dependiendo si es de día o de noche. La visión de día es conocida como visión fotópica y la visión nocturna se conoce como

visión escotópica. La sensibilidad máxima del ojo corresponde a estos valores ya que la selección natural actuó de manera que maximiza la energía total detectada por la retina en un rango de longitudes de onda (determinados por restricciones biológicas).

De esta forma existe una relación entre el máximo de la curva de sensibilidad del ojo y el máximo de emisión de la luz del sol ya que los humanos ven mejor a longitudes de onda amarillo y verde. Pero el Sol tiene su máximo en infrarrojo, así que por lo mencionado anteriormente, las restricciones biológicas del ojo humano y la evolución, se maximiza la energía total detectada por la retina de forma que los ojos se adaptan para vivir en nuestro sol. [5]

El término visión Fotópica refiere al tipo de percepción visual que se presenta bajo condiciones de iluminación adecuadas que permiten al ojo percibir los colores del entorno [6]. Este tipo de visión utiliza los conos del ojo, los cuales se utilizan únicamente al encontrarse con suficiente iluminación.

Por otro lado, la visión escotópica, es la que se presenta bajo condiciones de iluminación baja [6]. En este caso, se reduce la agudeza visual, y la percepción se da por los bastones del ojo. Los bastones únicamente brindan una visión monocromática, por lo que no se pueden ver colores cuando se presenta este tipo de visión.

Así, una buena iluminación contribuye a una mejor percepción del entorno y por lo tanto permite mayor concentración y una mejoría en el estudio. De hecho, el mínimo recomendado

Cuadro 1: Longitudes de onda asociados al color. [10]

| Color    | Longitud de onda $\lambda$ (nm) |
|----------|---------------------------------|
| Violeta  | 380-440                         |
| Azul     | 440-485                         |
| Cyan     | 485-510                         |
| Verde    | 510-565                         |
| Amarillo | 565-590                         |
| Naranja  | 590-625                         |
| Rojo     | 625-740                         |

para una zona de estudio o de lectura es de 500 lux [7].

En cuanto a la eficiencia de distintos métodos de iluminación, se tiene que la tecnología de los bombillos LED son de lo más eficientes que existen en el mercado de consumo común. Tanto es así, que para lograr una intensidad lumínica de entre 800 y 980 lumen, una bombilla incandescente convencional requiere de 65 vatios; lo que para un LED consumiría 10 vatios [8], e igualmente para el caso de lograr una intensidad de entre 6400 y 7200 lumen, una bombilla incandescente consume 500 vatios, frente a un consumo de apenas 80 vatios por parte del LED [8]. Ello significa que los dispositivos LED consumen en promedio 6 veces menos que las bombillas incandescentes tradicionales.

Se tiene que la Ley de Planck para radiación está dada por la ecuación [9]:

$$I_y = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \left[ \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1} \right] \quad (2)$$

Donde  $h$  es la constante de Planck,  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío si viaja en un medio se usa  $v$  de velocidad,  $\lambda$  es la longitud de onda,  $T$  es la temperatura,  $k_B$  es la constante de Boltzmann y  $I_y$  es la energía por unidad de tiempo por unidad de área por longitud de intervalo de onda.

Las longitudes de onda características de la región visible del espectro electromagnético se encuentran alrededor de los 400 nm y los 700 nm. Se puede observar las longitudes de onda en particular para cada color en la tabla 1.

El concepto de temperatura de color corresponde a que cuando un cuerpo negro incandescente alcanza una temperatura dada este emite

luz de forma que se observa el mismo color que una fuente luminosa dada. Este valor se representa en kelvin y los valores asociados a este varían desde los 1000 K a los 10000 K.

Según se conoce de la ley de Wien, es posible determinar la temperatura de un cuerpo siempre y cuando se conozca la longitud de onda máxima de emisión del cuerpo negro. Así, se aplica la ley de Wien de la forma de la ecuación:

$$\lambda_{max} T = C \quad (3)$$

Por lo que se puede despejar  $T$  para averiguar su valor dados distintas longitudes de onda. Es sobre este principio que se basa la termometría de dos colores, que considera las longitudes de onda infrarrojas para determinar su temperatura [11].

