

MÉTODO DIDACTICO PARA MEDIR VALORES DE IRRADIANCIA DE RAYOS ÓPTICOS

Pablo Ortiz Fabian

Unidad Profesional Interdisciplinaria en
Ingeniería y Tecnologías Avanzadas-IPN

Yeschúa López de la Rosa

Unidad Profesional Interdisciplinaria en
Ingeniería y Tecnologías Avanzadas-IPN

Verónica Lucero Villegas Rueda

Unidad Profesional Interdisciplinaria en
Ingeniería y Tecnologías Avanzadas-IPN

All content in this magazine is licensed under a Creative Commons Attribution License. Attribution-Non-Commercial-Non-Derivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0).



Resumen: Las ondas electromagnéticas transmiten energía y la irradiancia es un observable físico relacionado con la potencia, la amplitud de campos eléctricos y magnéticos que están oscilando que viajan en una onda electromagnética. Las medidas de irradiancia se utilizan para encontrar la polarización de ondas electromagnéticas, por ejemplo, en la teoría electromagnética avanzada a través de los vectores de Stokes y John utilizando polarizadores y rotores ópticos. En este trabajo se presenta una forma sencilla y didáctica de medir la irradiancia de los rayos ópticos que es el comienzo para entender la polarización de las ondas electromagnéticas. El método didáctico utiliza materiales comunes, estos materiales son conocidos por los estudiantes: diferentes fuentes de luz y su teléfono celular. Los conceptos y observables físicos se asimilan y podrían usarse para que los estudiantes de ingeniería comprendan los conceptos y sus posibles aplicaciones e impacto en áreas como la conversión de energía solar.

Palabras clave: Irradiancia, onda electromagnética, polarizadores ópticos, rotadores ópticos.

INTRODUCCIÓN

En el curso de propagación de ondas electromagnéticas se repasan los conceptos fundamentales de campo eléctrico E , campo magnético H así como las cuatro ecuaciones de Maxwell que describen todo el comportamiento para E y H . Una parte fundamental es resolver las ecuaciones de Maxwell para el caso de propagación de E y H cuando son dependientes del tiempo; la dependencia temporal de campos electromagnéticos propagándose en un medio. Mediante las ecuaciones de Maxwell se llega a la ecuación de onda para potencial eléctrico V , ecuación de onda vectorial para potencial vectorial magnético A , ecuación de onda para el campo eléctrico E y la

ecuación de onda para el campo magnético H , Lorrain y Corson (1979). Al resolver las ecuaciones de onda para E y H para una onda electromagnética linealmente polarizada en \hat{x} , se obtiene la forma general de onda y $E = E_0 \cos(\omega t - kx)\hat{x}$ y $H = H_0 \cos(\omega t - kx)\hat{y}$, donde E_0 y H_0 son las amplitudes vectoriales asociadas a una onda electromagnética viajando en un medio homogéneo con propiedades magnéticas μ y eléctricas ϵ , Lorrain y Corson (1979). Por otra parte, cuando se tratan los conceptos de ondas electromagnéticas, el espectro electromagnético va desde los Hertz (Hz) hasta los Terahertz (THz) de frecuencia de oscilación, pasando por la luz visible en el rango de los THz, o entre los 400nm hasta los 700nm de longitud de onda λ , Lorrain y Corson (1979). En la figura 1 se muestra un esquema de una onda electromagnética viajando en un medio no conductor isotrópico.

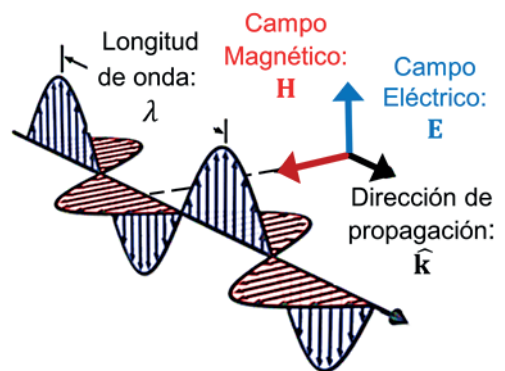


Figura 1. Esquema de onda electromagnética propagándose en dirección $k = k\hat{z}$, con campo eléctrico E , y campo magnético H mutuamente perpendiculares con longitud de onda λ .

