



Figura 3-1: Posición aparente de un objeto, considerando la curvatura de los rayos de luz debido a la refracción a través de diferentes medios.

3 ÓPTICA GEOMÉTRICA

3.1. LUZ Y LEYES

La luz puede ser representada mediante **rayos**, que son líneas imaginarias que indican la dirección en la que se propaga. Cuando un rayo de luz incide sobre la superficie de separación entre dos medios diferentes (por ejemplo, aire y agua), su trayectoria puede modificarse. Este cambio depende de las propiedades ópticas de los medios involucrados.

El estudio del comportamiento de los rayos de luz al encontrarse con superficies se basa en dos fenómenos fundamentales: la **reflexión** y la **refracción**. Ambos procesos obedecen a leyes precisas que permiten predecir cómo se desviará o reflejará un rayo al pasar de un medio a otro. Comprender estas leyes es esencial para analizar una amplia variedad de fenómenos ópticos, tanto en la naturaleza como en aplicaciones tecnológicas.

Naturaleza de la luz

Lo que venimos a denominar “luz” es una onda electromagnética y sus propiedades (como la velocidad de propagación) dependen del medio en que se propaga la onda.

Desde el mundo griego, y posteriormente árabe, se la interpretó de diversas maneras, pero recién entre los siglos XV y XIX se debaten las primeras teorías muy diversas y controversiales. La luz se concibió como un haz de corpúsculos sutilísimos (Descartes y Newton), como un fluido de carácter sustancial (Grimaldi), como un pulso (Hooke), y como el movimiento ondulatorio de algo que se llamó éter (Huygens, Fresnel, Maxwell). Todos llegan, por consideraciones geométricas de sus teorizaciones a las mismas conclusiones respecto de la reflexión y refracción, leyes que vamos a estudiar en este curso.

Los fenómenos ópticos pueden ser modelados de dos formas:

- **Óptica geométrica** resulta un modelo adecuado cuando la longitud de onda de la luz es tan pequeña en comparación con el tamaño del objeto, obstáculo o abertura iluminada que los efectos de difracción y de interferencia pueden despreciarse.
- **Óptica física** es un modelo adecuado cuando la longitud de onda de la luz es comparable con las dimensiones del objeto, obstáculo o abertura iluminada, de modo que los efectos de difracción e interferencia se vuelven significativos y no pueden despreciarse.

3.2. ONDAS

Una onda es una vibración o perturbación que se propaga por un medio (como el agua, el aire) o por el vacío (como la luz o las ondas de radio). En el primer caso nos referimos a **ondas mecánicas** que para propagarse necesitan de un medio material (sólido, gaseoso, o líquido), como las ondas en el agua cuando tiras una piedra, o las ondas sonoras. En el caso de las **ondas electromagnéticas**, esta puede propagarse incluso en vacío como lo hace la luz que nos llega del sol.

En todos los casos no hay transporte de materia, sino de energía. Por ejemplo, cuando tiras una piedra en el agua, **ves ondas circulares**, el agua **no se va con la onda**, solo **sube y baja** en su lugar. **Lo que avanza es la energía**, no el agua (Figura 3-2). Podemos pensar en las olas que se arman en una cancha de fútbol para visualizar el concepto, donde el “efecto” se genera subiendo y bajando, pero sin trasladarnos.

Resumiendo: Una onda es una perturbación que se propaga en el espacio y tiempo, transportando energía. No hay transporte de materia. Las ondas mecánicas necesitan de un medio material para propagarse, las electromagnéticas lo hacen aún en vacío.

Repasemos algunas magnitudes características de las ondas que ya hemos presentado en el primer capítulo:

Longitud de onda: Es la distancia entre dos puntos idénticos de la onda (entre dos crestas, o entre dos valles, o entre dos posiciones a partir de las cuales la onda vuelve a comenzar). Se mide en unidades de longitud, por ejemplo, el metro (m). Ver Figura 3-4.

