



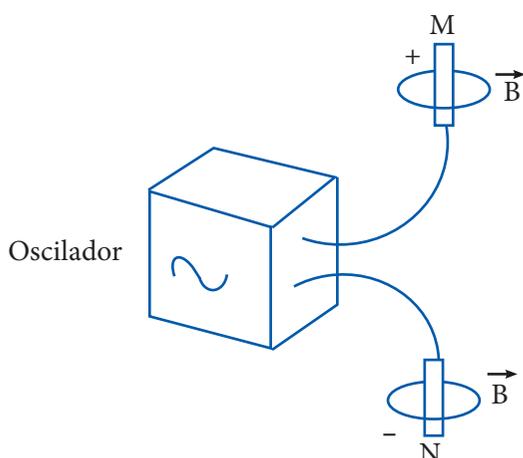
# Materiales Educativos GRATIS

## FISICA

## QUINTO

# ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Consideramos una simple antena formada por dos barras metálicas M y N conectadas, como indica la figura, a un oscilador de alta frecuencia. Como el circuito está abierto, la corriente fluirá solo un instante, hasta que las dos barras quedan cargadas. Cada vez que se invierte la polaridad se produce un breve flujo de corriente en dirección opuesta. Este dispositivo es un dipolo oscilante con cargas opuestas en sus extremos que cambian continuamente de signo con la misma frecuencia que el oscilador al cual está conectado.



Las cargas eléctricas aceleradas producen alrededor de la barra un campo magnético variable. Pero, como sabemos, un campo magnético variable produce un campo eléctrico capaz de inducir corrientes en los conductores. Desde finales del siglo XVIII diversos científicos formularon leyes cuantitativas que relacionaban las interacciones entre los campos eléctricos, los campos magnéticos y las corrientes sobre conductores. Entre estas leyes están la ley de Ampere, la ley de Faraday o la ley de Lenz. Fue el físico británico James Clerk Maxwell quien, en su publicación de 1865, *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field* lograría unificar todas estas leyes en una descripción coherente del campo electromagnético. Investigando estas relaciones entre campos magnéticos y eléctricos, llegó a la conclusión de que un campo eléctrico variable, incluso en el

espacio donde no hay corrientes de conducción, produce un campo magnético oscilante.

De este modo, alrededor del dipolo, el campo eléctrico alterno produce un campo magnético oscilante, el cual da origen a un campo eléctrico variable, etc. La asociación de un campo oscilante, es la condición necesaria para que se engendren ondas electromagnéticas capaces de propagarse por el espacio libre. El dipolo oscilante irradia energía en forma de ondas electromagnéticas. En todo punto, del espacio que recibe la radiación hay un campo eléctrico y otro magnético perpendiculares entre sí y en ángulo recto con la dirección de propagación.

La radiación es transversal. En el caso del dipolo oscilante, el vector del campo eléctrico radiado está siempre en el mismo plano que el eje del dipolo y la radiación se dice que está polarizada en el plano. Se verifica que en el vacío la velocidad de propagación está dada por:

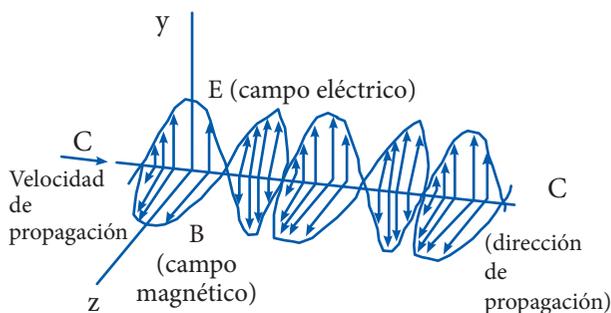
$$C = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

c: rapidez de la luz en el vacío

La ecuación de la onda puede ser representada como:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cdot \text{Sen}2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \text{ o también}$$

$$\vec{B} = \vec{B}_0 \text{ Sen}2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$$



En una onda electromagnética plana, las magnitudes del campo eléctrico y magnético están relacionadas por:

$$E = C \cdot B$$

De donde se concluye que los campos oscilan en fase, es decir cuando uno de ellos es máximo el otro también se hace máximo.

