

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Física

Segundo semestre de 2022

Profesor Ernesto Montero Zeledón

Práctica # 5.1.

La medición de la luz¹

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. Comprender el significado y la aplicación de las propiedades radiométricas y fotométricas más importantes.
2. Saber las definiciones y la manera de utilizar las propiedades asociadas con la iluminación.
3. Conocer los equipos de medición de las propiedades radiométricas y fotométricas.
4. Practicar los procedimientos para la medición de la intensidad radiante y de la iluminancia en el laboratorio.

Introducción

El espectro electromagnético se divide típicamente en siete regiones: rayos gamma, rayos X, ultravioleta, visible, infrarrojo, microondas y radio. Las ondas más energéticas son los rayos gamma, que tienen las longitudes de onda más cortas. Si un organismo se coloca bajo una fuente de radiación gamma, puede producirle la muerte en pocos días. Los rayos gamma se generan en los procesos nucleares de fusión y fisión y producen ruptura de enlaces de las moléculas irradiadas. Luego están los rayos X que también son radiaciones muy energéticas y dañinas, pero menos peligrosas que los rayos gamma. Sigue la radiación ultravioleta, que también puede llegar a producir daños en los organismos sometidos a esta energía, sobre todo en la cobertura exterior de dichos organismos. A continuación, están la región visible del espectro con sus colores, la región infrarroja, la región de microondas y las ondas de radio, éstas últimas con longitudes de ondas que van de los centímetros a los metros y que, además, son las menos energéticas. Pero la percepción de estas radiaciones no depende de si su energía es cada vez mayor o menor, solo percibimos radiación de

¹ Guía elaborada por el profesor Ernesto Montero Zeledón

una pequeña región del espectro, la región visible, cuyas longitudes de onda aproximadas van de 400 nm a 700 nm, donde nuestros detectores de radiación son nuestros ojos.

A pesar de que el espectro electromagnético es muy amplio, no comenzamos a descubrir las regiones invisibles del espectro hasta hace relativamente poco tiempo (cerca de 150 años). No es arriesgado afirmar que, para la mayoría de las personas, la región visible del espectro electromagnético es la única que existe y esto tiene mucho sentido, al considerarlo desde nuestra experiencia perceptual. Justamente por esta razón, hasta hace poco tiempo todavía iluminábamos nuestras habitaciones y salones con luz incandescente, pues en ésta, cerca del 95 % de la energía utilizada no produce luz visible, sino calor. También por esta razón, para los seres humanos la intensidad de la luz visible es más importante que la intensidad de la radiación electromagnética, por lo cual existen dos áreas de la ciencia distintas, la fotometría y la radiometría.

El interés de la radiometría y la fotometría, es determinar cuánta radiación óptica o luz hay presente en un lugar. La radiometría, por su parte, es la ciencia relacionada con la medición de la radiación electromagnética. En este sentido, se debe tener presente que no toda la radiación electromagnética se puede percibir con los ojos. En cuanto a la fotometría, ésta se encarga de la medición de la radiación electromagnética en el intervalo visible del espectro, teniendo en cuenta la sensibilidad del ojo humano. Es decir, la fotometría se relaciona con las propiedades de la iluminación, tal y como la percibe el ojo humano. La radiometría no depende del detector, pero la fotometría se basa en la evaluación de la luz que los seres humanos piensan que está presente, es decir, se basa en nuestro sistema de detección visual, compuesto por los ojos y el cerebro [1].



Figura 1. (a) Luxómetro utilizado para medir la iluminancia en unidades de lux (b) Radiómetro utilizado para medir la intensidad de radiación en unidades de W/m^2 .

En radiometría la potencia de una fuente de luz se conoce como **potencia radiante o flujo radiante**, y se mide en vatios (W). Esta cantidad indica cuanta energía en forma de radiación emite una fuente o incide en una región. La **intensidad radiante** o simplemente **intensidad**, se define como la potencia radiante por unidad de superficie y se mide en unidades de vatios por metro cuadrado (W/m^2) [2]. Por su parte, en fotometría, la unidad fundamental para medir la **intensidad luminosa** es la candela, cuyo símbolo es cd, que a su vez se puede definir como **flujo luminoso** por unidad de ángulo sólido, es decir, lumen por estereorradián (lm/sr):

