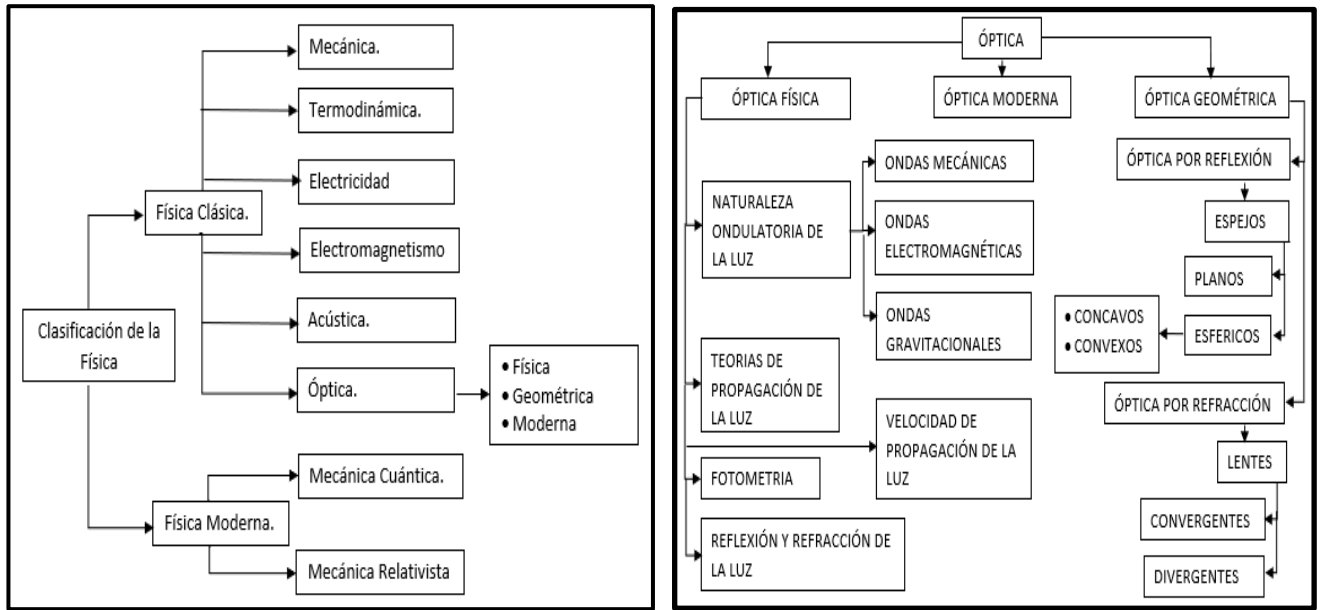


# ÓPTICA



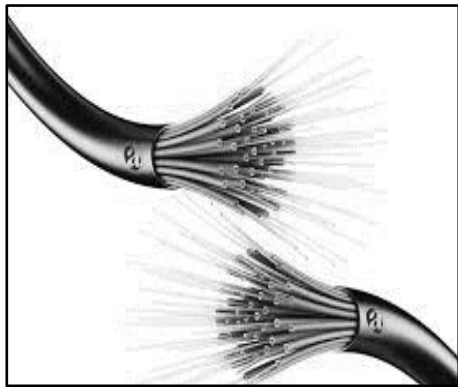
## Resultados de Aprendizaje:

1. Define a la óptica con precisión para determinar su utilidad.
2. Analiza la clasificación de la óptica para comprender su importancia.
3. Aplica las propiedades de la óptica física en ejemplos de la vida cotidiana.
3. Aplica las propiedades de la óptica geométrica en espejos y lentes en la vida diaria con efectividad.
4. Describe las características elementales de la óptica moderna en el avance científico del ser humano.

## ÓPTICA

La óptica es una rama de la física que se dedica al estudio de la luz visible: sus propiedades y su comportamiento. También analiza sus aplicaciones como es la construcción de instrumentos ópticos para aprovecharla y valerse de ella en procura de mejorar las condiciones de vida del ser humano.

Tiene un campo de investigación muy importante que entrega de herramientas a las demás ciencias, especialmente a la astronomía, la ingeniería, la fotografía y la medicina (oftalmología y optometría). A ella debemos la existencia de espejos, lentes, telescopios, microscopios, láseres y sistemas de fibra óptica.



La luz ha sido definida por la óptica como una franja de emisiones electromagnéticas, cuyo comportamiento es similar al de otras formas de ondas similares no visibles al ojo humano que están en el rango del espectro electromagnético, conocidas como radiación ultravioleta o infrarroja.

Esto significa que su comportamiento puede ser descrito según la mecánica de ondas (excepto en contextos muy específicos en los que la luz actúa como una partícula) y los planteamientos de la electrodinámica clásica de la luz.

## ÓPTICA FÍSICA

La óptica física es una parte de la óptica que estudia e investiga la naturaleza de la luz.

Analiza los fenómenos luminosos como la interferencia, polarización o difracción. Además, propone modelos predictivos para saber cómo se comportará la luz ante determinadas situaciones o en determinados medios, cuando no existen sistemas de simulación numérica.

## NATURALEZA ONDULATORIA DE LA LUZ

Una onda es una perturbación que se propaga desde el punto en que se produjo hacia el medio que rodea ese punto, sin que exista transporte de materia. Mientras que una perturbación es una alteración instantánea del equilibrio del sistema por medio de un agente externo.

Las ondas se clasifican de acuerdo con el medio de propagación en ondas mecánicas, ondas electromagnéticas y ondas gravitacionales.

### ONDAS MECANICAS

Las ondas mecánicas necesitan de un medio material para propagarse, así el sonido necesita del aire para ser transportado; cuando se deja caer una piedra en un estanque tranquilo, las ondas viajarán hacia afuera a través del agua; recordando que la materia no se transporta

Otros ejemplos que podemos nombrar son: cuando se golpea un diapasón y las ondas sonoras se propagan por todas las direcciones.

### ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS.

Las ondas electromagnéticas no necesitan de un medio material para transportarse, pueden propagarse en el vacío, por ejemplo, la luz, se transporta en el espacio desde nuestro Sol hacia la Tierra, cuando se enciende un fósforo y las ondas luminosas se expanden, en todas las direcciones (a la rapidez de la luz de 300 000 km/s)

### ONDAS GRAVITACIONALES.

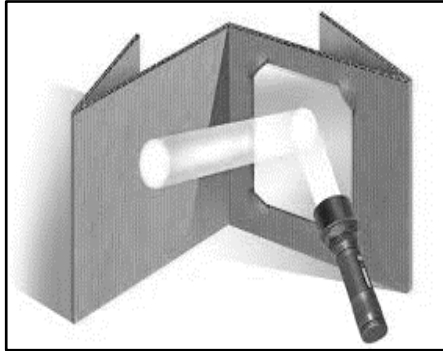
Una onda gravitacional es la propagación de una perturbación gravitatoria que genera una fluctuación en la curvatura del espacio-tiempo producida por un cuerpo masivo acelerado que se propagan como ondas a la velocidad de la luz.