TEORÍA

Un concepto que se define y analiza es el vector de Poynting definido como $S = E \times H = E_0 H_0 \cos^2(\omega t - kx)\hat{z}$ donde E y H son funciones de onda oscilantes en el tiempo t y el espacio x , Sadiku (2003); Lorrain y Corson (1979). El vector de Poynting representa el vector instantáneo de densidad de potencia asociado con el campo electromagnético en

un punto dado, sus unidades son Watts (W) por metro cuadrado m^2 , es decir, W/m^2 . El vector de Poynting S es paralelo al vector de propagación $k=k\hat{z}$ y su valor promedio está dado por la ecuación (1).

$$S_{av} = \langle \mathbf{S} \cdot \mathbf{S} \rangle = \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} \mathbf{S} \cdot \mathbf{S} dt = \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} E_0 H_0 \cos^2(\omega t - kx) \hat{z} \cdot \hat{z} dt = \frac{1}{2} E_0 H_0 \quad (1)$$

Entonces la magnitud está dada por $S_{av} = \langle \mathbf{S} \cdot \mathbf{S} \rangle = \frac{1}{2} E_0 H_0$. Por otro lado, se encuentra que la impedancia η de un medio de propagación ésta determinada por la razón de las magnitudes $E = \sqrt{\mathbf{E} \cdot \mathbf{E}}$ del campo eléctrico E y $H = \sqrt{\mathbf{H} \cdot \mathbf{H}}$ del campo magnético H como muestran Sadiku (2003); Lorrain y Corson (1979), ecuación (2).

$$\eta := \frac{E}{H} = \frac{\omega\mu}{k} = \frac{\omega\mu}{\omega\sqrt{\mu\epsilon}} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}; \text{ con } k = \sqrt{\mathbf{k} \cdot \mathbf{k}} \quad (2)$$

Entonces se puede definir el vector promedio de Poynting como $\mathbf{S}_{av} = S_{av}\hat{k} = S_{av}\hat{z}$. Si usamos la definición de impedancia donde $\mathbf{H} = \frac{\omega\mu}{k}\mathbf{E} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}\mathbf{E}$, entonces se obtiene que $\mathbf{S}_{av} = S_{av}\hat{z} = \frac{1}{2}\epsilon E^2\hat{z}$. Por otro lado, la energía magnética y eléctrica quedan en términos de la magnitud del campo eléctrico y magnético, $W_E = \frac{1}{2}\epsilon E^2$ y $W_H = \frac{1}{2}\mu H^2$. Entonces tenemos que el vector \mathbf{S}_{av} se puede ver como un “vector que lleva la energía de la onda” viajando con la onda electromagnética a una velocidad $v = 1/\sqrt{\epsilon\mu}$.

IRRADIANCIA

La irradiancia es la energía promedio que viaja con la onda electromagnética y en el vacío se define como la energía por unidad de área, ecuación (3).

$$I = S_{av} = \frac{1}{2} c\epsilon_0 E^2 \quad (3)$$

Donde I está en unidades de W/m^2 . También está definida como potencia P en

Watts por unidad de área A en m^2 , es decir, $I=P/A$, donde A es el área que encierra a la fuente de ondas electromagnéticas. También podemos escribir I en términos $E_{rms}^2 = \frac{1}{2} E^2$ como muestra Lorrain y Corson (1979) en la ecuación (4).

$$I = S_{av} = c\epsilon_0 E_{rms}^2 = 2.66 \times 10^{-3} E_{rms}^2 \quad (4)$$

Dónde el valor cuadrático medio está definido en la ecuación (5).

$$E_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} \mathbf{E} \cdot \mathbf{E} dt} \quad (5)$$

Usando las ecuaciones (4) y (5) se despejará el valor E_{rms} (V/m), dejándolo en términos de la irradiancia, obteniendo la ecuación (6).

$$E_{rms} = \sqrt{\frac{I}{2.66 \times 10^{-3}}} \quad (6)$$

AMPLITUD DEL CAMPO ELÉCTRICO E_0 (V/M)

Para realizar el cálculo correspondiente a la amplitud del campo eléctrico E_0 (V/m), se utilizará la ecuación (3), despejando el campo eléctrico E_0 (V/m), dejándolo en términos de la irradiancia, obteniendo la ecuación (8).

$$E_0 = E \quad (7)$$

$$E_0 = \sqrt{\frac{2}{c\epsilon_0}} I \quad (8)$$

AMPLITUD DEL CAMPO MAGNÉTICO H_0 (A/M)

La amplitud del campo magnético H_0 (A/m) se obtiene por medio de la ecuación (9).

$$H_0 = \frac{E_0}{c} \quad (9)$$

Si estas ondas electromagnéticas las hacemos atravesar por una superficie de área A La potencia promedio temporal

total que atraviesa una superficie de área A , P_{prom} esta definida como $P_{\text{prom}} = \int \mathbf{S}_{\text{av}} \cdot d\mathbf{A}$, donde $\int d\mathbf{A} = \mathbf{A} = A\hat{\mathbf{n}}$, con $\hat{\mathbf{n}}$ el vector normal a la superficie de incidencia. En la figura 2, se muestra el vector \mathbf{S}_{av} , el vector $\hat{\mathbf{n}}$, para rayos incidiendo de forma normal y oblicua con un ángulo θ , Sadiku (2003); Lorrain y Corson (1979).