### Energía de una onda electromagnética

En una onda electromagnética, al igual que en una onda elástica, lo que se propaga es la energía del campo electromagnético. Puede demostrarse que la energía que pasa, en la unidad de tiempo, a través de la unidad de área dispuesta perpendicularmente a la dirección de propagación, o sea, la intensidad de la onda electromagnética, es:

$$I = \epsilon_0 EB = \epsilon_0 \left( \frac{E}{C} \right) \cdot E = \epsilon_0 E^2 / c$$

Expresada en W/m<sup>2</sup>

A continuación se muestra para comparación las analogías y diferencias que existen entre las ondas mecánicas y las electromagnéticas.

### Analogías y diferencias entre las ondas mecánicas y las electromagnéticas

#### Ondas mecánicas

Pueden ser longitudinales (por ejemplo ondas del sonido) y transversales (ondas en una cuerda).

Se propagan con una velocidad que depende del tipo de onda y de la densidad del medio.

Se propagan necesariamente en un medio material.

Se caracterizan por la variación regular de una sola magnitud, que puede ser por ejemplo, la amplitud de las partículas vibrantes (ondas en una cuerda) o la densidad del medio (ondas sonoras).

Transportan energía y cantidad de movimiento.

Se reflejan, se refractan y presentan fenómenos de difracción o interferencia.

#### Ondas electromagnéticas

Son siempre transversales.

Se propagan siempre con la velocidad de la luz.

Se propagan a través del vacío.

Se caracterizan por la variación regular de dos magnitudes, el campo eléctrico y el campo magnético.

Transportan energía y cantidad de movimiento.

Se reflejan, se refractan y presentan fenómenos de difracción e interferencia.

### El espectro de la radiación electromagnética

Las ondas de las diversas regiones del espectro electromagnético poseen propiedades semejantes, pero diferentes en longitud de onda, frecuencia y método de producción. En la figura se resumen las distintas radiaciones del espectro y los intervalos de frecuencia y longitud de onda que les corresponde. La frecuencia superior 10<sup>21</sup> Hz (longitud de onda 10<sup>-13</sup> m), corresponden a los rayos gamma más energéticos, y la inferior 10<sup>4</sup> Hz (longitud de onda 10<sup>4</sup> m) a las ondas de la radio de muy baja frecuencia.

Las ondas de la radio se engendran por medio de circuitos eléctricos oscilantes. Según su frecuencia, se clasifican en radiofrecuencia (RF) y microondas. Entre las primeras están las ondas ordinarias de la radio, FM, televisión (VHF y UHF) radiotelefonía, etc. Entre las microondas están las ondas de radar.

Para engendrar radiaciones con frecuencia superior a la región de microondas no son útiles los métodos electrónicos, empleándose en su lugar radiaciones atómicas. En el intervalo de frecuencia comprendido entre las microondas y la radiación visible están los rayos infrarrojos o radiación térmica.

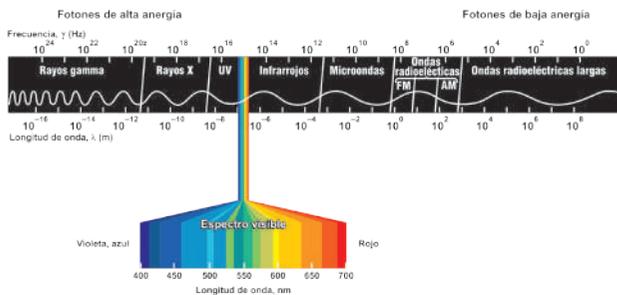
La luz visible es radiación electromagnética en el intervalo de frecuencia de 4 × 10<sup>14</sup> Hz a 7.5 × 10<sup>14</sup> Hz, correspondiente a longitud de onda comprendidas entre 750 y 400 nm (1 nm = 10<sup>-9</sup> m). A frecuencia todavía mayores está la radiación ultravioleta (8 × 10<sup>14</sup> a 3 × 10<sup>17</sup> Hz).

Estas ondas son producidas artificialmente por medio de descargas eléctricas en los átomos y moléculas. El sol es una fuente poderosa de radiación ultravioleta que interacciona con los átomos de la atmósfera superior, produciendo un gran número de iones. Por esta razón se denomina ionosfera.

Los rayos X se entienden en el intervalo de frecuencia 3 × 10<sup>17</sup> a 5 × 10<sup>19</sup> Hz. Se producen en las capas más internas de los átomos. Por último, los rayos gamma ocupan la zona del espectro electromagnético de mayor frecuencia y son de origen nuclear.