Otra manera práctica de medir la temperatura de un cuerpo es considerando su emisividad; el cual es el método sobre el que se basan los termómetros infrarrojos o pirómetros [11]. Éstos funcionan, como su nombre lo indica, leyendo ondas que se encuentran en el infrarrojo y que generan una señal eléctrica en el dispositivo, la cual luego se puede traducir en una temperatura registrada para el cuerpo que se está midiendo.

Para las cantidades físicas a utilizar en el análisis de radiación se deben asignar unidades correspondientes a cada una:

| Cantidad Física     | Unidad | Unidades básicas SI                   |
|---------------------|--------|---------------------------------------|
| Iluminancia         | Nits   | cd/m <sup>2</sup>                     |
| Intensidad Luminosa | -      | cd                                    |
| Flujo Luminoso      | lumen  | cd·sr                                 |
| Intensidad Radiante | W/sr   | kg m <sup>2</sup> / s <sup>3</sup> sr |
| Flujo Radiante      | vatio  | kg m <sup>2</sup> / s <sup>3</sup>    |

Una observación curiosa al analizar la curva de emisión del sol, que se muestra en la figura 1, es que el espectro en donde el sol muestra una mayor emisión coincide con el espectro de luz visible para el ser humano.

Este fenómeno puede deberse a que los seres humanos somos un producto de la evolución; una secuencia de cambios genéticos que va mutando una especie y le brinda de variadas habilidades para que sea capaz de adaptarse adecuadamente a su entorno. Por ello, pensar

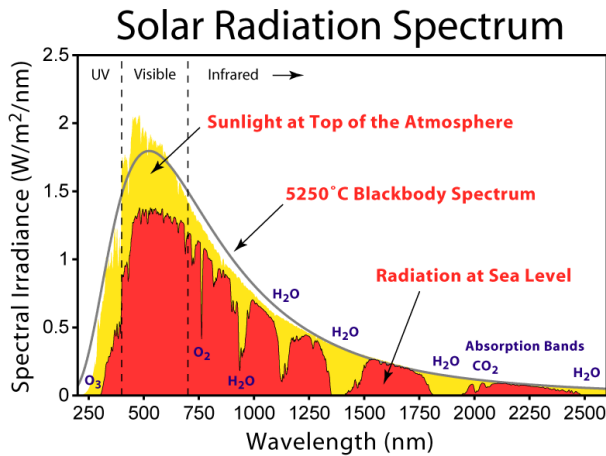


Figura 1: Curva de emisión de radiación solar. Imagen por Robert A. Rhode.

que el elemento biológico que se encarga de la visión utilice el tipo de radiación que se encuentra mayoritariamente gracias al sol, no es de extrañarse, sino más bien la conclusión más lógica a la que se puede llegar.

Como objetivo general de la práctica se busca realizar ensayos por simulación computacional y experimentos sencillos para comprender las propiedades radiométricas y fotométricas más importantes.

Para la primera parte se busca comprender el significado y la aplicación de las propiedades radiométricas y fotométricas más importantes, saber las definiciones y la manera de utilizar las propiedades asociadas con la iluminación, conocer los equipos de medición de las propiedades radiométricas y fotométricas y practicar los procedimientos para la medición de la intensidad radiante y de la iluminancia en el laboratorio.

Para la segunda parte se espera repasar las leyes y los conceptos de emisión térmica por cuerpos radiantes, diferenciar entre cantidades radiométricas y fotométricas, utilizar simulaciones computacionales sobre la emisión térmica de cuerpos radiantes para facilitar la asimilación de sus principios y utilizar simulaciones computacionales para comprender el significado y la aplicación de los conceptos fotométricos.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Entre los materiales que se utilizan para el desarrollo de la práctica están:

- Optical Power Meter, PM100D de la marca Thorlabs
- Detector de radiación S130C de la marca Thorlabs
- Teléfono celular con sensor de luz con Phyphox instalado
- Simulaciones de Vascak.cz para cuerpo negro, flujo luminoso, intensidad luminosa y luminancia.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Análisis de la medición de la iluminancia en el salón de clases

Para la medición de la iluminancia se tomaron varias posiciones de aula, se adjunta el croquis en la figura 2.