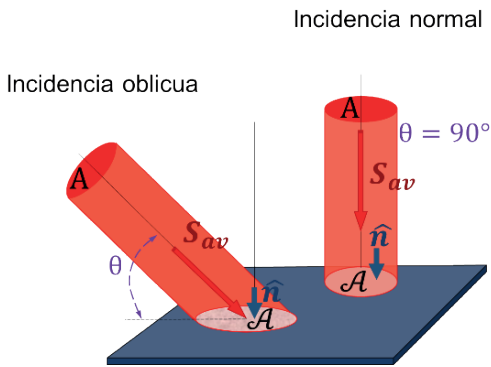


Figura 2. Vector de Poynting promedio \mathbf{S}_{av} y $\hat{\mathbf{n}}$, para rayos incidiendo de forma normal y oblicua sobre una superficie.

Los conceptos de irradiancia, amplitud de los campos eléctrico y magnético de ondas electromagnéticas son ampliamente estudiados en el curso de ondas electromagnéticas y están incluidos en el plan de estudios aprobado en el curso de “Propagación de ondas electromagnéticas” de la UPIITA-IPN (2009). La figura 3 muestra el esquema de un haz de ondas electromagnéticas monocromáticas, es decir, con la misma frecuencia y longitud de onda, las cuales se hacen incidir en el área del detector o sensor, correspondiente a cada dispositivo con el que se realice las mediciones.

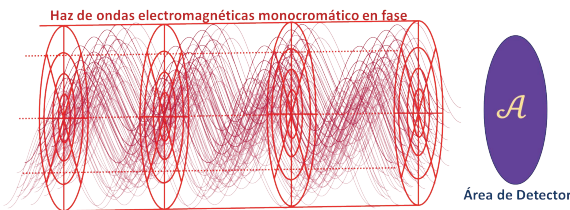


Figura 3. Esquema de un haz monocromático. Así mismo las ondulaciones se encuentran sincronizadas en su totalidad dentro del haz, por lo que poseen la misma fase sobre las superficies planas de ambos cortes transversales.

PARTE EXPERIMENTAL

Desde el punto de vista de enseñanza, los conceptos de Irradiancia, amplitud de los campos eléctrico y magnético son estudiados en la teoría de propagación de ondas electromagnéticas, y una forma didáctica de mostrar y encontrar los valores E_0 y H_0 dentro del espectro visible es mediante el uso de aplicaciones del tipo “Light Meter” que se pueden obtener en Google Play para sistema Android y también disponibles para sistema IOs. Las unidades en las que nos arrojan los datos las aplicaciones son luxes, y un lux es un lumen por metro cuadrado, para pasar los lux a unidades de W/m^2 formalmente se debe medir la irradiancia espectral para cada fuente para dar el factor de conversión correspondiente, sin embargo, la aproximación se toma en la longitud de onda centrada en el color verde ($\lambda=550\text{nm}$) lo cual implica que 683.00lux equivale a $1\text{W}/\text{m}^2$, esta es una buena aproximación para efectos didácticos. Los materiales usados son usados comúnmente por los estudiantes desde nivel bachillerato: 1) un smartphone, 2) aplicación Lux Light Meter, 3) cinta métrica y transportador, 4) un láser verde, 5) un láser rojo, 6) foco de luz blanca, 7) foco de luz cálida y 8) luz solar. A los estudiantes se les pide que hagan uso de una aplicación en su celular para medir la irradiancia al medir en lux la intensidad I de ondas electromagnéticas provenientes de diferentes fuentes, Villegas (2020) y (2022). El haz láser está compuesto por un grupo de ondas electromagnéticas monocromáticas y en fase, en la figura 3 se muestra el haz incidiendo en un área específica, en el caso de un luxómetro es el área del sensor. Los objetivos específicos son obtener la irradiancia en W/m^2 , la amplitud de los campos magnético y eléctrico de a) un láser verde y b) un láser rojo, c) la luz blanca, d) la luz cálida y e) la luz solar. En el caso de los láseres, la luz blanca y la luz cálida, las medidas

fueron tomadas a diferentes distancias y distintos ángulos, ambas configuraciones experimentales se muestran en la figura 4; y para la luz solar se midió a diferentes horas del día. Las mediciones se realizan en aire y se puede usar los valores para el vacío $v = c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$, $\epsilon = \epsilon_0 = 8.85418 \times 10^{-12} \text{ C}/(\text{N} \cdot \text{m}^2)$ y $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$. Después de explicar los conceptos básicos y los efectos de anisotropía al estudiante se le pide que lleve a cabo las mediciones del experimento y que concluya lo que observa.