Ejemplos de generación de este tipo de ondas se tiene a partir de las colisiones de agujeros negros, los choques entre estrellas de neutrones, la rotación a gran velocidad de una estrella de neutrones que tenga deformaciones en su superficie, la formación de supernovas.

Se puede afirmar ahora que la "LUZ" es un tipo de energía mediante la cual se hacen visibles los objetos que nos rodean que se transmiten en forma de ondas transversales (la perturbación de la partícula oscila en forma perpendicular a la propagación de la onda, es decir de arriba hacia abajo)

## TEORIAS DE LA PROPAGACION DE LA LUZ

Durante siglos se creía que la luz consistía en un chorro de partículas que eran emitidas por una fuente luminosa. Los cuerpos podían ser observados debido a que se reflejan algunos corpúsculos que los golpeaban y al llegar estas partículas al ojo, lo que producía la sensación de ver. Análisis que explicaba la reflexión de la luz en un espejo.



La naturaleza de propagación de la luz ha sido analizada a lo largo de la historia, las teorías propuestas en las diferentes épocas por los físicos son:

### 1. TEORIA CORPUSCULAR:

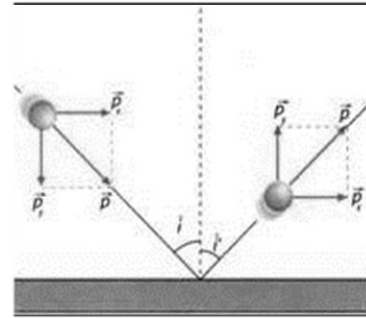
También ha recibido el nombre “de emisión” fue desarrollada y publicada por Isaac Newton en 1704.

Esta teoría afirma que la luz está formada por partículas materiales muy pequeñas sin masa (llamadas corpúsculos) que son emitidos por los cuerpos que reflejan la luz a gran velocidad. Gracias a esto, eran capaces de atravesar los cuerpos transparentes, lo que permite ver a través de ellos. En cambio, en los cuerpos opacos, los corpúsculos rebotaban, por lo cual no podemos observar los que está detrás de ellos.

Este postulado permite afirmar que:

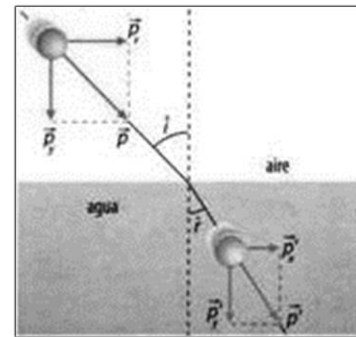
- La Luz se propaga en movimiento rectilíneo en el medio y como son tan pequeños en comparación con la materia, no hay fricción, así los focos luminosos emitirían minúsculas partículas que se propagan en todas direcciones y que, al chocar con nuestros ojos, producen la sensación luminosa que se interpreta como la visión.
- La luz se refleja, ya que los corpúsculos chocan elásticamente contra la superficie de separación entre dos medios. Como la diferencia de masas es muy grande los corpúsculos rebotan, de modo que la componente horizontal de la cantidad de

movimiento  $p_x$  se mantiene constante mientras que la componente normal  $p_y$  cambia de sentido. Cumpliendo la ley de la reflexión, el ángulo de incidencia y de reflexión eran iguales.



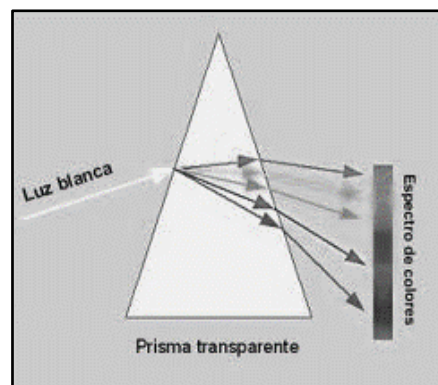
En la teoría corpuscular de la reflexión de la luz las partículas rebotan

- La Luz se refracta debido a la variación de su dirección de propagación acercándose a la normal. Según esto, la velocidad de propagación de la luz en agua es mayor que en el aire.



Esta interpretación conduce al resultado de que la velocidad de propagación de la luz debe ser mayor por el agua que por el aire.

- La Luz Blanca está conformada por los diferentes colores, ya que se deben a distintos tipos de corpúsculos, cada uno responsable de un color.



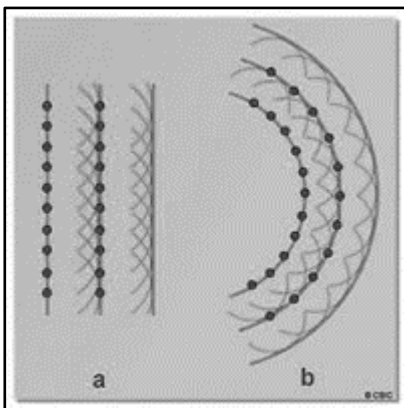
Fallos de la teoría corpuscular de la luz:

- Newton pensaba que la luz viaja más rápido en los medios más densos que en los medios menos densos, lo cual se ha comprobado que no es así, ya que la luz viaja más rápido en el aire que en el agua.
- La idea de que los diferentes colores de la luz tienen relación con el tamaño de los corpúsculos no tiene ninguna justificación.
- Newton pensaba que la reflexión de la luz se debía a la repulsión entre los corpúsculos y la superficie en la que se refleja; mientras que la refracción está causada por la atracción entre los corpúsculos y la superficie que los refracta. Sin embargo, esta afirmación se comprobó incorrecta.
- Se sabe que, por ejemplo, los cristales reflejan y refractan la luz al mismo tiempo, lo cual según la teoría de Newton implicaría que atrajeran y repelieran al mismo tiempo la luz.

## 2. TEORIA ONDULATORIA

El científico holandés **Christian Huygens**, contemporáneo de Newton, elaboró una teoría para explicar la naturaleza y el comportamiento de la luz (1690).

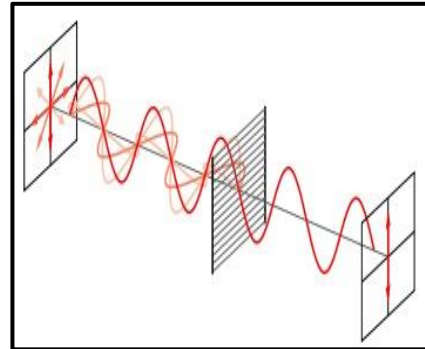
Representación gráfica de los dos puntos en los que Huygens fundamenta su teoría



- Una fuente luminosa emite ondas esféricas, de la misma manera que un movimiento ondulatorio en la superficie del agua emite ondas superficiales. Un rayo de luz está materializado por una recta perpendicular a la superficie de la onda.
- Cada punto de una onda luminosa primaria se comporta como un centro emisor que a su vez emite ondas secundarias de la misma frecuencia y velocidad que las

ondas primarias. La onda resultante es la envolvente de las ondas secundarias.