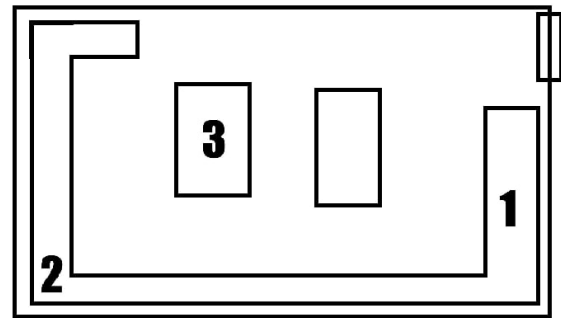


Figura 2: Croquis del aula con la posición de cada una de las mesas en donde realizó mediciones de iluminancia.

Los valores promedio de iluminancia para cada mesa cuando se tenían las luces apagadas corresponden a  $I_1 = 774,7$  lx,  $I_2 = 447,3$  lx y  $I_3 = 526,1$  lx. No se hicieron mediciones con las luces encendidas por cuestiones de tiempo. Las mediciones fueron realizadas el jueves 15 de septiembre del 2022, a las 2 de la tarde con un clima despejado.

De igual forma se puede determinar que existen zonas mejor iluminadas en el aula ya

que los valores por mesa con bastante diferentes y se puede suponer que al encender la luz todas las mediciones aumentan en magnitud de forma que la iluminación del aula se vuelve más uniforme.

### Análisis de la medición de la intensidad de radiación

Se realizaron mediciones de potencia y de intensidad de radiación con la luz apagada y la luz encendida para el aula; con el dispositivo de medición colocado en la mesa de la posición número 3 del croquis del aula de la figura 2. Los datos resultantes para el caso de la intensidad y de la potencia para la longitud de onda de 560nm antes y después de encender las luces se presentan en los cuadros 2 y 3 respectivamente.

Cuadro 2: Intensidad medida para longitud de onda 560 nm antes y después de encender las luces del aula

|                  | Intensidad Antes<br>[mW/cm <sup>2</sup> ] | Intensidad Después<br>[mW/cm <sup>2</sup> ] |
|------------------|---|---|
|                  | 5.19                                      | 4.65  |
|                  | 5.61                                      | 4.52  |
|                  | 5.47                                      | 4.57  |
|                  | 4.8                                       | 4.55  |
| <b>Promedio:</b> | 5.2675                                    | 4.5725                                      |

Cuadro 3: Potencia medida para longitud de onda 560 nm antes y después de encender las luces del aula

|                  | Potencia Antes<br>[mW] | Potencia Después<br>[mW] |
|------------------|------------------------|--------------------------|
|                  | 0.352                  | 0.333                    |
|                  | 0.363                  | 0.336                    |
|                  | 0.383                  | 0.334                    |
|                  | 0.394                  | 0.335                    |
| <b>Promedio:</b> | 0.373                  | 0.3345                   |

Como se puede observar por los promedios, resulta que tanto la potencia como la intensidad de la luz de 560 nm se reducen luego de encender la luz. Ello puede parecer contraintuitivo, ya que en todo caso debería aumentar al haber una nueva fuente de luz. Sin embargo, esto puede tener sentido considerando que al encenderse una nueva fuente de luz se están saturando ciertos espectros en el sensor, por

lo que se pueden estar opacando otros con longitudes de onda distintas.

De hecho, este fenómeno se puede observar en el comportamiento de las mediciones antes y después de encender la luz artificial; tal y como se presenta en las figuras 3 y 4.

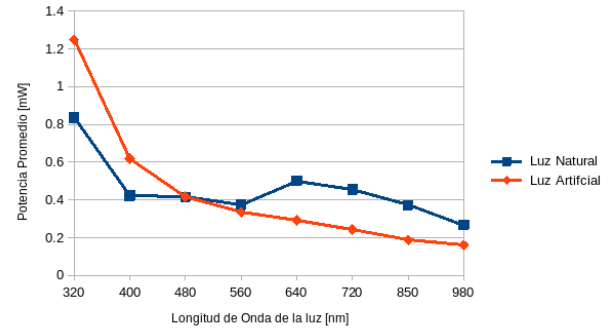


Figura 3: Potencia promedio registrada para distintas longitudes de onda antes y después de encender la luz artificial.