$$1 \text{ cd} = 1 \text{ lm/sr}$$

El **flujo luminoso** en fotometría es el equivalente al *flujo radiante* en radiometría, pero el *flujo luminoso* no se mide en vatios porque no es una unidad de energía. Esta cantidad física incorpora la sensibilidad del ojo, y por ello se mide en lumen, que es una especie de “brillantez” de una fuente. Por lo tanto, el *flujo luminoso* indica cuán luminosa o brillante es una fuente para el ojo humano, no cuánta energía emite. Por otra parte, la **intensidad luminosa por unidad de área**, también conocida como **iluminancia**, se mide en unidades de lumen por metro cuadrado (lm/m^2), que se conoce como lux, cuyo símbolo es lx. La *intensidad luminosa* de una fuente no cambia con la distancia, mientras que la *iluminancia* sí depende de la distancia. A partir de estas unidades basadas en consensos internacionales, se han desarrollado métodos de calibración y ensayo que permiten medir muchas propiedades radiométricas y fotométricas. Esto ha permitido contar con equipos de medición adecuados, para verificar el diseño de los sistemas de iluminación [3].

La norma que rige la *iluminancia* de los lugares de trabajo y de estudio en Costa Rica, es la norma INTE 31 08 06 2014. Dicha norma establece que el valor mínimo para laboratorios generales debe ser 600 lx. Para el caso de oficinas, establece que éstas deben tener un mínimo de 500 lx, pero en caso de que se trabaje con computadoras, el mínimo pasa a 750 lux. Para bibliotecas u otras áreas donde se realiza lectura (áreas de estudio) el valor mínimo debe ser 500 lux.

Si designamos el *flujo luminoso* con la letra **F**, la *iluminancia* con la letra **E** y el área iluminada por la letra **A**, entonces la iluminancia, está dado por

$$E = \frac{F}{A} \quad (\text{ec. 5.1})$$

Por su parte, la *intensidad luminosa*, **I**, se define como el *flujo luminoso*, **F**, por unidad de ángulo sólido, **Ω** , se expresa como

$$I = \frac{F}{\Omega} \quad (\text{ec. 5.2})$$

La separación de la medición de la luz en dos áreas, radiometría y fotometría, es necesaria, fundamentalmente, por dos razones, la primera es que nuestros ojos solo perciben una pequeña zona del espectro electromagnético, la segunda es que la sensibilidad de nuestros ojos no es la misma para los distintos colores. Por ejemplo, una lámpara de 20 W de luz amarilla, nos parece mucho más brillante que una lámpara azul de la misma potencia [2]. La sensibilidad del ojo humano es máxima cerca de 560 nm y decae hacia los extremos violeta y rojo. Como se ha dicho anteriormente, la sensibilidad de nuestros ojos depende de la longitud de onda, pero también depende de la intensidad luminosa misma, como queda claro en la visión fotópica y escotópica. Por todas estas razones, los temas asociados con estas áreas de la física tienen una gran aplicación y, además, son poco comprendidos por otros profesionales. Por ello es un ámbito de conocimientos que ofrece valiosas oportunidades a los ingenieros físicos para adquirir más destrezas aplicables y de crecer profesionalmente.

Trabajo para la introducción del informe

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

1. Explique qué es la radiometría y la fotometría. Consulte al menos dos fuentes y defina en sus palabras cada una de estas áreas de la ciencia.
2. Explique cómo se define la unidad de intensidad luminosa y comente por qué es una de las unidades básicas del SI.
3. Indague cuál es la curva de sensibilidad del ojo y cuál es el significado de su máximo.
4. Explique si existe alguna relación entre el máximo de la curva de sensibilidad del ojo y el máximo de emisión de la luz del Sol.
5. Explique qué es la visión fotópica y escotópica, y en cuáles condiciones de iluminación se produce cada una.
6. Busque cuáles son los niveles de iluminancia recomendados para espacios de estudio como bibliotecas o aulas en Costa Rica u otros países.
7. Investigue cuál es la relación aproximada entre la potencia y la intensidad luminosa para un bombillo incandescente, un tubo fluorescente y una luminaria led (bombillo led).

Equipo requerido

Para realizar esta práctica se requiere equipo de laboratorio para medición de radiación. Además, una parte de la práctica requiere el uso de un dispositivo móvil del estudiante (celular o tableta) con sensor de luz (todos los dispositivos actuales cuentan con este sensor), en el que se pueda instalar la aplicación recomendada para la medida de iluminancia.

En el Laboratorio de óptica solo contamos con dos equipos de medición de radiación para cada laboratorio, por lo que el profesor determinará el procedimiento mediante el cual se realizarán las mediciones. En el siguiente cuadro se indican los equipos y materiales requeridos para realizar esta práctica.

Cuadro 1. Materiales y equipo requeridos para el desarrollo de la práctica.