La relación entre longitudes de onda, λ y frecuencia del espectro, f, viene dada por la ecuación λ = c/f, en donde c es la velocidad de la luz en el vacío. Así, por ejemplo, la longitud de onda de las ondas de radio transmitidas por una estación que opera a una frecuencia de 600 kHz (6 × 10<sup>5</sup> s<sup>-1</sup>) es:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{6 \times 10^5 \text{ s}^{-1}} = 500 \text{ mm}$$



## Espectro visible

Estas ondas constituyen lo que llaman luz, y se producen como resultado de ciertos ajustes internos en el movimiento de los electrones en átomos y moléculas. Según su longitud de onda o frecuencia, la luz produce en nuestra retina diferentes sensaciones, que llamamos colores.

En la tabla 2 se indica la relación entre el color, la longitud de onda y la frecuencia de la luz.

Debido a la relación entre el color y la longitud de onda o la frecuencia, una onda luminosa de longitud o frecuencia bien definida se llama *monocromática* (MONO: uno; CROMO: color).

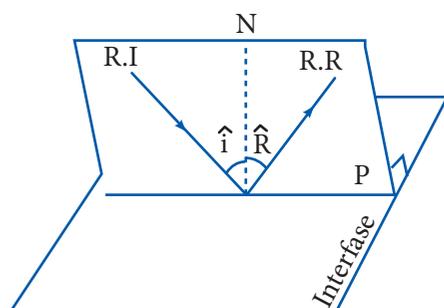
Tabla 2

Color	$\lambda_{(m)}$	$f_{(Hz)}$
Violeta	$3.90 - 4.55 \times 10^{-7}$	$7.70 - 6.59 \times 10^{14}$
Azul	$4.55 - 4.92 \times 10^{-7}$	$6.59 - 6.10 \times 10^{14}$
Verde	$4.92 - 5.77 \times 10^{-7}$	$6.10 - 5.20 \times 10^{14}$
Amarillo	$5.77 - 5.97 \times 10^{-7}$	$5.20 - 5.06 \times 10^{14}$
Naranja	$5.98 - 6.22 \times 10^{-7}$	$5.03 - 4.82 \times 10^{14}$
Rojo	$6.22 - 7.80 \times 10^{-7}$	$4.82 - 3.84 \times 10^{14}$

La luz en medios homogéneos se propaga rectilíneamente, por lo tanto podemos utilizar el concepto de rayo luminoso, que nos indicará la dirección de propagación de la luz.

## Reflexión de la luz

Es el cambio de dirección que experimenta la luz al incidir sobre un medio que nos permite su propagación (rebote).



- $R_i$  = rayo incidente
- $R_r$  = rayo reflejado
- $N$  = recta normal a la superficie
- $\hat{i}$  = ángulo de incidencia
- $\hat{r}$  = ángulo de reflexión
- $P$  = plano de incidencia

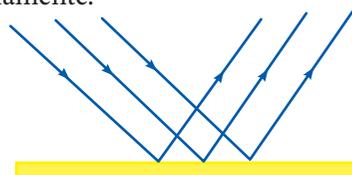
## Leyes

1. El rayo incidente, la normal y el rayo reflejado son siempre coplanares.
2.  $\hat{i} = \hat{r}$

## Tipos de reflexión

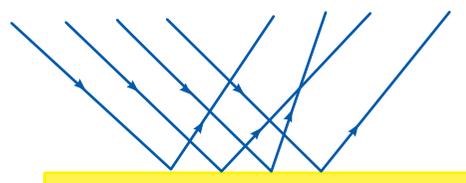
### 1. Reflexión regular o especular

Este tipo de reflexión se presenta en superficies pulimentadas, verificándose que los rayos de luz que inciden paralelamente se reflejarán también paralelamente.



### 2. Reflexión irregular o difusa

Se presenta en superficies rugosas, verificándose que rayos de luz que inciden paralelamente se reflejarán en direcciones arbitrarias.



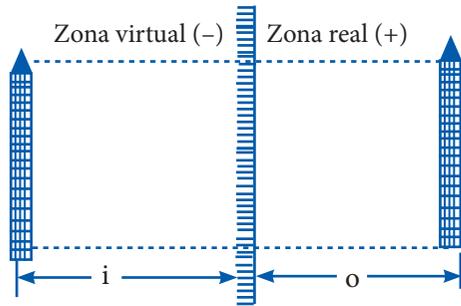
## Espejo

Son superficies altamente pulimentadas, en las cuales existe reflexión regular.