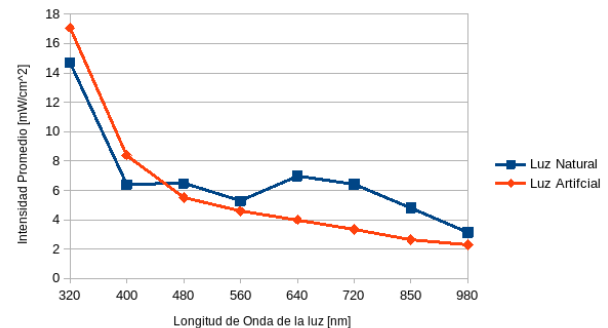


Figura 4: Intensidad promedio registrada para distintas longitudes de onda antes y después de encender la luz artificial.

Como se observa, en el caso de la luz artificial se presenta una mayor intensidad y potencia para las longitudes de onda más bajas de 480nm; mientras que para el caso de la luz natural, se tienen valores mayores de dichos parámetros para longitudes de onda mayores a 480 nm.

### Cuerpo negro

Utilizando la simulación de cuerpo negro se obtuvieron los espectros para distintas temperaturas, tal y como se presenta de la figura 5 a la 11.

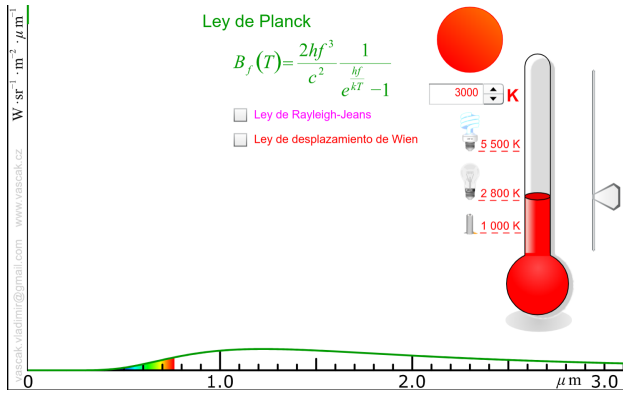


Figura 5: Espectro de emisión de un cuerpo negro a una temperatura de 3000K.

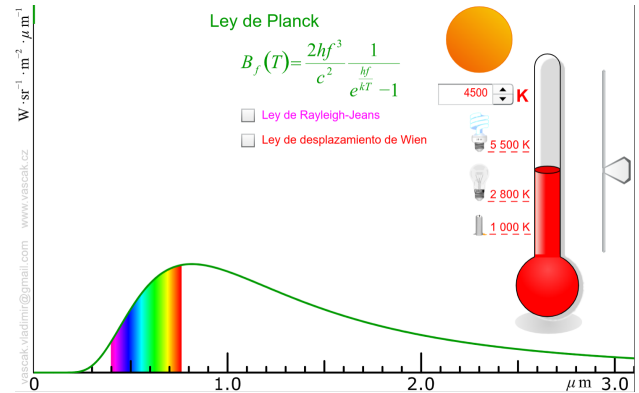


Figura 8: Espectro de emisión de un cuerpo negro a una temperatura de 4500K.

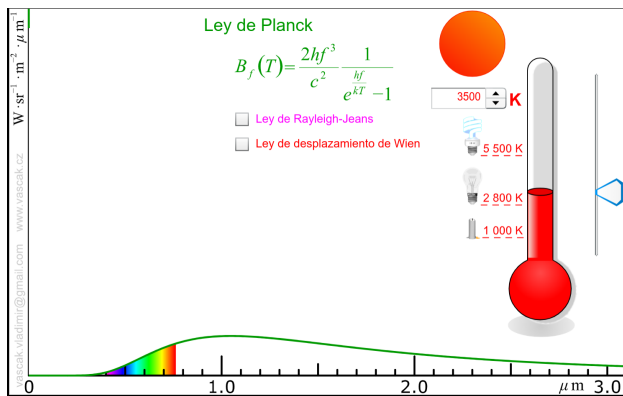


Figura 6: Espectro de emisión de un cuerpo negro a una temperatura de 3500K.