Frecuencia: Es el número de repeticiones en una unidad de tiempo. Se mide en Hertz, $1 \text{ Hz} = 1/\text{s}$. Ver Figura 3-5

Velocidad de propagación de la onda: La rapidez con la que la luz viaja desde el punto de emisión hasta el punto de recepción. En el vacío es $c=300.000.000 \text{ m/s}$ y en el aire su valor es similar al de la velocidad en el vacío.

$$v = \lambda \cdot f$$

Ecuación 3-1

Esta relación entre longitud de onda, frecuencia y velocidad de propagación ya la hemos visto en el capítulo 2 (Sonido). De la Ecuación 3-1, observamos que, a mayor longitud de onda, menor frecuencia, y viceversa

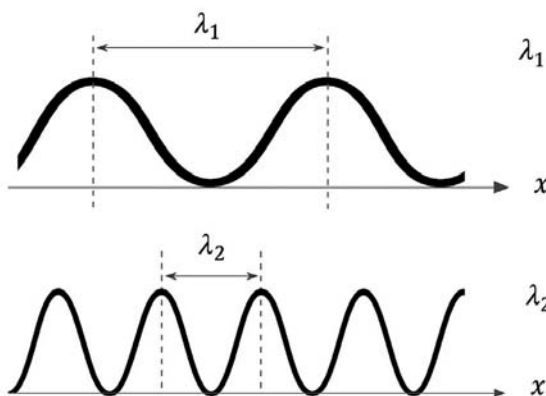


Figura 3-4: La longitud de onda es la distancia entre dos puntos de la onda a partir de la cual comienza de nuevo. En este caso la longitud de onda de 1 es mayor que la longitud de onda de 2.

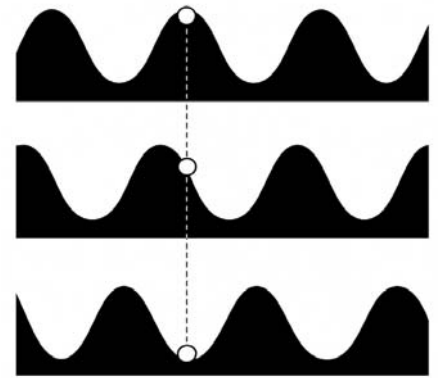


Figura 3-2: En la figura tenemos tres fotos de una onda que se propaga. El punto material de la onda sube y baja. No modifica su posición horizontal porque se trata de una **onda transversal**.



Figura 3-3: Imaginemos la ola que se arma en una cancha de fútbol. Cada persona levanta los brazos en secuencia, se propaga una “ola” sin que la materia (las personas) se mueva realmente de su lugar.

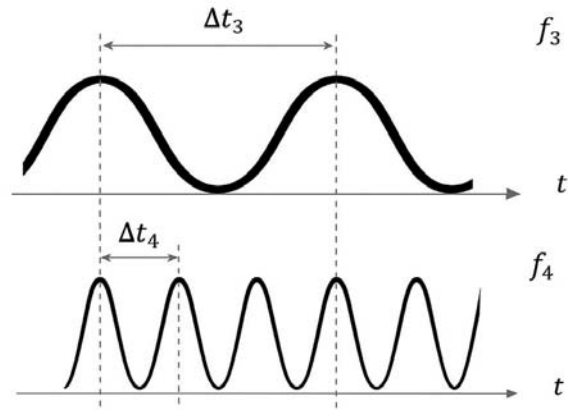


Figura 3-5: La frecuencia está asociada con la inversa del tiempo en volver a comenzar. En este caso la onda con mayor frecuencia es la 4.

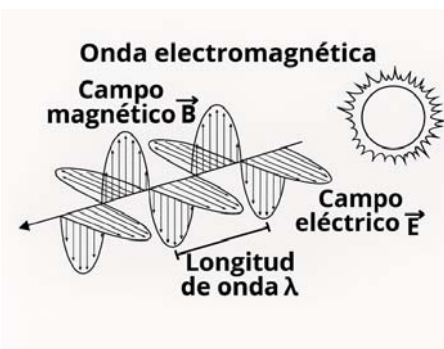


Figura 3-6: Esquema de una onda electromagnética propagándose. La misma está compuesta por la superposición de la onda asociada al campo eléctrico, y la onda asociada al campo magnético.

3.2.1 Ondas electromagnéticas

Una **onda electromagnética** está formada por dos campos: un **campo eléctrico**, \vec{E} , y un **campo magnético**, \vec{B} , que se generan uno al otro mientras se mueven (oscilan a cierta frecuencia), y están orientados en direcciones perpendiculares entre sí y a la dirección de propagación, como se muestra en la Figura 3-6.

El espectro electromagnético es el conjunto de todas las ondas electromagnéticas que existen. Estas ondas transportan energía y viajan por el espacio a la velocidad de la luz. Y ya hemos mencionado que no requiere de un medio material para poder propagarse, si bien puede hacerlo en un medio material, como agua, aire, (la luz atraviesa la atmósfera y sigue propagándose, pero a menor velocidad).