Esta teoría postula que la luz es producida por la vibración de los electrones emitida por una fuente y se propaga en forma de ondas longitudinales, a través del vacío en un medio insustancial e invisible parecido a un gas llamado éter. El éter ocuparía entonces todo el espacio e impregnaría todos los cuerpos transparentes, incluido el vacío. Además, indica que la rapidez de la luz disminuye al penetrar al agua. Con ello, explica y describe la refracción y las leyes de la reflexión.



Fallos de la teoría ondulatoria de la luz:

- Considerar a las ondas de luz longitudinales, como las del sonido que se propaga en un medio aun no descubierto que llamó "éter".
- Considerar al "éter" como un fluido impalpable que todo lo llena incluso donde parece no haber nada, el vacío, luego no existe el vacío ya que está lleno del "éter".
- Considera la luz como ondas esféricas y concéntricas con centro en el punto donde se origina la perturbación (foco luminoso).
- En sus inicios, esta teoría no fue considerada debido al prestigio de Newton. Pasó más de un siglo para que fuera tomada en cuenta: se le sometió a pruebas a través de los trabajos del médico inglés Thomas Young, sobre las interferencias luminosas, y el físico francés Auguste Jean Fresnel, sobre la difracción. Como consecuencia, quedó de manifiesto que su poder explicativo era mayor que el de la teoría corpuscular.

## 3. TEORIA ELECTROMAGNÉTICA

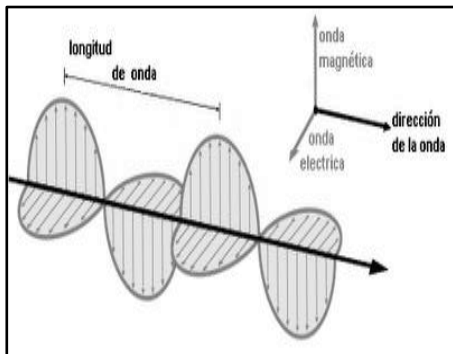
En 1873 el físico inglés James Clerk Maxwell, explica que los fenómenos eléctricos están relacionados con los fenómenos magnéticos. Señala que cada variación en el campo eléctrico origina un cambio en la proximidad del campo magnético e, inversamente. Por lo tanto, la luz es una onda electromagnética trasversal que se propaga perpendicular entre sí y no necesita de un medio alguno para propagarse. (Del tipo de ondas de radio.)

Este hecho permitió descartar que existiera un medio de propagación insustancial e invisible, llamado éter, lo que fue comprobado por el experimento de Michelson y Morley.

Hertz produce por primera vez ondas electromagnéticas (luz) a partir de circuitos eléctricos alternos y realiza con ellas reflexión, refracción e interferencias.

Fallos de la teoría electromagnética de la luz.

- Deja sin explicación fenómenos relacionados con el comportamiento de la luz en cuanto a la absorción y la emisión: el efecto fotoeléctrico y la emisión de luz por cuerpos incandescentes.



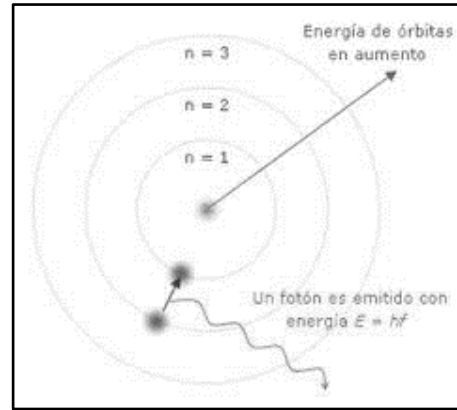
**4. TEORIA CUANTICA**

Fue propuesta por Max Planck en 1901. Indicaba que en la emisión de luz por átomos intervienen “saltos” de electrones, de un nivel de menor energía (más interno) a un nivel de mayor energía (más externo) y solo es de manera momentánea, ya que pronto regresan al lugar de donde partieron; a esta acción se le llama “estado excitado” y es precisamente en el regreso cuando se emite un fotón; un impulso palpitante de radiación electromagnética cuya frecuencia está asociada al salto que efectuó.

Puede considerarse como un “corpúsculo” de energía pura, una “partícula” de luz expulsada del átomo. Por ejemplo, un fotón de luz roja lleva una cantidad de energía que corresponde a su frecuencia, otro fotón con el doble de frecuencia tendrá el doble de energía y corresponderá a luz ultravioleta. Si se excitan muchos átomos en un material, se emitirán muchos fotones con frecuencias que corresponden a los distintos niveles que se excitaron y que se asocian a los colores característicos que identifican a cada elemento químico.

Posteriormente en 1905 el físico de origen alemán Albert Einstein afirma que la luz se transmite en paquetes de energía denominados cuantos o

fotones. Con esto propuso que la luz se comporta como onda en determinadas condiciones.



Fallos de la teoría cuántica de la luz.

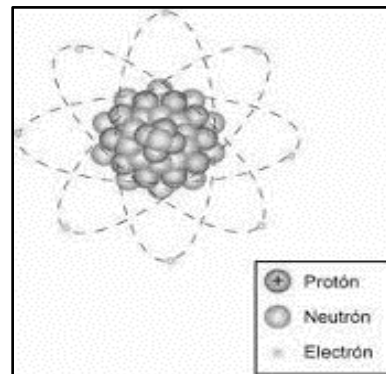
- No puede explicar los fenómenos de tipo ondulatorio, como son las interferencias, las difracciones, entre otros.

**5. TEORIA MECÁNICA – ONDULATORIA**

El físico francés **Luis de Broglie**, en el año 1924, señaló, que los fotones tenían un movimiento ondulatorio, o sea que la luz tenía un comportamiento dual (onda – partícula). Así, la luz, en cuanto a su propagación, se comporta como onda, pero su energía es transportada junto con la onda luminosa por unos pequeños corpúsculos que se denominan fotones.

Esta teoría es aceptada actualmente y establece, la naturaleza corpuscular de la luz en su interacción con la materia (proceso de emisión y absorción) y la naturaleza electromagnética de su propagación.

Conocida como naturaleza dual de la Luz. (ondulatoria y corpuscular)



## VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LA LUZ

Durante mucho tiempo se pensó que la velocidad de la luz era infinita y se transmitía espontáneamente de un lado a otro. Olaus Roemer (1644-1710) fue el primer científico que, en 1676, midió de manera exitosa la velocidad de propagación de la luz. Su método consistió en medir los periodos de traslación de uno de los satélites de Júpiter alrededor del planeta.

Descubrió que los periodos se volvían más grandes que el promedio cuando la Tierra se alejaba de Júpiter, y más pequeños cuando nuestro planeta se aproximaba a él. Romer atribuyó esta variación en el periodo, al hecho de que la distancia entre Júpiter y la Tierra cambia de una observación a la siguiente.

Comparando los tiempos de los eclipses observados en diversos puntos de la órbita terrestre, llegó a la conclusión que la luz tardaba 22 minutos en cruzar la órbita de la Tierra. Este resultado resultó importante, desde el punto de vista histórico, porque demostró que la luz tiene una rapidez finita.