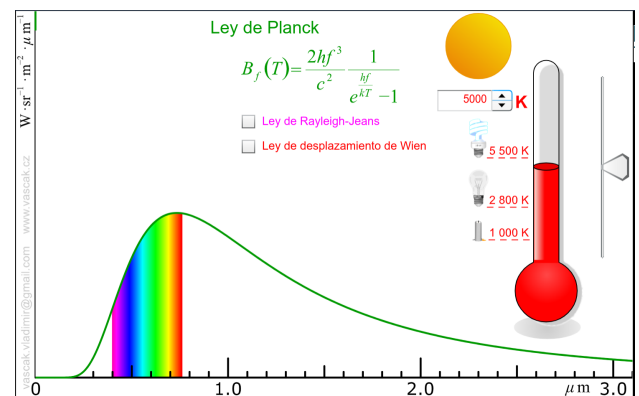


Figura 9: Espectro de emisión de un cuerpo negro a una temperatura de 5000K.

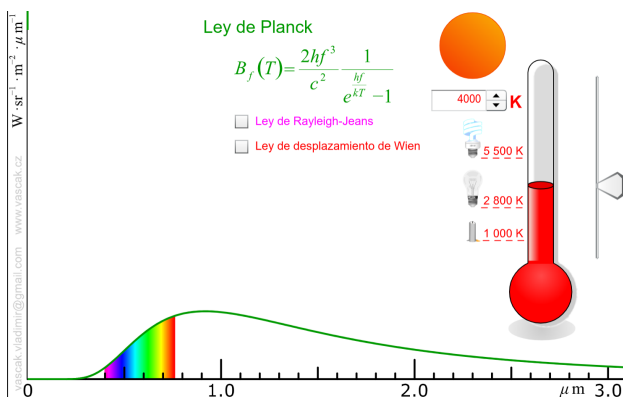


Figura 7: Espectro de emisión de un cuerpo negro a una temperatura de 4000K.

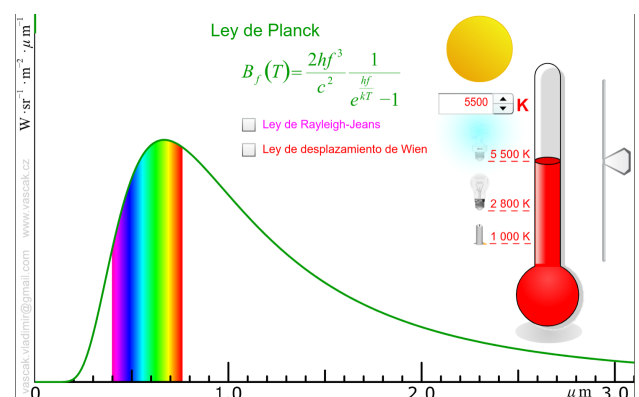


Figura 10: Espectro de emisión de un cuerpo negro a una temperatura de 5500K.

Se observa que la emisión significativa de luz visible empieza en los 2800K, ya que antes de eso el rango máximo se da en el infrarrojo. Por esta misma razón, la primera parte del espectro visible que se muestra es el rojo.

Considerando la ley de Stefan Boltzmann,

se tiene para la potencia que ésta depende de la cuarta potencia de la temperatura, así, el área bajo la curva de la ley de Planck representa la potencia. Así, el área bajo la curva también dependerá de la cuarta potencia de la temperatura.

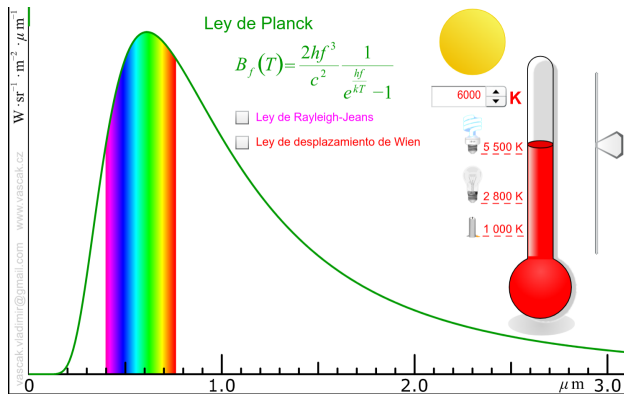


Figura 11: Espectro de emisión de un cuerpo negro a una temperatura de 6000K.