Espectro electromagnético

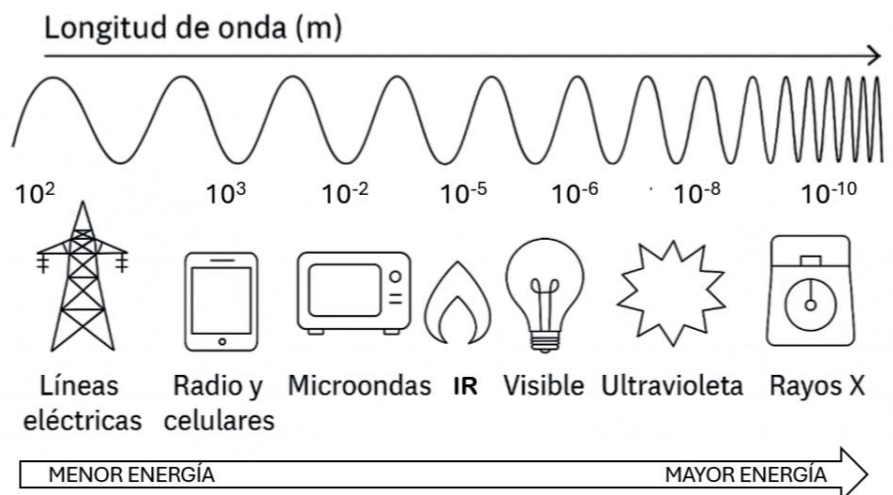


Figura 3-7: Espectro electromagnético

Las ondas del espectro se ordenan según su longitud de onda (el tamaño de la onda) o su frecuencia (cuántas ondas pasan por segundo).

Teniendo en cuenta la longitud de onda, tenemos desde las ondas **más largas** (baja energía) hasta las **más cortas** (alta energía), el es-

pectro incluye: **Ondas de radio** (como las de la radio o el Wifi), **Microondas** (usadas para cocinar), **Infrarrojo** (calor, controles remotos), **Luz visible** (la que podemos ver: rojo, naranja, amarillo, verde, azul, violeta), **Ultravioleta** (del sol, puede dañar la piel), **Rayos X** (para ver huesos en medicina) y **Rayos gamma** (de origen nuclear o espacial, muy energéticos), como se muestra en la Figura 3-7.

A menor longitud de onda, mayor frecuencia y mayor energía.

3.2.2 Espectro visible

Lo que habitualmente denominamos luz es radiación¹ electromagnética cuya longitud de onda está comprendida entre 380 nm y 780 nm².

El color no es una magnitud física, es la impresión visual producida por un tono de luz en los órganos visuales, o más específicamente, es una percepción visual que se genera en el cerebro. La luz blanca es una mezcla de longitudes de onda diferentes.

Cada color está definido a partir de un rango de frecuencias o de longitudes de onda. El ojo no puede analizar las distintas frecuencias que recibe y aprecia tan sólo el “color” resultante. Decimos que un objeto tiene un color cuando, con preferencia, refleja o transmite las radiaciones correspondientes a la frecuencia asociada a ese color. Por ejemplo, un cuerpo es rojo cuando absorbe en casi su totalidad todas las radiaciones menos las rojas, siendo las rojas reflejadas por el cuerpo.

3.3 RAYOS DE LUZ Y FRENTE DE ONDA

Un frente de onda es una superficie imaginaria que une todos los puntos de un medio que están en la misma fase de vibración. Para una fuente puntual, los frentes de onda tienen forma esférica; para una onda que se propaga en una sola dirección (como en un haz de luz lejano), los frentes de onda son planos.

Se denomina rayo a la línea imaginaria que indica la dirección de propagación de la energía de la onda. Los rayos son siempre perpendiculares a los frentes de onda y permiten representar de forma simplificada el trayecto de la luz en el espacio, Figura 3-8 y Figura 3-9.

3.3.1 El camino óptico

Cuando un rayo luminoso impacta (incide) en la superficie de separación entre dos medios materiales pueden pasar dos cosas, desde la óptica geométrica:

- Que vuelva hacia el medio de donde proviene (reflexión), dando como resultado el rayo reflejado.
- Que avance hacia el medio de propiedades distintas (refracción o transmisión), dando como resultado el rayo transmitido.