Poco después Christian Huygens utilizó los datos de Roemer para hacer el primer cálculo de la velocidad de la luz. Combinando el valor de Roemer de 22 minutos para cruzar la órbita terrestre con su propia estimación del diámetro de la órbita de la Tierra obtuvo un valor de la rapidez de la luz en el vacío que en unidades actuales es  $2,1 \times 10^8$  m/s, lo que contribuyó un éxito notable en dicho tiempo.

Albert Michelson y Edward Morley (1838-1923) realizaron en 1887 un experimento y determinaron que la velocidad de la luz en el vacío es siempre constante, independientemente del estado de movimiento relativo entre la fuente luminosa y el observador. Este resultado permite concluir que la velocidad de la luz es una constante universal. Por su parte, la teoría especial de la relatividad establece que existe una velocidad límite imposible de superar. Esta velocidad límite es la velocidad de la luz.

La velocidad con que la luz se propaga a través de un medio homogéneo y transparente es una constante característica de dicho medio, y por tanto, cambia de un medio a otro.

En la actualidad se acepta para la velocidad de la luz en el vacío el valor  $C = 300\,000$  km/s. En cualquier medio material transparente la luz se propaga con una velocidad que es siempre inferior a  $C$ . Así, por ejemplo, en el agua lo hace a  $225\,000$  km/s y en el vidrio a  $195\,000$  km/s.

El valor de la velocidad de la luz es de gran utilidad en la medición de grandes distancias como la de los diferentes cuerpos celestes que conforman el universo. El año luz es la distancia que recorre la luz en un año y es igual a  $9,5 \times 10^{12}$  km.

## ÍNDICE DE REFRACCIÓN

En óptica se suele comparar la velocidad de la luz en un medio transparente con la velocidad de la luz en el vacío, mediante el llamado *índice de refracción absoluto*  $n$  del medio: se define como el cociente entre la velocidad  $C$  de la luz en el vacío y la velocidad  $V$  de la luz en el medio, es decir:

$$n = \frac{C}{V}$$

Debido a que  $C$  es siempre mayor que  $v$ ,  $n$  resulta siempre mayor o igual que la unidad. Es así *cuanto mayor sea el índice de refracción absoluto de una sustancia, más lentamente viajará la luz por su interior*.

Si lo que se pretende es comparar las velocidades  $V_1$  y  $V_2$  de dos medios diferentes se define entonces el *índice de refracción relativo del medio 1 respecto del 2* como cociente entre ambas:

$$n_{1,2} = \frac{V_1}{V_2}$$

o en términos de índices de refracción absolutos,

$$n_{2,1} = \frac{\frac{C}{n_1}}{\frac{C}{n_2}} = \frac{n_2}{n_1}$$

Un índice de refracción relativo  $n_{1,2}$  menor que 1 indica que, en el segundo medio, la luz se mueve más rápidamente que en el primero.

**El índice de refracción del aire se puede tomar como 1 ya que la velocidad de la luz en el aire es aproximadamente igual que en el vacío.**

**Medios Isótropos:** tienen igual índice de refracción en todas las direcciones.

**Medios Anisótropos:** tienen diferente índice de refracción según la dirección que se tome.

**Índice de refracción de algunos líquidos a 20 °C**

Sustancia	n
Aire	1,000
Agua (15° C)	1,3334
Agua (20° C)	1,3329
Aceite	1,450
Aceite de cedro	1,515
Acetona	1,359
Alcohol etílico	1,361
Alcohol metílico	1,329
Benceno	1,501
Bromo	1,654
Cloroformo	1,446
Glicerina	1,494

**Índice de refracción de algunos sólidos**

Sustancia	n
Hielo	1,32
Ámbar	1,546
Ácido Bórico	1,463
Alcanfor	1,532
Bálsamo	1,530
Diamante	2,417
Vidrio de cuarzo	1,46
Vidrio para botellas	1,52
Cuarzo	1,54
Zafiro, rubí (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1,767
Circón (ZrO <sub>2</sub> . SiO <sub>2</sub> )	1,923
Nailon 66	1,53

En base al análisis del índice de refracción se puede considerar que la velocidad de la luz en el aire es igual a la velocidad de la luz que en el vacío.

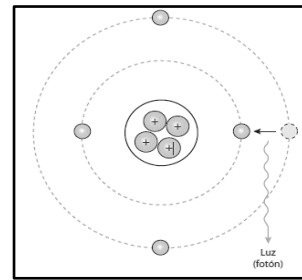
**FUENTES LUMINOSAS Y CUERPOS ILUMINADOS**

**FUENTES LUMINOSAS**

Los cuerpos que emiten luz se denominan fuentes de luz o cuerpos luminosos. Las fuentes de luz pueden ser naturales, como el Sol y las estrellas, y artificiales, como las velas y lámparas.

La luz la producen los átomos en las sucesivas excitaciones y des excitaciones de sus electrones. El átomo lo forma un núcleo rodeado de electrones que giran en diferentes órbitas. Algunos electrones dentro del átomo están más lejos del núcleo que otros y, por tanto, tienen una mayor energía eléctrica potencial. Se dice, entonces, que los electrones de órbitas exteriores tienen un grado de energía mayor que los demás. Suele decirse que el átomo está excitado cuando se le inyecta energía a un electrón, el cual se aleja del núcleo y se dirige a una órbita más alejada.

El átomo excitado busca volver a su estado natural regresando el electrón a la órbita que le corresponde. En este proceso, denominado des excitación, el electrón libera su energía almacenada en forma de fotón, es decir, emite luz.

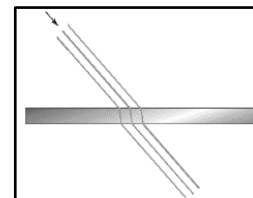


**CUERPOS ILUMINADOS**

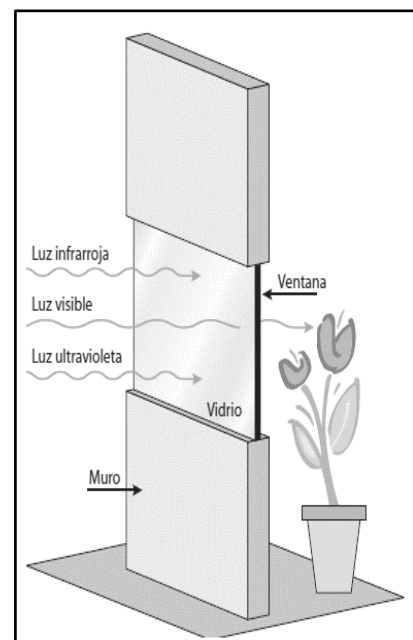
La mayor parte de los cuerpos no emite luz, sino que éstos se iluminan para que podamos verlos. Los cuerpos iluminados se dividen en transparentes, traslúcidos y opacos.

**Cuerpos transparentes**

El vidrio y el aire son ejemplo de materiales transparentes. Éstos permiten ver perfectamente bien lo que hay detrás, es decir, dejan pasar la mayor parte de la luz.



La frecuencia de la luz visible que incide en el vidrio o en el acrílico es de igual frecuencia de la luz que emerge de ellos. Lo que varía es la velocidad con que viaja la luz en dichos materiales, un poco menor que en el aire o el vacío.