### Flujo luminoso

Para distintas fuentes de luz eléctricas se pueden registrar distintos valores de flujo luminoso, si cambia con el tiempo, y la temperatura que alcanza.

Cuadro 4: Valores de flujo luminoso por simulación para distintos tipos de bombillas.

| Tipo de Bombilla | Consumo [W] | Flujo Luminoso Max [lm] |
|------------------|-------------|-------------------------|
| Incandescente    | 100         | 1370                    |
| Fluorescente     | 20          | 1300                    |
| LED              | 10          | 600                     |
| Halógeno         | 77          | 1540                    |

Cuadro 5: Valores de temperatura de color por simulación para distintos tipos de bombillas.

| Tipo de Bombilla | Temperatura de Color [K] |
|------------------|--------------------------|
| Incandescente    | 2700                     |
| Fluorescente     | 5500                     |
| LED              | 7300                     |
| Halógeno         | 3000                     |

El flujo luminoso posee como unidad el lumen, el cual se define como candela por estereorradián. Así, se puede entender el flujo luminoso como una medida de la potencia luminosa que emite una fuente de luz. En relación a la intensidad luminosa, la cual se mide en candelas, se puede decir que el flujo representa la intensidad que se percibe en un área definida por el estereorradián.

En comparación con los resultados de la simulación, se pueden observar los valores teóri-

cos obtenidos de la empresa de iluminación Phillips Lighting [12] que se presentan en el cuadro 6.

Cuadro 6: Valores teóricos de temperatura de color para distintos tipos de bombillas [12].

| Tipo de Bombilla | Temperatura de Color [K] |
|------------------|--------------------------|
| Incandescente    | 2700-6500                |
| Fluorescente     | 5500                     |
| LED              | 2700-3000                |
| Halógeno         | 2800                     |

Así, los datos de la simulación resultan similares en la mayoría de los casos, a excepción del caso de la bombilla LED, que según la simulación posee una mucho mayor temperatura de color que la que se registra por la compañía Phillips.

En el caso de los factores que influyen en la cantidad de flujo luminoso de una fuente, se encuentran la temperatura a la que se encuentra dicha fuente, la cantidad de potencia que consume y su eficiencia, y el tipo de bombilla que es, debido a que cada uno utiliza un distinto método para iluminar.

Puesto de otra manera, el flujo luminoso se puede entender como la medida de la cantidad de luz que atraviesa una región en el espacio.

### Flujo luminoso por unidad de ángulo sólido (Intensidad luminosa)

Al utilizar la simulación de vascak para intensidad luminosa se puede determinar que con el botón de la interfaz se detiene la simulación y que con las flechas se cambia la fuente luminosa. Ahora, se puede observar que la intensidad luminosa se mantiene constante. Sabemos que esta está definida como flujo luminoso por unidad de ángulo sólido 1.

Para fuentes puntuales se mantiene constante la relación de flujo luminoso por unidad de ángulo sólido ya que el flujo luminoso disminuye conforme disminuye también el ángulo sólido. Si se cambia el flujo luminoso, manteniendo el ángulo sólido constante la intensidad luminosa aumenta o disminuye de forma directamente proporcional. Por último, al final de la vida útil de una fuente luminosa es

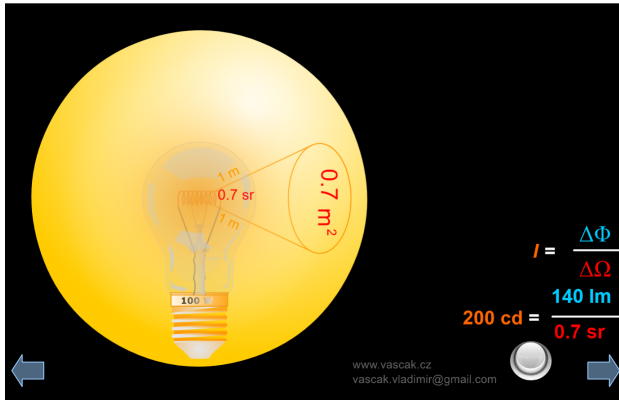


Figura 12: Simulación de intensidad luminosa.