Luz visible		
Color	Frecuencia	Longitud de onda
Violeta	668–789 THz	380–450 nm
Azul	631–668 THz	450–475 nm
Ciano	606–630 THz	476–495 nm
Verde	526–606 THz	495–570 nm
Amarillo	508–526 THz	570–590 nm
Naranja	484–508 THz	590–620 nm
Rojo	400–484 THz	620–750 nm

Tabla 3-1: Longitudes de onda y frecuencias del Espectro electromagnético

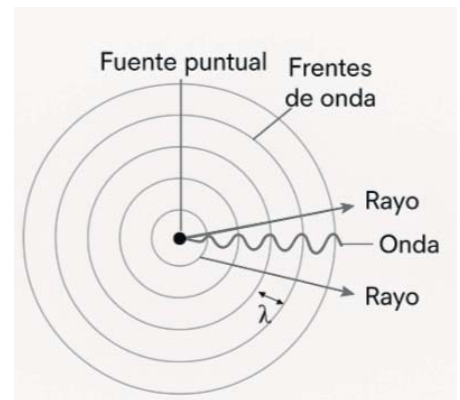


Figura 3-8: Frente esférico y rayos radiales. Cuando vemos la luz de una vela estamos en este caso.

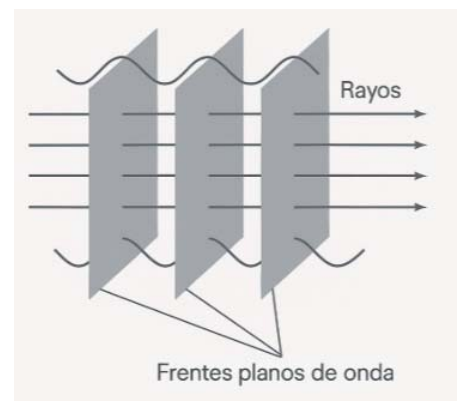


Figura 3-9: Frente plano y rayos paralelos. Cuando vemos la luz del Sol o de otra estrella estamos en el caso.

1. Es cualquier forma de energía que se transmite a través del espacio. Toda onda electromagnética es radiación, pero no toda radiación es electromagnética.

2. 1 nm = nanómetro ; 1nm = 10⁻⁹ m = 0,000000001m

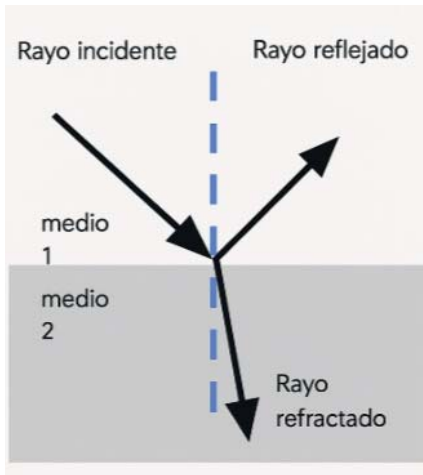


Figura 3-10: Diagrama del camino óptico que realiza un rayo incidente, reflejado y refractado al propagarse un rayo luminoso en una interfaz conformada por dos medios.

Estos tres rayos siempre están en un mismo plano, como se representa en la Figura 3-10.

3.3.2 Principio de Fermat

Este comportamiento de la luz fue sistematizado por Pierre de Fermat cerca de 1650, quien elaboró el concepto de tiempo mínimo o principio de Fermat. Su idea es esta: de todos los posibles caminos que puede tomar la luz para ir de un punto a otro, la luz toma el camino que requiere el tiempo más corto (ver Figura 3-11).

¿Sabías que?

Para Feynman (1970) el enunciado correcto es el siguiente: un rayo que va en cierto camino particular tiene la propiedad de que si hacemos un pequeño cambio (digamos un corrimiento de 1%) en el rayo, sea en el lugar en el cual llega al espejo o en la forma de la curva o cualquier cosa, no va a haber cambios de primer orden en el tiempo; va a haber solo un cambio de segundo orden en el tiempo. En otras palabras, el principio es que la luz toma un camino tal que hay muchos otros caminos vecinos que demoran casi exactamente el mismo tiempo.

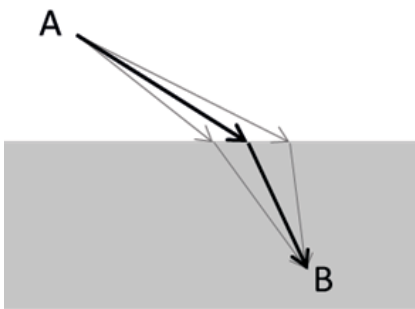


Figura 3-11: Diagrama del principio de Fermat. El principio de Fermat, en óptica, establece que la luz, al viajar entre dos puntos, sigue el camino que le toma el menor tiempo posible.