Materiales y equipo	Propósito
<i>Optical Power Meter</i> , PM100D de la marca Thorlabs	Lector de radiación para distintos detectores
Detector de radiación S130C de la marca Thorlabs	Detectar la potencia radiada por una fuente luminosa en el intervalo de 400 nm a 1100 nm
Teléfono celular o tableta con sensor de luz	Utilizar el sensor de luz para medida de iluminancia en el salón de clases
Aplicación para realizar mediciones con el sensor de luz de su dispositivo móvil	Realizar medidas fotométricas de iluminancia

Precauciones especiales

1. El equipo que se utiliza en esta práctica es muy delicado y oneroso. Debe utilizarlo siguiendo las instrucciones de su profesor, pero también con el mayor cuidado posible.
2. Una vez que quita la pantalla protectora de cualquier detector, procure no tocar el sensor del detector directamente con los dedos ni con ningún otro instrumento. Procure mantener colocada la tapa de cada detector en todo momento, excepto cuando realice mediciones.

Adicionalmente, se recomienda el uso de guantes de sin polvo, preferiblemente, guantes de nitrilo para manipular el equipo.

Procedimiento

FOTOMETRÍA

A. Medición de la iluminancia del salón de clases

1. Instale la aplicación Phypox® en su teléfono o tableta (6,1 MB). Dicha aplicación permite utilizar los sensores de su dispositivo para realizar diferentes experimentos de física. También puede utilizar otras aplicaciones que permiten realizar mediciones con los sensores del teléfono. Por ejemplo, en Android existen las aplicaciones “My Sensors” (581 kB) y “Physics Toolbox Suite” (35 MB) que también permiten realizar esta práctica.
2. En la parte de sensores de la aplicación que haya escogido, seleccione la opción de medición de luz (iluminancia) en unidades de lux (lx). El equipo especializado que se utiliza para realizar estas mediciones se llama luxómetro, pero ahora los dispositivos móviles también incorporan sensores que permiten hacer estas mediciones de manera precisa.
3. Compruebe que el detector del dispositivo funciona correctamente y que cuando se tapa el sensor con el dedo, la lectura da un valor de cero lux.
4. Para evaluar la iluminación del aula, debe utilizar el luxómetro en, al menos, tres zonas diferentes, es decir, debe realizar mediciones en tres mesas distintas. En cada medición debe colocar el detector en tres puntos de la misma mesa separados unos de 60 cm (formando un triángulo). Además, en cada punto debe tomar cuatro valores de iluminancia para luego obtener el promedio.
5. En cada medición, debe procurar apartarse al menos 0,5 m del instrumento y no permitir que haya otros compañeros a menos de 1,0 m del detector. Durante cada medición también debe evitar producir sombras u oscurecimientos en la zona donde se coloca el detector.
6. Debe realizar estas mediciones considerando dos escenarios, uno cuando el laboratorio está iluminado solo con luz natural (la que entra por las ventanas) y otro cuando, además, las luces están encendidas (no importa que sea de día). Anote una hora representativa del conjunto de mediciones de cada escenario y, además, indique si el día estaba despejado, lloviendo, parcialmente nublado o totalmente nublado. Registre sus resultados en una tabla elaborada para este fin.

RADIOMETRÍA

Familiarización con el equipo de medición de la radiación electromagnética

1. Examine el equipo de medición de potencia óptica “Optical Power Meter”, PM100D de la marca Thorlabs. Ubique la posición del botón de encendido, la parte de alimentación eléctrica y la parte donde se conecta el sensor de radiación. Este equipo tiene batería interna, por lo que también se puede utilizar sin estar conectado directamente. El equipo permite conectar distintos tipos de detectores, seleccionar distintas unidades y seleccionar distintas longitudes de onda de detección. También genera gráficas de la medición en tiempo real y permite almacenar datos, para luego exportarlos.
2. Revise el menú del equipo, pero no modifique los parámetros de la configuración. Con el botón “ λ ”, puede seleccionar la longitud de onda en que realiza la medición. Con el botón “ Δ ” puede medir la diferencia respecto del valor de referencia.