Cuadro 7: Variación de iluminancia con  $\alpha = 0$ . [10]

| Distancia (m) | Iluminancia (lx) |
|---------------|------------------|
| 0,3           | 11,11            |
| 0,6           | 2,78             |
| 0,9           | 1,23             |
| 1,2           | 0,69             |
| 1,5           | 0,44             |

probable que la intensidad luminosa disminuya que el flujo luminoso disminuya, manteniendo el ángulo sólido constante.

### Flujo luminoso por unidad de área (Iluminancia)

Se utilizó la simulación de vascak para iluminancia. Se realizaron pruebas para familiarizarse con el ambiente de simulación, para mediciones posteriores. Se adjutan las mediciones

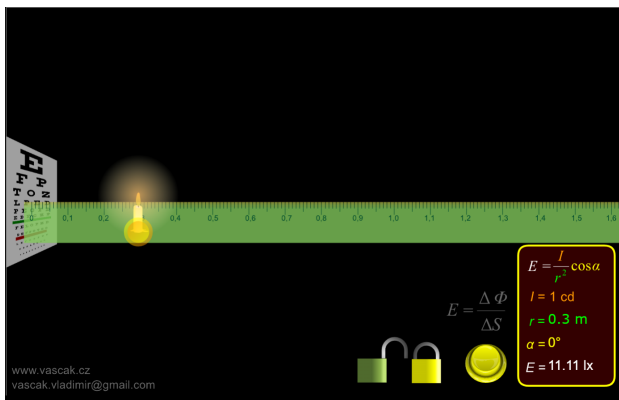


Figura 13: Simulación de intensidad luminosa.

respectivas en las tablas 7 y 8.

Cuadro 8: Variación de iluminancia con  $d = 0,6$  m. [10]

| Posición angular $\alpha$ (°) | Iluminancia (lx) |
|-------------------------------|------------------|
| 0                             | 2,78             |
| 10                            | 2,74             |
| 20                            | 2,61             |
| 30                            | 2,41             |
| 40                            | 2,13             |
| 50                            | 1,79             |
| 60                            | 1,39             |

A partir de una revisión teórica se puede determinar que la iluminancia corresponde a flujo luminoso entre área y del ambiente de simulación podemos ver que se calcula como:

$$E = \frac{F}{A} = \frac{I}{r^2} \cos(\alpha) \quad (4)$$

Graficando entonces los datos obtenidos se observa que las relaciones teóricas se cumplen es decir la iluminancia tiene una relación de inversa al cuadrado con la distancia en 14 y una relación de coseno con el ángulo de la fuente de luz 15.

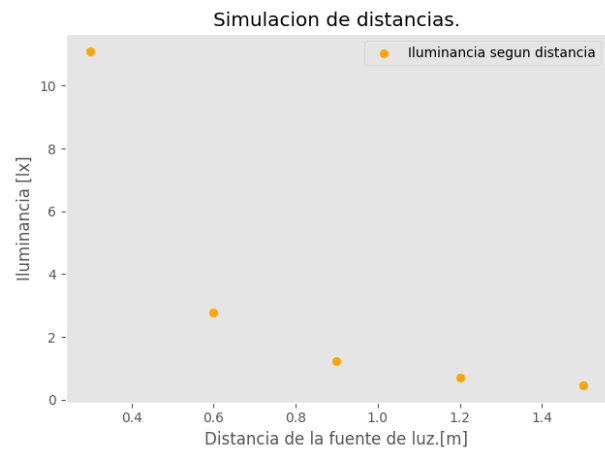


Figura 14: Gráfica de intensidad luminosa en función de la distancia.

Al realizar los ajustes observados en las figuras 16 y 17 se observa que se linealiza la relación de la iluminancia con las variables dadas, cumpliendo así con la ecuación 4.



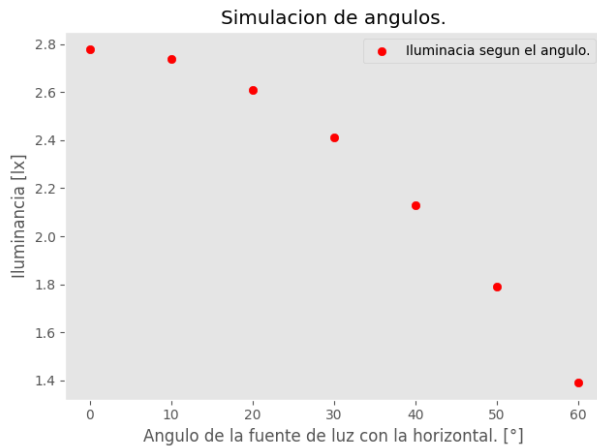


Figura 15: Gráfica de intensidad luminosa en función del ángulo.