3.4 REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN

3.4.1 Ley de Reflexión

En la reflexión se verifica que el ángulo del rayo incidente (o sea el ángulo que forma el rayo incidente y la perpendicular a la superficie) es igual al ángulo que forma el rayo reflejado (o sea el ángulo que forma el rayo reflejado y la perpendicular a la superficie), es decir:

$$\theta_i = \theta_r$$

Ecuación 3-2

Donde θ_i es el ángulo que forma el rayo incidente con respecto a la normal a la superficie que delimita la interfaz entre los dos medios, y θ_r el ángulo que forma el haz de luz reflejado con respecto a la misma normal, y se cumple la Ecuación 3-2 .

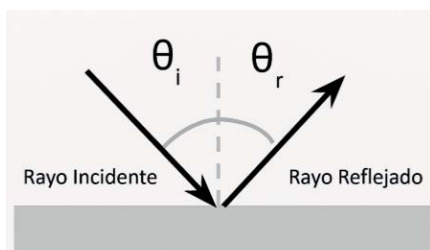


Figura 3-12: Diagrama de rayo incidente y reflejado. Respecto de la normal a la superficie que divide ambos medios, los ángulos son iguales.

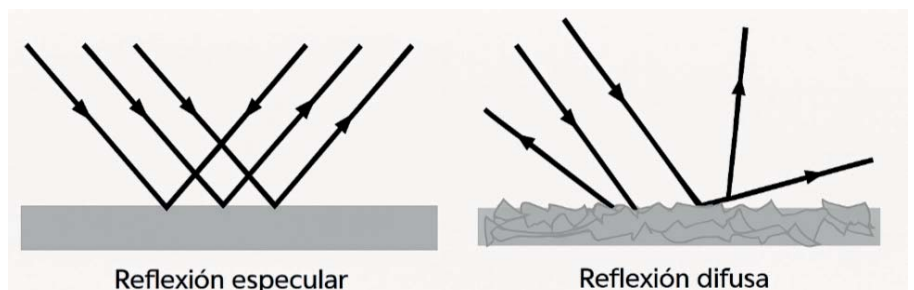


Figura 3-13: Tipos de reflexión: La reflexión especular ocurre cuando una superficie lisa refleja la luz en una dirección específica, como un espejo, mientras que la reflexión difusa ocurre cuando una superficie rugosa dispersa la luz en muchas direcciones, como un papel blanco.

3.4.2 Índice de refracción

El índice de refracción de un medio es una medida para saber cuánto se reduce la velocidad de la luz dentro del medio. Se denomina **índice de refracción** (n) el cociente de la velocidad de la luz en el vacío (c) y la velocidad de la luz en el medio (v). Muchas veces se lo percibe como una **densidad óptica**.

$$n = \frac{c}{v}$$

Ecuación 3-3

En la Ecuación 3-3, c es la velocidad de la luz en el vacío, v la velocidad de la luz en el medio material, y n el índice de refracción del medio. La velocidad cambia según sea la densidad óptica del medio. Cuanto mayor sea el índice de refracción la velocidad de propagación disminuye. Cuanto menor sea el índice de refracción mayor será la velocidad de propagación.

En la Tabla 3-2 se puede observar cómo cambia el índice de refracción según sea la sustancia.

Tabla de índices de refracción según sustancia para incidencia de luz con $\lambda_0 = 670$ nm (amarilla)		
Sólidos		
	Hielo (H ₂ O)	1,309
	Fluorita (CaF ₂)	1,434
	Poliestireno	1,49
	Sal de roca (NaCl)	1,544
	Circonio (ZrO ₂ ·SiO ₂)	1,923
	Rutilo (TiO ₂)	2,62
Vidrios		
	Blanco (Crown)	1,52
	Cristal ligero	1,58
	Cristal denso	1,66
Líquidos a 20°C		
	Metanol (CH ₃ OH)	1,329
	Agua (H ₂ O)	1,333
	Glicerina	1,473
	Disulfuro de Carbono (CS ₂)	1,628

Tabla 3-2: Índices de refracción para distintas sustancias para $\lambda_0 = 670$ nm.