### Espejo plano

Son superficies planas, pulimentadas donde en base a las leyes de la reflexión se obtienen imágenes que cumplen las siguientes características:

- a) El tamaño de la imagen (I) es siempre igual al tamaño del objeto (O).
- b) La ubicación del objeto y su imagen es siempre simétrica al espejo ( $\sigma = -i$ ).
- c) La imagen es virtual y derecha.



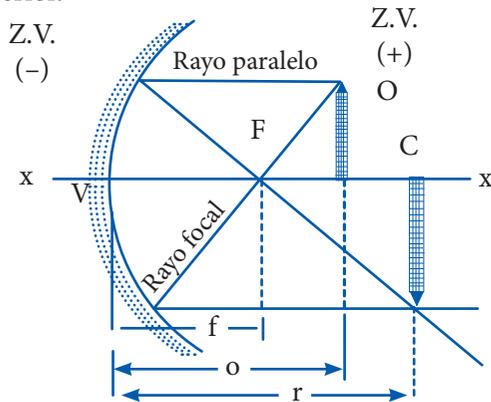
### Espejos esféricos

Son casquetes de esfera pequeños con una abertura angular menor o igual a  $5^\circ$  tal que una de sus caras está pulimentada, y permite obtener imágenes reales o virtuales.

### Tipos de espejos esféricos

#### 1. Espejo cóncavo

Son aquellos cuya cara pulimentada está en el interior.



C = centro de curvatura

F = foco

V = vértice

xx = eje principal

$\sigma$  = distancia del objeto

i = distancia imagen

$f = \overline{VF}$  = distancia focal

$$f = R/2$$

R = radio de curvatura

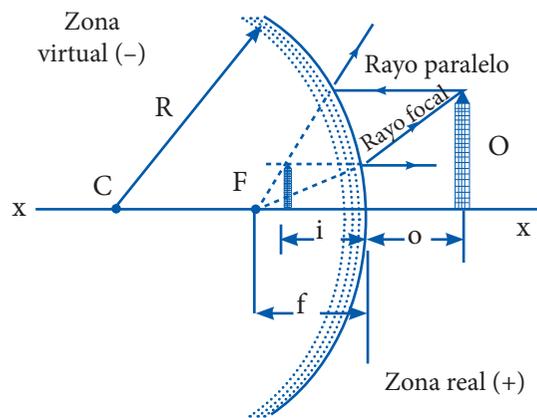
#### Características

- Quando el objeto se ubica entre V y F, la imagen es virtual, derecha y de mayor tamaño que el objeto.
- Quando el objeto se ubica en el foco (F) no se forma imagen ya que los rayos reflejados salen paralelos.

- Quando el objeto se ubica entre F y C, la imagen es real, invertida y de mayor tamaño que el objeto ubicada más allá de C.
- Quando el objeto se ubica en el centro de curvatura (C), la imagen es real, invertida y de igual tamaño que el objeto y ubicada en C.
- Quando el objeto se ubica más allá de C, la imagen es real, invertida y de menor tamaño que el objeto, ubicada entre F y C.

#### 2. Espejo convexo

Son aquellos cuya cara pulimentada está en el exterior en estos espejos las características de la imagen son únicas, siempre es virtual derecha y de menor tamaño, que el objeto, ubicada entre F y V.



#### Ecuación de descartes

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{\sigma} + \frac{1}{i}$$

#### Ecuación del aumento (A)

$$A = -\frac{1}{\theta}$$

#### Cuadro de signos

	f	$\sigma$	i	A o II
+	Espejo cóncavo	Siempre	Imagen real	Imagen derecha
-	Espejo convexo	Nunca	Imagen virtual	Imagen invertida

## Índice de refracción (n)

Es una cantidad adimensional que mide la densidad óptica del medio transparente, se define como la relación de la velocidad de la luz en el vacío (c) a la velocidad de la luz en dicho medio (v).

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda_0 f}{\lambda f} = \frac{\lambda_0}{\lambda}$$

Ya que al pasar de un medio a otro la frecuencia de la luz no se altera por que el número de longitudes de onda que llegan a la interfase en la unidad de tiempo, es igual al número de longitudes de onda que se transmite al otro medio.

$\lambda_0$  = longitud de la luz en el vacío.