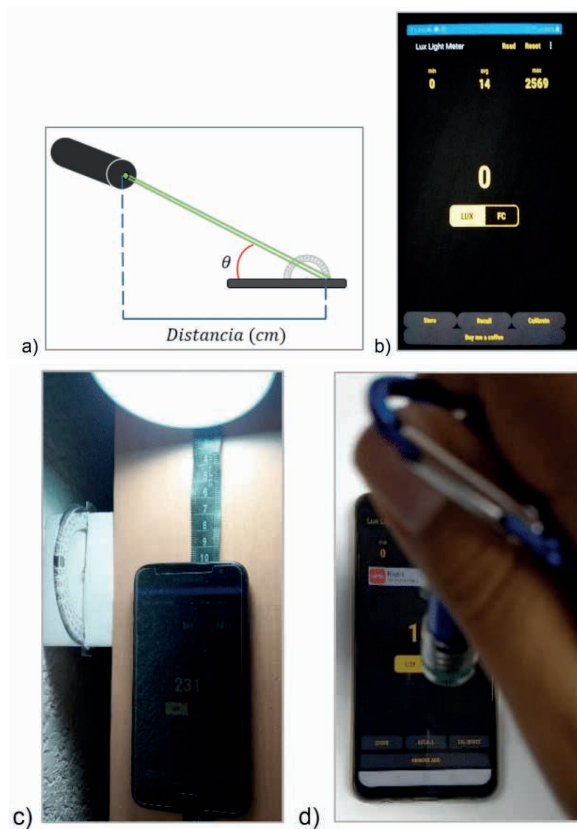


Figura 3. a) Diagrama general del sistema, en donde se contempla la distancia y el ángulo que toma la fuente de iluminación. b) Aplicación Lux Light Meter descargada en un celular Samsung. c) Configuración de medición con cinta métrica y transportador para luz blanca; para medir la distancia e inclinación respectivamente. d) Mediciones para láser rojo.

A continuación, se muestran una serie de resultados obtenidos por estudiantes que toman el curso teórico de Propagación de ondas electromagnéticas; durante el experimento los alumnos cuentan con el apoyo del profesor y libros de texto de la materia de propagación de ondas, Villegas (2020); y el curso de física avanzada, Villegas (2022).

RESULTADOS

Para *láser verde* tenemos un apuntador láser marca Netsell, usa baterías AAA y tiene un alcance máximo: 100 m con potencia de 5mW. Longitud de onda para la luz verde es de 532nm.

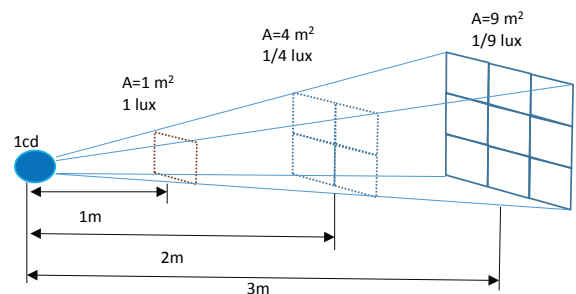


Figura 5. Concepto de un punto de luz que irradia en todas direcciones.

Las mediciones del haz de luz de láser verde se realizaron con el teléfono móvil Moto Z2play, hay que mencionar que la sensibilidad del sensor para este tipo de celular no es tan alta. Los resultados de la medida de la irradiancia en función de la distancia y el ángulo de inclinación θ , ver figuras 4 y 5, se muestran en la tabla 1. La figura 6 muestra la gráfica del comportamiento de la irradiancia variando el ángulo a diferentes distancias de la fuente, figuras 4 y 5. Además, se puede suponer que $A \approx A$. Los valores calculados para las amplitudes de los campos eléctrico E_0 y magnético H_0 obtenidos a partir de I se muestran en la tabla 2.

| Distancia / Ángulo | 0° | 30° | 45° | 60° |
|--------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 10 cm | 13lx (19.03mW/m ²) | 1627lx (2.38W/m ²) | 1571lx (2.30W/m ²) | 2776lx (4.06W/m ²) |
| 25 cm | 15lx (29.96mW/m ²) | 2267lx (3.31W/m ²) | 4548lx (6.65W/m ²) | 2723lx (3.98W/m ²) |
| 50 cm | 72lx (105.41mW/m ²) | 180 lx (2.63W /m ²) | 1246lx (1.82W/m ²) | 1970lx (2.88W/m ²) |
| 75 cm | 56lx (81.99mW/m ²) | 1564lx (2.28W/m ²) | 1608lx (2.35W/m ²) | 1576lx (2.30W/m ²) |

Tabla 1. Láser verde. Datos de para diferentes distancias en cm y orientaciones.

| Ángulo | I (W/m ²) | E _{rms} (V/m) | E ₀ (V/m) | H ₀ (A/m) |
|--------|-------------------------|------------------------|----------------------|----------------------|
| 0° | 19.03×10 ⁻³ | 754.71 | 1067.32 | 2.83 |
| | 29.96×10 ⁻³ | 946.96 | 1339.20 | 3.55 |
| | 105.41×10 ⁻³ | 1776.25 | 2511.99 | 6.66 |
| | 81.99×10 ⁻³ | 1566.55 | 2215.43 | 5.88 |
| 30° | 2.38 | 8440.20 | 11936.24 | 31.68 |
| | 3.31 | 9953.55 | 14076.44 | 37.36 |
| | 2.63 | 8872.42 | 12547.49 | 33.3 |
| | 2.28 | 8260.98 | 11682.78 | 31.01 |
| 45° | 2.30 | 8297.13 | 11733.91 | 31.14 |
| | 6.65 | 14108.31 | 19952.16 | 52.96 |
| | 1.82 | 7380.00 | 10436.89 | 27.70 |
| | 2.35 | 8386.00 | 11859.59 | 31.48 |
| 60° | 4.06 | 11023.69 | 15589.85 | 41.38 |
| | 3.98 | 10914.55 | 15435.50 | 40.97 |
| | 2.88 | 9284.54 | 13130.32 | 34.85 |
| | 2.30 | 8297.13 | 11733.91 | 31.14 |

Tabla 2. Láser verde. Amplitudes de los campos eléctrico y magnético en función de I.