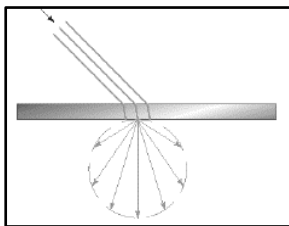


Sin embargo, el vidrio no es transparente a las luces infrarrojas y ultravioletas. El aire de la atmósfera es transparente a la luz visible, pero, por fortuna para la mayoría de los seres vivos de la Tierra, es opaco para la luz ultravioleta de alta frecuencia.

El vidrio absorbe las luces infrarrojas y ultravioleta, razón por la cual se calienta

### Cuerpos translúcidos

El vidrio esmerilado y el papel Contac son materiales translúcidos, ya que no impiden el paso de la luz, pero no permiten ver con claridad los objetos ubicados detrás, pues sólo permiten ver su silueta. Este tipo de materiales se utilizan en las oficinas y los baños.



### Cuerpos opacos

Un muro de tabique o madera impide ver lo que hay detrás, aunque se ilumine el muro o los objetos que hay del otro lado. Los materiales opacos bloquean el paso de la luz, la absorben o la reflejan. El hecho de que un cuerpo opaco, como una manzana, se vea de color rojo se debe a que refleja la luz roja y absorbe todas las luces de otros colores.

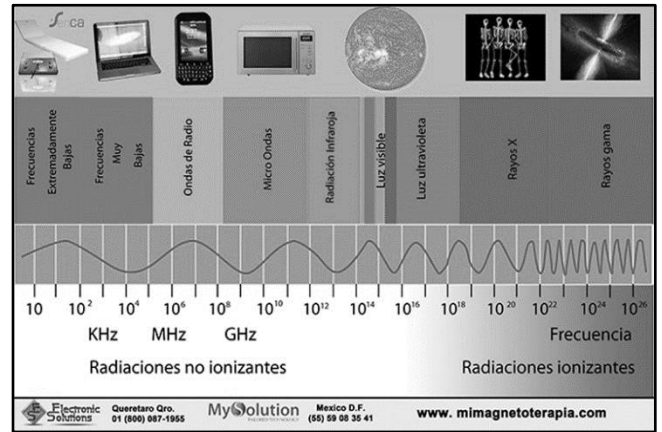
### ESPECTRO ELECTROMAGNETICO

Una onda electromagnética constituye la energía emitida por los electrones que vibran en el interior de los átomos y es parcialmente eléctrica y magnética. Estas ondas son de diferente longitud de onda y en conjunto reciben el nombre de espectro electromagnético.

El ojo humano percibe una pequeñísima parte denominada luz visible cuyo rango de longitud de onda está entre 3 800 Å ( luz violeta) y 7600 Å (luz roja) y el rango de frecuencia está entre  $7,9 \times 10^{14}$  Hz (luz violeta o ultravioleta) y  $3,9 \times 10^{14}$  Hz (luz roja o infrarroja).

Así tenemos:

- **Ondas de radio:** son las utilizadas en telecomunicaciones e incluyen las ondas de radio y televisión. Su frecuencia oscila desde unos pocos hercios hasta mil millones de hercios. Se originan en la oscilación de la carga eléctrica en las antenas emisoras (dipolos radiantes).



- **Microondas:** Se utilizan en las comunicaciones del radar o la banda UHF (Ultra High Frequency) y en los hornos de las cocinas. Su frecuencia va desde los mil millones de hercios hasta casi el billón. Se producen en oscilaciones dentro de un aparato llamado magnetrón. El magnetrón es una cavidad resonante formada por dos imanes de disco en los extremos, donde los electrones emitidos por un cátodo son acelerados originando los campos electromagnéticos oscilantes de la frecuencia de microondas.
- **Infrarrojos:** Son emitidos por los cuerpos calientes. Los tránsitos energéticos implicados en rotaciones y vibraciones de las moléculas caen dentro de este rango de frecuencias. Los visores nocturnos detectan la radiación emitida por los cuerpos a una temperatura de  $37^\circ$ . Sus frecuencias van desde  $10^{11}$  Hz a  $4 \times 10^{14}$  Hz. Nuestra piel también detecta el calor y por lo tanto las radiaciones infrarrojas.
- **Luz visible:** Incluye una franja estrecha de frecuencias, los humanos tenemos unos sensores para detectarla (los ojos, retina, conos y bastones). Se originan en la aceleración de los electrones en los tránsitos energéticos entre órbitas permitidas. Entre  $4 \times 10^{14}$  Hz y  $8 \times 10^{14}$  Hz.
- **Ultravioleta:** Comprende de  $8 \times 10^{14}$  Hz a  $1 \times 10^{17}$  Hz. Son producidas por saltos de electrones en átomos y moléculas excitados. Tiene el rango de energía que interviene en las reacciones químicas. El sol es una fuente poderosa de UVA (rayos ultravioletas) los cuales al interactuar con la atmósfera exterior la ionizan creando la ionosfera. Los ultravioleta pueden destruir la vida y se emplean para esterilizar. Nuestra piel detecta la radiación ultravioleta y nuestro organismo se pone a fabricar melanina para protegernos de la radiación. La capa de ozono nos protege de los UVA.



- **Rayos X:** Son producidos por electrones que saltan de órbitas internas en átomos pesados. Sus frecuencias van de  $1,1 \times 10^{17} \text{ Hz}$  a  $1,1 \times 10^{19} \text{ Hz}$ . Son peligrosos para la vida: una exposición prolongada produce cáncer.
- **Rayos gamma:** comprenden frecuencias mayores de  $1 \times 10^{19} \text{ Hz}$ . Se origina en los procesos de estabilización en el núcleo del átomo después de emisiones radiactivas. Su radiación es muy peligrosa para los seres vivos.

## FOTOMETRIA

La fotometría es la ciencia que se encarga de la medida de la luz, como el brillo percibido por el ojo humano. Es decir, estudia la capacidad que tiene la radiación electromagnética de estimular el sistema visual. No debe confundirse con la Radiometría, encargada de la medida de la luz en términos de potencia absoluta.

El ojo humano no tiene la misma sensibilidad para todas las longitudes de onda que forman el espectro visible. La Fotometría introduce este hecho ponderando las diferentes magnitudes radiométricas medidas para cada longitud de onda por un factor que representa la sensibilidad del ojo para esa longitud.

La luz, al igual que las ondas de radio, los rayos X o los gamma es una forma de energía, que se mide en Joules (J) en el Sistema Internacional. No toda la luz emitida por una fuente llega al ojo y produce sensación luminosa, ni toda la energía que consume, por ejemplo, una bombilla se convierte en luz, razón por la cual se define las siguientes magnitudes: el flujo luminoso, la intensidad luminosa, la iluminancia, la luminancia, el rendimiento o eficiencia luminosa y la cantidad de luz.