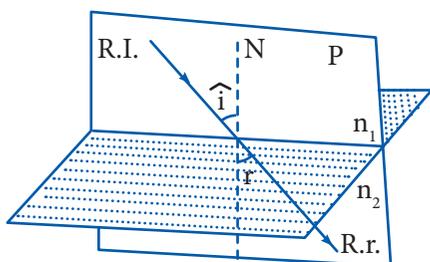
$\lambda$  = longitud de onda en el medio.

Tabla 3

Sustancia	Índice de refracción
Agua (25° C)	1.33 = 4/3
Alcohol (20° C)	1.36
Vidrio (crown)	1.52
Hielo	1.31
Vidrio flint	1.65
Aire	1.00029
Cuarzo	1.57 - 1.45
Sodio	4.22
Diamante	2.417

## Refracción de la luz

Es el cambio de dirección que experimenta la luz, al pasar de un medio transparente a otro.



Ri = rayo incidente

RR = rayo refractado

N = recta normal a la superficie

$\hat{i}$  = ángulo de incidencia

$\hat{r}$  = ángulo de refracción

P = plano de incidencia

## Leyes

1. El rayo incidente, la normal y el rayo refractado son siempre coplanares.

2.  $n_1 \text{Sen} \hat{i} = n_2 \text{Sen} \hat{r}$   
(Ley de Snell)

En base a la ley de Snell se deduce que cuando la luz pasa de un medio menos denso a otro más denso el rayo refractado se acerca a la normal, es decir  $n_1 < n_2 \rightarrow i > r$ .

Además si la luz pasa del medio más denso al menos denso el rayo refractado se aleja a la normal, es decir  $n_1 > n_2$ .

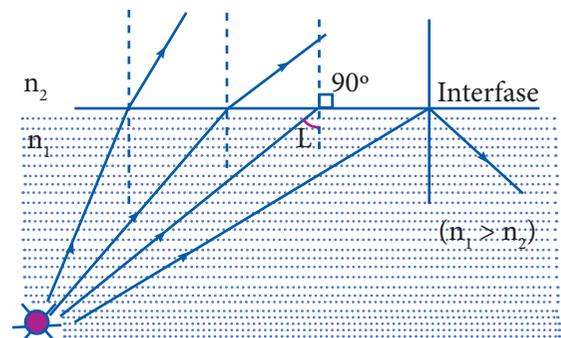
$$\rightarrow \hat{i} < \hat{r}$$

## Ángulo límite

Es el ángulo de incidencia que permite un ángulo de refracción de 90° esto solamente sucede cuando el haz de luz pasa del medio más denso al menos denso.

## Reflexión total interna

Este fenómeno se produce cuando el ángulo de incidencia es mayor que el ángulo límite; en este caso la luz no puede pasar al otro medio reflejándose totalmente.



## Cálculo del ángulo límite ( $\hat{L}$ )

$$n_1 \text{Sen} \hat{i} = n_2 \text{Sen} \hat{r}$$

$$n_1 \text{Sen} \hat{L} = n_2 \text{Sen} 90^\circ$$

$$\text{Sen} \hat{L} = \frac{n_2}{n_1} \rightarrow \hat{L} = \text{ArcSen} \left( \frac{n_2}{n_1} \right)$$

## Trabajando en clase

### Integral

1. ¿En qué longitud de onda podemos sintonizar una estación de radio que emite señales a una frecuencia de 12 MHz?

Resolución:

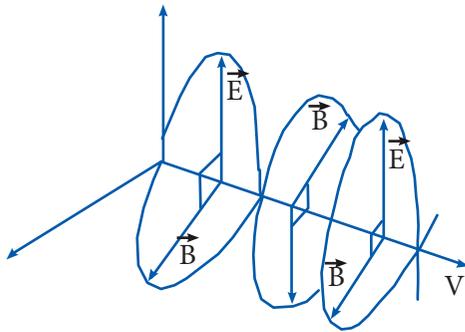
$$C = \lambda \cdot f$$

$$3 \cdot 10^8 = \lambda \cdot 12 \cdot 10^6$$

$$\lambda = 25 \text{ m}$$

2. ¿En qué longitud de onda podemos sintonizar una estación de radio que emite señales a una frecuencia de 9 MHz?

3. Indica la dirección de propagación de la onda:



4. Marca V o F:  
Los rayos X son ondas electromagnéticas.  
Un rayo laser se puede considerar como un haz monocromático y coherente.

Los fotones tienen carga eléctrica.