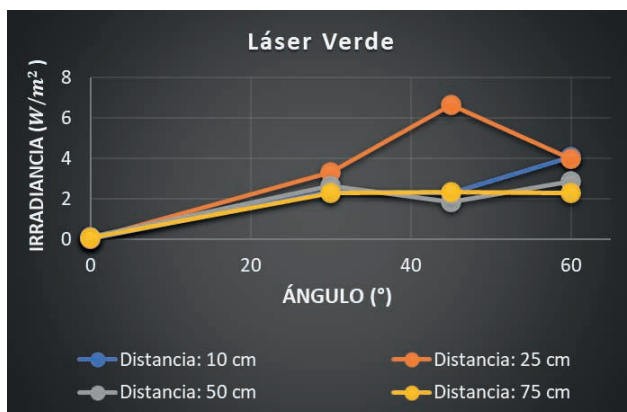


Figura 6. Grafica para láser verde donde se muestra el comportamiento de la irradiancia variando el ángulo a diferentes distancias de la fuente como se muestra en las figuras 4 y 5.

Para *láser rojo* el análisis del fue realizado con un Huawei P Smart 2019, la aplicación ocupada tenía un límite de 100000lx. Los resultados de la medida de la irradiancia en función de la distancia y el ángulo de inclinación θ , se muestran en la tabla 3. La figura 7 muestra la gráfica del comportamiento

de la irradiancia variando el ángulo a diferentes distancias de la fuente, figuras 4 y 5. También podemos suponer que $A \approx \lambda$. Los valores calculados para las amplitudes del campo eléctrico E_0 y magnético H_0 obtenidos a partir de I se muestran en la tabla 4.

| Distancia / Ángulo | 0° | 30° | 45° | 60° |
|--------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| 10 cm | 82484 lx (120.7W/m ²) | 30165lx (44.16W/m ²) | 17894 lx (26.1W/m ²) | 7423 lx (10.8W/m ²) |
| 25 cm | 72756 lx (106.5W/m ²) | 46222lx (67.6 W/m ²) | 20553 lx (30.09 W/m ²) | 9066 lx (13.2 W/m ²) |
| 50 cm | 80950 lx (118.5W/m ²) | 41510 lx (60.7 W/m ²) | 20157 lx (29.5 W/m ²) | 9842 lx (14.4 W/m ²) |
| 75 cm | 67248 lx (98.4 W/m ²) | 20567 lx (30.1 W/m ²) | 11423 lx (16.7 W/m ²) | 7864 lx (11.5 W/m ²) |

Tabla 3. Láser rojo. Datos de para diferentes distancias en cm y orientaciones.

| Ángulo | I (W/m ²) | E _{rms} (V/m) | E ₀ (V/m) | H ₀ (A/m) |
|--------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 0° | 120.70 | 9.90x10 ⁶ | 13.59x10 ⁶ | 36.04x10 ³ |
| | 106.50 | 8.47x10 ⁶ | 11.97x10 ⁶ | 31.75x10 ³ |
| | 118.50 | 9.43x10 ⁶ | 13.33x10 ⁶ | 25.01x10 ³ |
| | 98.40 | 7.83x10 ⁶ | 11.07x10 ⁶ | 20.76x10 ³ |
| 30° | 44.16 | 3.51x10 ⁶ | 4.96x10 ⁶ | 9.31x10 ³ |
| | 67.60 | 5.38x10 ⁶ | 7.60x10 ⁶ | 14.27x10 ³ |
| | 60.70 | 4.83x10 ⁶ | 6.83x10 ⁶ | 12.81x10 ³ |
| | 30.10 | 2.39x10 ⁶ | 3.37x10 ⁶ | 6.33x10 ⁶ |
| 45° | 26.10 | 2.07x10 ⁶ | 2.92x10 ⁶ | 5.49x10 ⁶ |
| | 30.09 | 2.39x10 ⁶ | 3.37x10 ⁶ | 6.33x10 ³ |
| | 29.50 | 2.34x10 ⁶ | 3.30x10 ⁶ | 6.20x10 ³ |
| | 16.70 | 1.32x10 ⁶ | 1.86x10 ⁶ | 3.50x10 ³ |
| 60° | 10.80 | 0.859x10 ⁶ | 1.21x10 ⁶ | 2.27x10 ³ |
| | 13.20 | 1.05x10 ⁶ | 1.48x10 ⁶ | 2.78x10 ³ |
| | 14.40 | 1.14x10 ⁶ | 1.61x10 ⁶ | 3.02x10 ³ |
| | 11.50 | 0.915x10 ⁶ | 1.29x10 ⁶ | 2.42x10 ³ |

Tabla 4. Láser rojo. Amplitudes de los campos eléctrico y magnético en función de I.