La siguiente tabla recoge las principales magnitudes fotométricas y su unidad de medida:

### Unidades de fotometría del Sistema Internacional

Magnitud	Símbolo	Unidad	Símbolo
Energía luminica	$Q_v$	lumen segundo	lm·s
Flujo luminoso	$\Phi_v, F$	lumen (= cd·sr)	lm
Intensidad luminosa	$I_v$	candela (= lm/sr)	cd
Luminancia	$L_v$	candela por metro cuadrado	cd/m <sup>2</sup>
Iluminancia	$E_v$	lux (= lm/m <sup>2</sup> )	lx
Emitancia luminosa	$M_v$	lux (= lm/m <sup>2</sup> )	lx
Exposición luminosa	$H_v$	lux segundo	lx·s
Eficacia luminosa de la radiación	$K$	lumen por vatio	lm/W
Eficacia luminosa de una fuente	$\eta$	lumen por vatio	lm/W

## FLUJO LUMINOSO ( F o L )

La mayoría de las fuentes de luz emiten energía electromagnética distribuida en múltiples longitudes de onda. Se suministra energía eléctrica a una lámpara, la cual emite radiación.

Esta energía radiante emitida por la lámpara por unidad de tiempo se llama potencia radiante o *flujo radiante*. Solo una pequeña porción de esta potencia radiante se encuentra en la región visible: en la región entre 400 y 700 nm y se llama *flujo luminoso*. El sentido de la vista depende tan solo de la energía radiada visible o *luminosa*, por unidad de tiempo.

El *flujo luminoso* es la parte de la potencia radiante total emitida por una fuente de luz, que es capaz de afectar el sentido de la vista, también se la considera como la potencia (W) emitida en forma de radiación luminosa a la que el ojo humano es sensible.

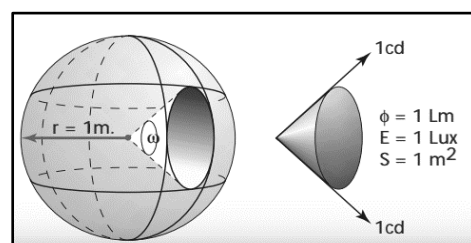
Debido a que la percepción y la sensibilidad visual de los colores, varían de uno a otro individuo, es así como una lámpara de luz verde de 40 W se ve más brillante que una lámpara de luz azul de 40 W. También se puede dos bombillas, una de 25 W y otra de 60 W. Está claro que la de 60 W dará una luz más intensa.

Cuando hablamos de 25 W o 60 W nos referimos sólo a la potencia consumida por la bombilla de la cual solo una parte se convierte en luz visible, es el llamado flujo luminoso. Podríamos medirlo en watts (W), pero parece más sencillo definir una nueva unidad, el lumen, que tome como referencia la radiación visible. Empíricamente se demuestra que a una radiación de 555 nm de 1 W de potencia emitida por un cuerpo negro le corresponden 683 lumen.

$$1 \text{ watt-luz a } 555 \text{ nm} = 683 \text{ lm}$$

Para definir el flujo luminoso en términos de una fuente estándar y un ángulo sólido, se necesita al estereorradián (sr) que constituye el ángulo sólido ( $\Omega$ ), que corresponde a un casquete esférico cuya superficie ( $A$ ) es igual al cuadrado del radio de la esfera ( $R^2$ )

$$\Omega = \frac{A}{R^2} = \text{sr}$$



La unidad que mide el flujo luminoso se llama *lumen* (lm) y es el flujo luminoso (o potencia radiante visible) emitida desde una abertura de  $\frac{1}{60}$  cm<sup>2</sup> de una fuente patrón incluido dentro de un ángulo sólido de 1sr.

$$\text{lumen} = \text{lm} = \text{cd} \cdot \text{sr}$$

**INTENSIDAD LUMINOSA ( I )**

La luz viaja radialmente hacia afuera en líneas rectas desde una fuente que es pequeña en comparación con sus alrededores. Para una fuente de luz de ese tipo, el flujo luminoso incluido en un ángulo sólido  $\Omega$  permanece igual a cualquier distancia de la fuente. Por tanto, con frecuencia es más útil hablar del *flujo por unidad de ángulo sólido* que hablar simplemente del flujo total. La cantidad física que expresa esta relación se llama *intensidad luminosa*.

El flujo luminoso nos da una idea de la cantidad de luz que emite una fuente de luz, por ejemplo, una bombilla, en todas las direcciones del espacio. Lo contrario, si pensamos en un proyector es fácil ver que sólo ilumina en una dirección, es decir que se necesita conocer cómo se distribuye el flujo en cada dirección del espacio y para eso se define la intensidad luminosa.

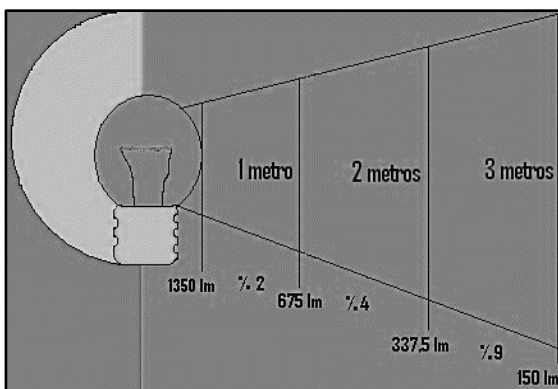
La intensidad luminosa **I** de una fuente de luz es el flujo luminoso (F) emitido por unidad de ángulo sólido ( $\Omega$ ).

$$I = \frac{F}{\Omega}$$

La unidad de intensidad luminosa es la candela (cd) y está dada por el *lumen sobre el estereorradián* ( $\text{cd} = \frac{\text{lm}}{\text{sr}}$ ), en ocasiones también se lo llaman *bujía*.

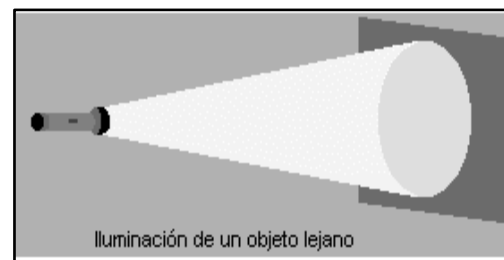
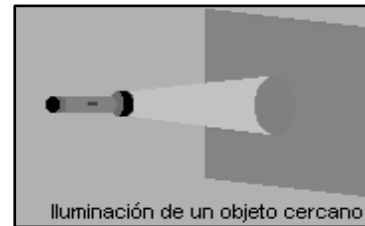
Se denomina *fuentes isotrópica* a aquella que emite luz de manera uniforme en todas direcciones.

Por ejemplo, si la intensidad luminosa de una fuente de luz es *1 candela* (1 lm/sr), el flujo luminoso que sale de la fuente sería *477 lúmenes*.



**ILUMINANCIA o ILUMINACIÓN (E)**

Si se pone la mano delante de una linterna se puede ver cómo está fuertemente iluminada por un círculo pequeño y si se ilumina una pared lejana el círculo es grande y la luz débil. Esta sencilla experiencia recoge muy bien el concepto de iluminancia.



Es la cantidad de flujo luminoso que incide sobre una superficie por unidad de área.