3. Se cuenta con cuatro detectores distintos (S130VC, S130C, S121VC, S121C), los cuales poseen distintos ámbitos de medición y sensibilidades. En esta práctica solo utilizaremos el detector S130C, cuyo ámbito de medición es de 400 nm y 1100 nm. Cuando se conecta el detector al equipo de medición, éste reconoce automáticamente el tipo de detector y ajusta las mediciones.
4. El detector siempre debe permanecer con su tapa protectora, excepto en los momentos que se van a realizar las mediciones. Debe tener mucho cuidado de no tocar la parte sensible del detector con el dedo, pues eso podría dañarlo de forma permanente.
5. En cada medición, debe procurar apartarse al menos 0,5 m del instrumento y no permitir que haya otros compañeros a menos de 1,0 m del detector. Durante cada medición también debe evitar producir sombras u oscurecimientos en la zona donde se coloca el detector.

B. Medición de la intensidad de radiación en el aula

1. Coloque y encienda el equipo de medición de potencia sobre la mesa de laboratorio. Su profesor determinará la forma en que se realizarán las mediciones puesto que solo se cuenta con dos equipos de medición y sus detectores.
2. Conecte el detector S130C y seleccione la longitud de onda de 560 nm antes de realizar las mediciones. No destape el sensor hasta que vaya a realizar las mediciones. Una vez conectado el sensor, en la escala de 5 mW, coloque el sensor de forma horizontal y mida la potencia radiante (flujo radiante), en unidades de potencia, y la intensidad de la radiación, en unidades de potencia por unidad de área, en tres mesas distintas. Vuelva a tapar el detector al finalizar las mediciones de cada mesa. En cada mesa debe repetir la medición cuatro veces.
3. Por otra parte, coloque el detector en una posición horizontal fija sobre una de las mesas centrales del laboratorio, seleccionando la escala de 5 mW, y mida cuatro veces la potencia y la intensidad de la luz del aula para cada una de las longitudes de onda del equipo: 320 nm, 400 nm, 480 nm, 560 nm, 640 nm, 720 nm, 850 nm y 980 nm.
4. Debe realizar estas mediciones considerando dos escenarios, uno cuando el laboratorio está iluminado solo con luz natural (la que entra por las ventanas) y otro cuando, además, las luces están encendidas (no importa que sea de día). Anote sus resultados en una tabla elaborada para este fin.

C. Medición de la intensidad de radiación fuera del aula

1. Utilice el equipo de medición de radiación con el sensor S130C sobre una mesa en el pasillo exterior del laboratorio, de modo que mida la luz natural. Si el clima lo permite, acerque la mesa lo más posible al borde del pasillo exterior para que la luz natural incida de forma más directa. Recuerde colocar el detector en una posición horizontal fija, procurando no proyectar sombras sobre el detector.
2. Seleccione la escala de 5 mW en el detector, colóquelo sobre una mesa fuera del aula y mida cuatro veces la potencia radiante junto con la intensidad para cada una de las longitudes de onda del equipo: 320 nm, 400 nm, 480 nm, 560 nm, 640 nm, 720 nm, 850 nm y 980 nm. Anote sus resultados en una tabla elaborada para este fin.

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 la medición de la iluminancia en el salón de clases

1. Haga un croquis del aula con la posición de cada una de las mesas en donde realizó mediciones de iluminancia.
2. Determine el valor promedio de la iluminancia de cada mesa cuando solo había luz natural como cuando las luces estaban encendidas.
3. Explique si la iluminación en el aula es uniforme o si hay zonas mejor iluminadas.
4. Compare con los valores obtenidos con los valores de iluminancia de referencia encontrados en la literatura y comente el resultado.

B. y C. Análisis de la medición de la intensidad de radiación dentro y fuera del aula

1. Haga un croquis que incluya la posición de cada una de las mesas en donde realizaron mediciones de intensidad, dentro y fuera del aula.
2. Determine el valor promedio de la potencia y la intensidad en cada mesa cuando solo había luz natural y cuando las luces estaban encendidas para la longitud de onda de 560 nm. Comente si existen diferencias importantes entre los promedios.
3. Realice dos gráficas de los valores de intensidad para las distintas longitudes de onda dentro y fuera del aula. Comente si existen diferencias en las gráficas y explique a qué se pueden deber las diferencias.

Referencias

- [1] Gómez González, E. "Fundamentos de óptica. Tema 4: Guía básica de conceptos de radiometría y fotometría." Universidad de Sevilla, Sevilla (2009).
- [2] Sears, F.; Zemansky, M.; Young, H. Física Universitaria. Sexta Edición, Addison-Wesley Iberoamericana. (1986). Capítulo 38, pág. 842.
- [3] Marín Naranjo, L. "Actualización de norma costarricense sobre niveles de iluminancia y condiciones de iluminación incluyendo fotometría". (2013) Recuperada el 28 de septiembre de 2021 de: https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/ingenieria/article/view/8233/html_24