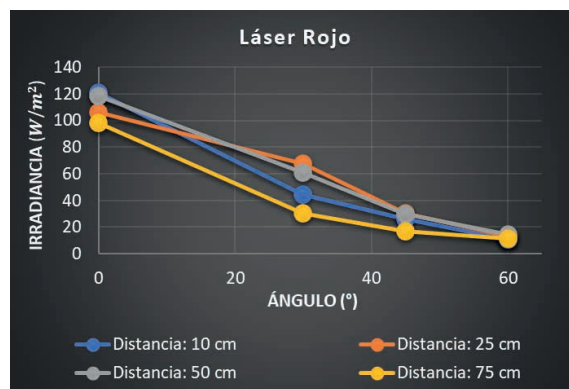


Figura 7. Gráfica para láser rojo donde se muestra el comportamiento de la irradiancia variando el ángulo a diferentes distancias de la fuente como se muestra en las figuras 4 y 5.

La *luz* es una combinación de diferentes tipos de luz con diferentes frecuencias y longitudes de onda. En este caso la *luz blanca* es una mezcla, si hacemos pasar luz blanca por un prisma de cristal, podemos ver que la luz blanca está compuesta por varios colores, figura 8. Según el color de la luz, su longitud de onda es diferente, para la luz violeta tenemos una longitud de onda aproximada de 460nm, la luz azul 500nm, la luz verde 560nm, la luz amarilla 590nm, la luz naranja o ámbar 610nm y por último la luz roja 660nm. No todos los colores dentro de la luz blanca se encuentran en la misma proporción, es por ello que, si observamos la luz blanca proveniente de dos diferentes fuentes, es posible notar que la luz no es la misma. En general la *luz blanca* posee mayor proporción de luz azul, comparada con la luz amarilla o cálida. La *luz blanca* es considerada, en general, como la presencia del espectro visible completo (~ 400nm a 700nm) del espectro electromagnético, en el cual se mezclan todos los colores de modo que se ve blanco, incoloro o incluso levemente amarillento a la vista del ojo humano, figura 8. Dado que la luz blanca es una mezcla de varias longitudes de onda, no es posible asignar un solo valor de longitud de onda a la luz blanca, sin embargo, con análisis numérico un valor aproximado a la longitud de onda de la luz blanca es 577nm, este será el valor que tomar en cuenta para realizar los cálculos. Las mediciones de luz blanca se realizaron en una habitación oscura donde

se calibro, es decir, al inicio el medidor de luz marco cero, las distancias se midieron en centímetro y los ángulos en grados utilizando un transportador, la fuente de luz utilizada fue una lámpara con panel led.

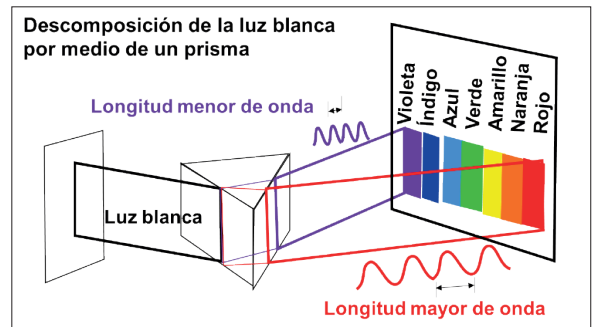


Figura 8. Composición de la luz blanca.

Los resultados de la medida de la irradiancia en función de la distancia y el ángulo de inclinación θ , ver figura 4, se muestran en la tabla 5. Esta vez no podemos suponer que $A \approx A$, sin embargo, los valores del light meter están medidos en lux, entonces es una medida que toma en cuenta las diferencias de áreas como se muestra en la figura 4, sin embargo, al suponer condiciones en el vacío la amplitud del campo eléctrico y magnético debe ser constante en todo el medio. Los valores calculados para las amplitudes del campo eléctrico E_0 y magnético H_0 obtenidos a partir de se muestran en la tabla 6. La figura 9 muestra la gráfica del comportamiento de la irradiancia variando el ángulo a diferentes distancias de la fuente, figuras 4 y 5.

| Distancia/Ángulo | 0° | 30° | 45° | 60° |
|------------------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 10 cm | 231 lx (0.33821W/m ²) | 1150 lx (1.68374W/m ²) | 4059 lx (5.94289W/m ²) | 5828 lx (8.53294W/m ²) |
| 25 cm | 60 lx (0.08784W/m ²) | 162 lx (0.23718W/m ²) | 1301 lx (1.90483W/m ²) | 1664 lx (2.43631W/m ²) |
| 50 cm | 28 lx (0.04099W/m ²) | 57 lx (0.08345W/m ²) | 254 lx (0.37188W/m ²) | 581 lx (0.85065W/m ²) |
| 75 cm | 24 lx (0.03513W/m ²) | 29 lx (0.04245W/m ²) | 162 lx (0.23718W/m ²) | 292 lx (0.42752W/m ²) |