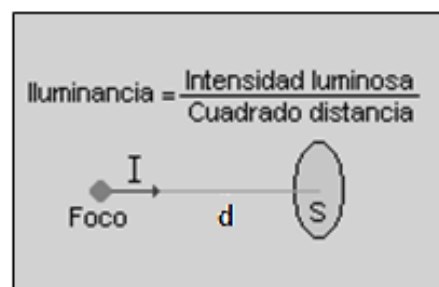
Su símbolo es E y su unidad el lux (lx)

$$1 \text{ lx} = 1 \frac{\text{lm}}{\text{m}^2}$$

**LEY DE LA ILUMINACIÓN**

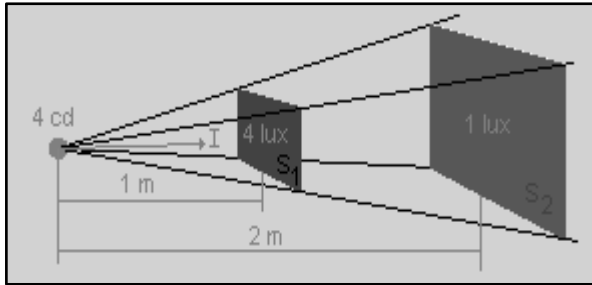
En el ejemplo de la linterna ya se observó que la iluminancia depende de la distancia del foco al objeto iluminado. Es algo similar a lo que ocurre cuando oímos alejarse a un coche; al principio se oye alto y claro, pero después va disminuyendo hasta perderse. Lo que ocurre con la iluminancia se conoce por la ley inversa de los cuadrados:

La iluminación ( E ) recibida sobre una superficie es directamente proporcional a la Intensidad Luminosa e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia a la que se encuentra la fuente luminosa ( d<sup>2</sup> ).

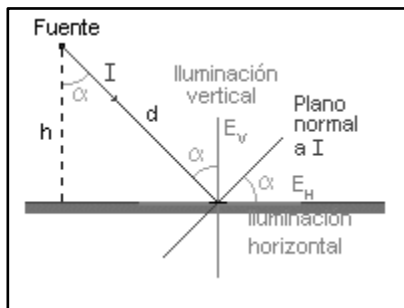


Esta ley solo es válida si la dirección del rayo de luz incidente es perpendicular a la superficie.

$$E = \frac{I}{d^2}$$



Cuando el rayo no es perpendicular a la superficie, hay que descomponer la iluminancia recibida en una componente horizontal y en otra vertical.



$$E_H = \frac{I \cos \alpha}{d^2}$$

$$E_V = \frac{I \sin \alpha}{d^2}$$

$$\frac{E_H}{E_V} = \tan \alpha$$

A la componente horizontal de la iluminancia ( $E_H$ ) se le conoce como la ley del coseno. Es fácil ver que si  $\alpha = 0$  nos queda la ley inversa de los cuadrados. Si expresamos  $E_H$  y  $E_V$  en función de la distancia del foco a la superficie ( $h$ ) nos queda:

$$E_H = \frac{I \cos^3 \alpha}{h^2}$$

$$E_V = \frac{I \cos^2 \alpha \cdot \sin \alpha}{h^2}$$

$$E = \sqrt{E_H^2 + E_V^2}$$

En general, si un punto está iluminado por más de una lámpara su iluminancia total es la suma de las iluminancias recibidas:

$$E_H = \sum_{i=1}^n \frac{I_i \cos^3 \alpha_i}{h_i^2}$$

$$E_V = \sum_{i=1}^n \frac{I_i \cos^2 \alpha_i \cdot \sin \alpha_i}{h_i^2}$$

A partir de este análisis se define:

$$F = \frac{I}{A} ; F = \frac{I}{A \cos \alpha} ; [F] = \left[ \frac{cd}{m^2} = lm \right]$$

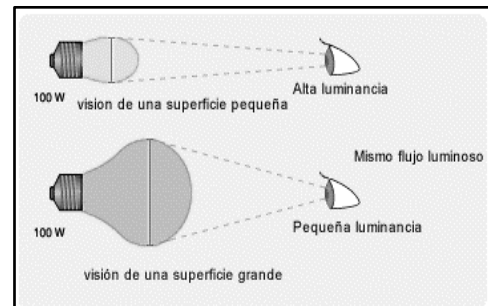
Donde: E: (iluminación lx)  
I: (intensidad luminosa cd)  
d: (distancia m)  
F: (flujo luminoso lm)  
A: (área m<sup>2</sup>)

### LUMINANCIA ( L )

Se llama luminancia a la relación entre la intensidad luminosa y la superficie aparente vista por el ojo en una dirección determinada. Su símbolo es L y su unidad es la cd/m<sup>2</sup>. También es posible encontrar otras unidades como el stilb (1 sb = 1 cd/cm<sup>2</sup>) o el nit (1 nt = 1 cd/m<sup>2</sup>).

$$L = \frac{I}{A_{aparente}} ; L = \frac{I}{A \cos \alpha} ; [L] = \left[ \frac{cd}{m^2} \right]$$

La Luminancia L también se la puede considerar como la impresión de claridad que un observador tiene del brillo que desprende una fuente de luz o una superficie iluminada. El ojo puede distinguir muy bien entre diferentes valores de luminancia:



Fuente de luz	Luminancia media (cd/m <sup>2</sup> )
Lámpara de xenón de arco corto	200.000 - 5.000.000.000
Sol	1.600.000.000
Lámpara halogenuros metálicos	10.000.000 - 60.000.000
Lámpara incandescente	2.000.000 - 26.000.000
Lámpara fluorescente compacta	20.000 - 70.000
Lámpara fluorescente	5.000 - 30.000
Nubes iluminadas por el sol	10.000

Fuente de luz	Luminancia media (cd/m <sup>2</sup> )
Candela	7.500
Cielo azul	5.000
Luminaria especular louvre	100
Valores habituales en iluminación interior	50 - 500
Papel blanco a 500 lx	100
Papel blanco a 5 lx	1

**EJERCICIOS RESUELTOS**

1. Determinar la iluminación que produce una lámpara eléctrica de 300 cd a una distancia de 2,5 m.

Se sabe que:

$$I = 300 \text{ cd}$$

$$d = 2,5 \text{ m}$$

Se debe determinar E

$$E = \frac{I}{d^2}; E = \frac{300 \text{ cd}}{(2,5\text{m})^2}$$

$$E = 48 \text{ lx o}; E = 48 \frac{\text{lumenes}}{\text{m}^2}$$

2. Determinar la distancia a la cual se encuentra una superficie de una fuente de luz que emite una intensidad luminosa de 200 cd, si la superficie recibe una iluminancia de 80 lx.

Se sabe que:

$$I = 200 \text{ cd}$$

$$E = 80 \frac{\text{lumenes}}{\text{m}^2}$$

Se debe encontrar d:

$$E = \frac{I}{d^2}; d = \sqrt{\frac{I}{E}}; d = \sqrt{\frac{200 \text{ cd}}{80 \text{ lx}}}$$

$$d = 1,58 \text{ m}$$

3. La iluminación de una lámpara de alumbrado público es de 4lx a una distancia de 1m y alumbrada una superficie de 2m<sup>2</sup> Determinar el flujo luminoso de esa lámpara.