- a) VFV                      c) FVF                      e) VVV  
b) VVF                      d) FFV

### UNMSM

5. Calcula la longitud de onda de una radiación «X» cuya frecuencia de emisión es  $4 \times 10^{19}$  Hz.

Resolución:

$$C = \lambda \cdot f$$

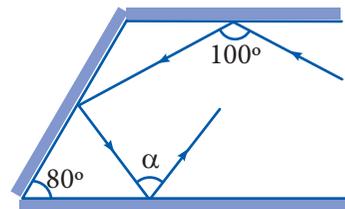
$$\lambda = \frac{C}{f}$$

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{4 \cdot 10^{19}} = 0,75 \cdot 10^{-11} = 7,5 \cdot 10^{-12} \text{ m}$$

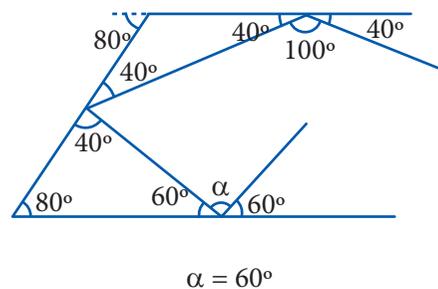
6. Calcula la longitud de onda de una radiación «X» cuya frecuencia de emisión es  $6 \times 10^{18}$  Hz.

7. Una OEM que se propaga en el vacío, en cierto instante posee un campo magnético de inducción  $B = 6 \times 10^{-12}$  T. Halla la intensidad de campo eléctrico en dicho instante.

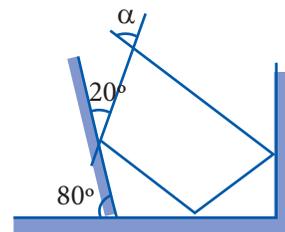
8. Calcula  $\alpha$ .



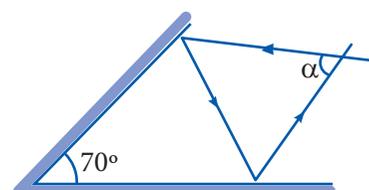
Resolución:



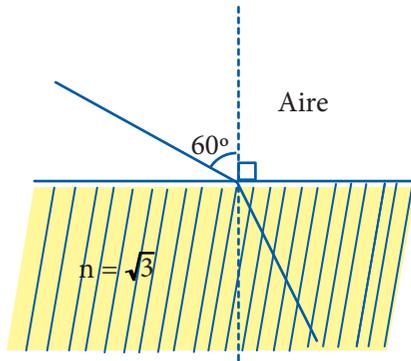
9. Calcula  $\alpha$



10. Calcula  $\alpha$



11. Calcula R



12. Un espejo cóncavo de radio de curvatura 40 cm se coloca un objeto a 60 cm de su centro óptico. Determina la distancia de la imagen del espejo.
13. ¿A qué distancia de un espejo cóncavo, de 40 cm de distancia focal, se debe ubicar un objeto para que su imagen sea real y se ubique a 80 cm del espejo?
14. Un objeto se ubica a 2 m de distancia de un espejo convexo y su imagen virtual se forma a 0,5 m del espejo, ¿cuál es la distancia focal de dicho espejo?

UNI

15. Un espejo cóncavo tiene un radio de curvatura de 0,8 m. Halla a que distancia del espejo se debe colocar un objeto para que su imagen real tenga un tamaño 4 veces la del objeto.

Resolución:

$$\left| \frac{1}{\theta} \right| = \frac{4}{1} \quad \frac{1}{f} = \frac{1}{i} + \frac{1}{\theta}$$

$$f = \frac{R}{2} \quad f = \frac{0,8}{2} = 0,4 \text{ m} = 40 \text{ m}$$

$$\frac{1}{40} = \frac{1}{4k} + \frac{1}{k} \quad k = 50 \text{ m}$$

$$\Rightarrow \theta = 50 \text{ m}$$

16. Un espejo cóncavo tiene un radio de curvatura de 0,6 m. Halla a qué distancia del espejo se debe colocar un objeto para que su imagen real tenga un tamaño 3 veces la del objeto.
17. ¿Cuál será la longitud focal de un espejo si se quiere producir una imagen del doble del tamaño normal de un objeto situado a 60 cm frente a el?
18. Se tiene un espejo cóncavo de 24 cm de longitud focal. ¿A qué distancia del vértice del espejo debe estar colocado un objeto para que su imagen sea virtual y de triple tamaño?