Tabla 5. Luz Blanca. Datos de para diferentes distancias en cm y orientaciones.

| Ángulo | I (W/m ²) | E _{rms} (V/m) | E ₀ (V/m) | H ₀ (A/m) |
|--------|-----------------------|------------------------|----------------------|----------------------|
| 0° | 0.33821 | 11.27599 | 15.94666 | 0.04233 |
| | 0.08784 | 5.74678 | 8.12717 | 0.02157 |
| | 0.04099 | 3.92580 | 5.55192 | 0.01474 |
| | 0.03513 | 3.63458 | 5.14007 | 0.01364 |
| 30° | 1.68374 | 25.15925 | 35.58056 | 0.09445 |
| | 0.23718 | 9.44292 | 13.35431 | 0.03545 |
| | 0.08345 | 5.60127 | 7.92139 | 0.02103 |
| | 0.04245 | 3.99529 | 5.65019 | 0.01500 |
| 45° | 5.94289 | 47.26703 | 66.84568 | 0.17744 |
| | 1.90483 | 26.76008 | 37.84447 | 0.10046 |
| | 0.37188 | 11.82403 | 16.72171 | 0.04439 |
| | 0.23718 | 9.44292 | 13.35431 | 0.03545 |
| 60° | 8.53294 | 56.63809 | 80.09836 | 0.21261 |
| | 2.43631 | 30.26394 | 42.79968 | 0.11361 |
| | 0.85065 | 17.88286 | 25.29018 | 0.06713 |
| | 0.42752 | 12.67769 | 17.92897 | 0.04759 |

Tabla 6. Luz Blanca. Amplitudes de los campos eléctrico y magnético en función I.



Figura 9. Grafica para la luz blanca donde se muestra el comportamiento de la irradiancia variando el ángulo a diferentes distancias de la fuente como se muestra en las figuras 4 y 5.

El análisis de la *luz cálida* fue usado con un Samsung A30 encontramos que la irradiancia depende de la distancia del sensor y el ángulo de medición a mayor lejanía menor luminosidad, y si el vector de incidencia de las ondas electromagnéticas respecto al vector normal a la superficie de incidencia se hacen cada vez más perpendiculares entre sí, entonces también baja el valor de la potencia lumínica o irradiancia I. En la tabla 7 se

muestran los resultados de variar la distancia y el ángulo. La tabla 8 muestra los valores de las amplitudes de los campos eléctricos y magnéticos. La figura 10 muestra la gráfica del comportamiento de la irradiancia variando el ángulo a diferentes distancias de la fuente, figuras 4 y 5.

| Distancia/ Ángulo | 0° | 30° | 45° | 60° |
|----------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| 10 cm | 1564.55 lx (12.36 W/m ²) | 1689.87 lx (13.35 W/m ²) | 1494.936 lx (11.81 W/m ²) | 1203.797 lx (9.51 W/m ²) |
| 25 cm | 431.64 lx (3.41 W/m ²) | 239.24 lx (1.89 W/m ²) | 101.26 lx (0.8 W/m ²) | 89.873 lx (0.71 W/m ²) |
| 50 cm | 117.72 lx (0.93 W/m ²) | 44.30 lx (0.35 W/m ²) | 18.987 lx (0.15 W/m ²) | 17.721 lx (0.14 W/m ²) |
| 75 cm | 51.898 lx (0.41 W/m ²) | 37.97 lx (0.3 W/m ²) | 17.721 lx (0.14 W/m ²) | 7.594 lx (0.06 W/m ²) |

Tabla 7. Luz cálida. Datos de para diferentes distancias en cm y orientaciones.

| Ángulo | I (W/m ²) | E _{rms} (V/m) | E ₀ (V/m) | H ₀ (A/m) |
|--------|-----------------------|------------------------|----------------------|----------------------|
| 0° | 12.36 | 810.78 | 1146.6 | 3.04 |
| | 3.41 | 425.86 | 602.3 | 1.6 |
| | 0.93 | 222.4 | 314.5 | 0.83 |
| | 0.41 | 147.66 | 208.8 | 0.55 |
| 30° | 13.35 | 842.62 | 1191.7 | 3.16 |
| | 1.89 | 317.04 | 448.4 | 1.19 |
| | 0.35 | 136.43 | 192.9 | 0.51 |
| | 0.3 | 126.31 | 178.6 | 0.47 |
| 45° | 11.81 | 792.53 | 1120.8 | 2.97 |
| | 0.8 | 206.27 | 291.7 | 0.77 |
| | 0.15 | 89.31 | 126.3 | 0.33 |
| | 0.14 | 86.28 | 122 | 0.32 |
| 60° | 9.51 | 711.19 | 1005.8 | 2.67 |
| | 0.71 | 194.32 | 274.8 | 0.73 |
| | 0.14 | 86.28 | 122 | 0.32 |
| | 0.06 | 56.48 | 79.9 | 0.21 |

Tabla 8. Luz cálida. Amplitudes de los campos eléctrico y magnético en función I.