Se sabe que:

$$E = 4 \text{ lx}$$

$$d = 1 \text{ m}$$

$$A = 2\text{m}^2$$

Se debe determinar F:

$$E = \frac{I}{d^2} \quad I = E \cdot d^2$$

$$I = 4 \text{ lx} \cdot (1\text{m})^2; \quad I = 4 \text{ cd}$$

$$F = \frac{I}{A}; \quad F = \frac{4\text{cd}}{2 \text{ m}^2}; \quad F = 2 \text{ lm}$$

4. Para el caso del problema anterior, si un niño observa la superficie iluminada con un ángulo de 70°. Determinar el flujo luminoso que el niño aprecia.

Se sabe que:

$$A = 70^\circ$$

Para determinar F:

$$F = \frac{I}{A \cos \alpha}; F = \frac{4 \text{ cd}}{2 \text{ m}^2 \cdot \cos 70^\circ}; F = 5,85 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$$

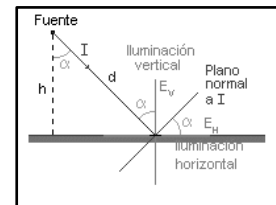
5. Una superficie está iluminada por un foco puntual de 70 cd de intensidad constante en todas direcciones situadas a 3 m de altura. Determinar la iluminancia horizontal y vertical para los valores de alfa: 0°; 30°; 75°

Se determina que:

$$I = 70 \text{ cd}$$

$$h = 3 \text{ m}$$

$$\alpha = 0^\circ; 30^\circ; 75^\circ$$



Por lo tanto:

Para  $\alpha = 0^\circ$

$$E_H = \frac{I \cos^3 \alpha}{h^2}; E_H = \frac{70 \cos^3 0}{3^2}; E_H = 7,78 \text{ lx}$$

$$E_V = \frac{I \cos^2 \alpha \cdot \text{sen } \alpha}{h^2}; E_V = \frac{70 \cos^2 0 \cdot \text{sen } 0}{3^2}; E_V = 0 \text{ lx}$$

$$E = \sqrt{E_H^2 + E_V^2}; E = \sqrt{7,79^2 + 0^2}; E = 7,78 \text{ lx}$$

Para  $\alpha = 30^\circ$

$$E_H = \frac{I \cos^3 \alpha}{h^2}; E_H = \frac{70 \cos^3 30}{3^2}; E_H = 5,05 \text{ lx}$$

$$E_V = \frac{I \cos^2 \alpha \cdot \text{sen } \alpha}{h^2}; E_V = \frac{70 \cos^2 30 \cdot \text{sen } 30}{3^2}; E_V = 2,92 \text{ lx}$$

$$E = \sqrt{E_H^2 + E_V^2}; E = \sqrt{5,05^2 + 2,92^2}; E = 5,83 \text{ lx}$$

Para  $\alpha = 75^\circ$

$$E_H = \frac{I \cos^3 \alpha}{h^2}; E_H = \frac{70 \cos^3 75}{3^2}; E_H = 0,002 \text{ lx}$$

$$E_V = \frac{I \cos^2 \alpha \cdot \text{sen } \alpha}{h^2}; E_V = \frac{70 \cos^2 75 \cdot \text{sen } 75}{3^2}; E_V = 0,50 \text{ lx}$$

$$E = \sqrt{E_H^2 + E_V^2}; E = \sqrt{0,002^2 + 0,50^2}; E = 0,50 \text{ lx}$$

Si representamos el diagrama *isolux* de la superficie podemos observar que las curvas son circunferencias, debido a que la intensidad es constante en todas direcciones, que la iluminancia disminuye a medida que los puntos se alejan del foco y que la máxima iluminancia se encuentra en la proyección de la fuente sobre la superficie ( $0^\circ$ ).



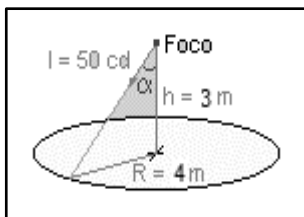
6. Una superficie circular de 4 m de radio esta iluminada por un foco de 50 cd de intensidad constante en todas direcciones situada a 3 m de altura sobre centro de la plataforma. Determinar la iluminancia máxima y mínima sobre la superficie.

Se conoce que:

$$R = 4 \text{ m}$$

$$I = 50 \text{ cd}$$

$$h = 3 \text{ m}$$



Se debe determinar la iluminancia sobre la superficie, es decir, la iluminancia horizontal. Como la intensidad es constante en todas direcciones y la altura también el valor de la iluminancia dependerá únicamente de la distancia de los puntos al foco. En este caso el punto más próximo es la proyección de la bombilla sobre la superficie ( $\alpha = 0^\circ$ ) y los más alejados son aquellos que están en los bordes ( $R = 4 \text{ m}$ ).

Para la iluminancia máxima:  $\alpha = 0^\circ$

$$E_{\max} = \frac{I \cos^3 \alpha}{h^2}; E_{\max} = \frac{50 \cos^3 0}{3^2}; E_{\max} = 5,56 \text{ lx}$$

Para la iluminancia mínima:  $R = 4 \text{ m}$

$$\tan \alpha = \frac{R}{h}; \tan \alpha = \frac{4}{3}; \alpha = 53,13^\circ$$

$$E_{\max} = \frac{I \cos^3 \alpha}{h^2}; E_{\max} = \frac{50 \cos^3 53,13}{3^2}; E_{\max} = 1,20 \text{ lx}$$

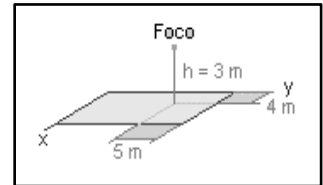
### EJERCICIOS PARA LA TAREA

1. Determinar la iluminación que produce una lámpara eléctrica de 550 cd a una distancia de 5 m. R: 22lm

2. Calcular la intensidad luminosa de un foco que produce una iluminación de 36,6 lx a 1,5 m de la fuente. R: 82cd

3. Determinar la distancia a la que debe colocarse una lámpara de 200 cd sobre una mesa para que produzca una iluminación de 50 lx. R: 2m

4. Una fuente luminosa puntual de 100 cd de intensidad constante en todas direcciones situada sobre una plataforma rectangular de 20x10 m. Determinar la iluminancia máxima y mínima sobre la superficie y la iluminancia en los puntos: (3, 10), (0, 15), (7, 20) y (10, 15).



5. Un proyector de luz está equipado con una lámpara de 40 cd que concentra un haz de luz sobre una pared vertical. El haz cubre un área de 9 m<sup>2</sup> de la pared. Si el proyector está situado a 20 m de la pared. Determine la intensidad luminosa del proyector.

6. Una célula foto eléctrica recibe del sol una iluminancia de 10<sup>5</sup> lx. Determinar la intensidad luminosa del sol.