Figura 16: Gráfica de intensidad luminosa en función del coseno del ángulo.



Figura 17: Gráfica de intensidad luminosa en función de cuadrado inverso de la distancia.

## 4. CONCLUSIONES

En relación a la primer parte de la práctica, se logró la comprensión e interiorización de los conceptos y las propiedades de la radiometría y fotometría, abarcando los aspectos más importantes para el desarrollo de tecnología e investigación científica.

Además, se profundizó en los conceptos y aplicaciones relacionados con el amplio tema de la iluminación, al mismo tiempo que se pudo familiarizar a los participantes con los equipos de medición utilizados en el área de estudio así como los procedimientos a seguir y las precauciones a tomar.

Para la segunda parte de la práctica, es decir la parte simulada se plantearon 4 objetivos específicos. El primero era repasar las leyes y los conceptos de emisión térmica por cuerpos radiantes la cual se logró utilizando la simulación de emisión de cuerpo negro y el análisis de los resultados obtenidos. También se buscaba diferenciar entre cantidades radiométricas y fotométricas lo cual se logró utilizando las simulaciones para iluminancia y intensidad luminosa donde se analizó la diferencia entre ambas.

Continuando con la segunda parte de la práctica se utilizaron simulaciones computacionales sobre la emisión térmica de cuerpos radiantes para facilitar la asimilación de sus principios y a partir de esto se generó un análisis del fenómeno. Este objetivo va de la mano con el otro planteado que buscaba utilizar simulaciones computacionales para comprender el significado y la aplicación de los conceptos fotométricos el cual se cumplió de buena manera al utilizar las simulaciones para entender y analizar los fenómenos.

De esta manera se cumplió el objetivo general de la práctica el cual era realizar ensayos por simulación computacional y experimentos sencillos para comprender las propiedades radiométricas y fotométricas más importantes.

## REFERENCIAS

- [1] Equipos y Laboratorio de Colombia, "Fotometría." [Online]. Available: <https://www.equipoyslaboratorio.com/portal/articulo-ampliado/fotometria>



- [2] EcuRed, "Radiometría." [Online]. Available: <https://www.ecured.cu/index.php?title=Radiometr%C3%ADa&oldid=2330323>
- [3] ALG, "Candelas, lúmenes y luxes..." [Online]. Available: <https://algsa.es/es/blog/post/diferencia-entre-candelas-luxes-lumenes/>
- [4] Fundamentos de la Iluminación, "La visión." [Online]. Available: <https://grlum.dpe.upc.edu/manual/fundamentosIluminacion-laVision.php>
- [5] Anónimo, "Por qué la mayor sensibilidad del ojo humano es a aproximadamente 550 nm." [Online]. Available: <https://es.scribd.com/document/403487156/Por-que-la-mayor-sensibilidad-del-ojo-humano-es-a-aproximadamente-550-nm-docx>
- [6] B. Wandell, *Foundations of Vision*, Massachusetts, 1995.
- [7] Ergológico. [Online]. Available: <https://www.ergologico.com/nivel-de-iluminacion-zona-de-estudio/>
- [8] Ledviled. [Online]. Available: <https://www.ledviled.es/blog/equivalencia-luces-led-y-bombillas-incandescentes/>
- [9] E. Hecht, *Óptica*, 5th ed. México, D.F.: Pearson Educación, 2017.
- [10] Sears F., Zemansky M., Young H., and Freedman A., *Física universitaria Volumen 2*, 13th ed. México, D.F.: Pearson Educación, 2003.
- [11] Omega, "Termómetro de infrarrojos." [Online]. Available: <https://es.omega.com/prodinfo/termometros-infrarrojos.html>
- [12] Phillips Lighting, "Temperatura de color," s.f. [Online]. Available: <https://www.lighting.philips.es/consumer/advice-on-lighting-ideas/light-bulb-color-temperature>