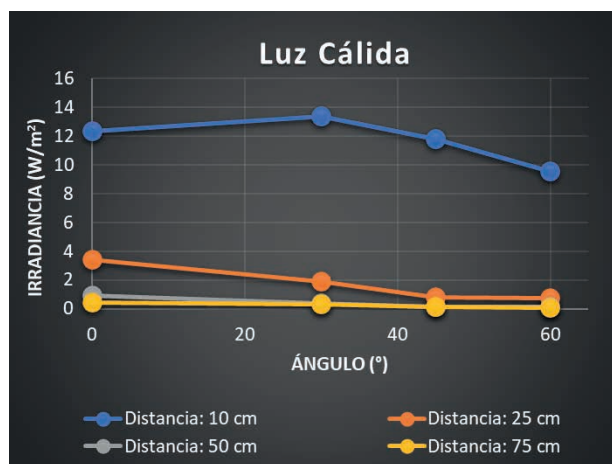


Figura 10. Grafica para la luz blanca donde se muestra el comportamiento de la irradiancia variando el ángulo a diferentes distancias de la fuente como se muestra en las figuras 4 y 5.

Luz solar. No se puede calcular los valores de λ y f para una sola onda electromagnética ya que el sol emite más de un tipo de onda. Así que se midió a diferentes horas del día. La diferencia es dada debido a que la tierra en constante rotación, lo que provoca que en alguna hora determinada del día estamos en un punto con mayor incidencia o menor, además de otros factores atmosféricos. En la tabla 9 se muestran los resultados a diferentes horas del día.

| Hora del Día | I |
|--------------|--|
| 10:45 a. m. | 78257lx (114.5 W/m ²) |
| 11:33 a. m. | 127862lx (187.20644 W/m ²) |
| 11:40 a. m. | 80000lx (117.196 W/m ²) |
| 03:20 p. m. | 95450lx (139.7 W/m ²) |

Tabla 9. Luz solar. Datos de para diferentes horas del día.

Para las medidas de luz solar los alumnos son capaces de notar los diferentes efectos de orientación y distancia en la irradiancia solar en frases como “Al realizar las mediciones con luz solar, notamos algo diferente, las mediciones de mayor valor fueron obtenidas cuando el sensor se encontraba a 45 grados con respecto al piso y orientado al lugar donde se captaba más luz”. Finalmente es importante aclarar que los resultados recabados en este trabajo son precisos mas no exactos, debido a que si buscamos obtener un resultado exacto se deben realizar las mediciones con un equipo profesional calibrado, en este aspecto la diferencia en los valores de la medición puede ser por diversos factores como lo es; el tamaño del área de incidencia de cada dispositivo, el cual debe ser distinto por cuestiones de patentes y sus respectivas calidades.

CONCLUSIÓN

En conclusión, la medición de irradiancia y la comprensión de la polarización de la luz son conceptos fundamentales en el

estudio de la óptica y su aplicación en una variedad de campos. La teoría de ondas electromagnéticas y los vectores de Stocks y Jones son herramientas útiles para entender y medir estos conceptos. La comprensión de la propagación de ondas electromagnéticas y su interacción con diferentes medios es importante para aplicaciones en la tecnología de comunicaciones, la fabricación de componentes ópticos y la detección remota. Los alumnos pueden explorar y diseñar experimentos para profundizar las aplicaciones de la medición de irradiancia y la polarización de la luz en campos específicos, como la medicina y la industria. Las observaciones experimentales que los alumnos realizan les dan información indirecta de características de ondas electromagnéticas oscilando a frecuencia de Terahertz y les permite cuantificar de forma indirecta la amplitud de ondas eléctricas E_0 y H_0 ya sea para una fuente con valores conocidos o desconocidos de antemano. Este tipo de observaciones experimentales que se pueden realizar relativamente rápido y de forma sencilla los ayuda a entender que son las ondas electromagnéticas, cual es la energía que transfieren a velocidades de la luz en el vacío, la polarización y respuesta anisotrópica de estas en sus posibles aplicaciones en dispositivos o su impacto en áreas de interés como conversión de energía solar a eléctrica.

REFERENCIAS

LORRAIN P. and CORSON D. (1979). **Electromagnetic wave**. En *Electromagnetism: principles and applications*. W.H. Freeman and Company, San Francisco.

SADIKU, M. N. O. (2003). **Propagación de Ondas electromagnéticas**. En Sadiku, M. N. O. (2003) *Elementos de Electromagnetismo* (pp.410-466). Oxford University Press.

VILEGAS R. (2020). **Curso de Propagación de Ondas**. Ingeniería Telemática, UPIITA-IPN Programa 2009.

VILEGAS R. (2022). **Curso de Física Avanzada**. Ingeniería en Energía, UPIITA-IPN Programa 2009.