3.4.3 Ley de Refracción

Cuando un rayo de luz monocromática (con una única longitud de onda) se desplaza por un cierto material e incide sobre la superficie de otro material (interfase), al atravesarlo modifica el ángulo respecto de la normal según esta ley:

$$n_1 \text{sen}(\theta_1) = n_2 \text{sen}(\theta_2)$$

Ecuación 3-4

A esta expresión, Ecuación 3-4, se la conoce como **Ley de Snell**, donde el ángulo θ_i es el que forma el rayo incidente con la normal a la superficie definida como la interfaz entre los dos medios, y el ángulo θ_r es el que forma el rayo refractado respecto de esa normal. Donde n_1 es el índice del medio donde se propaga el rayo incidente, n_2 el medio donde se propaga el rayo refractado. Y θ_r , el ángulo que forma el rayo reflejado con la normal.

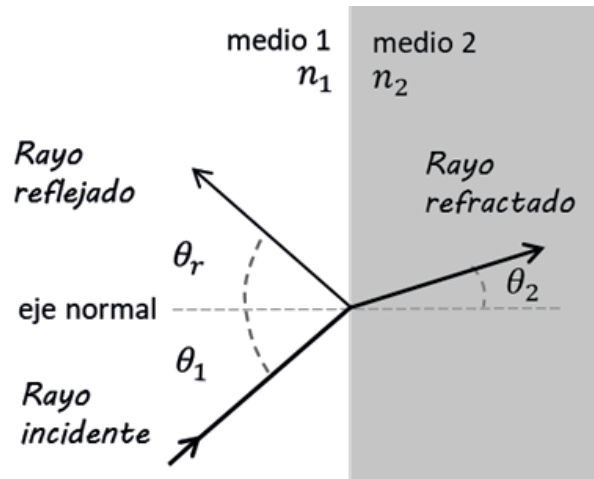


Figura 3-14: Refracción y reflexión. El rayo incidente y el rayo reflejado inciden y reflejan respectivamente con el mismo ángulo medido respecto a la normal a la superficie de incidencia. El ángulo de refracción del rayo refractado, medido también respecto a la normal a la superficie cumple la ley de Snell.

<p>Si $n_1 > n_2$, al pasar a un medio de mayor índice de refracción el rayo de luz perderá velocidad y se orientará más cercano a la normal.</p>	<p>Si $n_1 > n_2$, al pasar a un medio de menor índice de refracción el rayo de luz ganará velocidad y se orientará más lejano a la normal.</p>	<p>Si $n_1 = n_2$, al pasar a un medio de igual índice de refracción la velocidad no variara y el ángulo tampoco.</p>

Figura 3-15: Desviación del rayo refractado (casos).

3.4.4 Cambio de longitud de onda en la refracción

La frecuencia (f) de la luz no cambia cuando el rayo de luz ingresa en otro medio, pero su longitud de onda cambia (λ_m). La velocidad de la luz en el aire es muy similar a la del vacío, así que consideremos el aire de aquí en adelante $n_{vacío} \approx n_{aire} = 1$.

Como hemos visto en la Ecuación 3-1 se relaciona la velocidad de propagación con la frecuencia y la longitud de onda. La frecuencia no cambia, pero la longitud de onda si, entonces la velocidad debe cambiar. Si llamamos λ_0 a la longitud de onda que se propaga en aire (o en el

vacío) y λ_m la longitud de onda de la luz un medio (que no es aire o vacío) se verifica que: en aire $c=\lambda_0 f$, y en el medio $v=\lambda_m f$.

A partir de la Ecuación 3-3 llegamos a una nueva ecuación que relaciona la longitud de onda con el índice de refracción del medio:

$$n_m = \frac{c}{v} = \frac{\lambda_0 \cdot f}{\lambda_m \cdot f} = \frac{\lambda_0}{\lambda_m}, \text{ es decir:}$$

$$n_m = \frac{\lambda_0}{\lambda_m}$$

Ecuación 3-5

Como el índice de refracción, n , siempre es mayor que 1 (salvo vacío o aire) entonces la nueva longitud de onda de un haz de luz monocromático, al refractarse (λ_m) siempre será menor que la que tenía en aire (ver Ecuación 3-5).

El color que percibe el ojo depende de la frecuencia de la luz, no de su longitud de onda en el medio. Sin embargo, en el agua ocurre una absorción diferencial según la longitud de onda, lo que puede alterar la apariencia de los colores. Como el agua absorbe con mayor eficacia las longitudes de onda largas (rojo) que las cortas (azul), el color rojo se atenúa rápidamente a pocos metros de profundidad, modificando así la apariencia de los objetos bajo el agua.

3.4.5 Índice de refracción y longitud de onda

Vimos cómo la luz refractada varía su velocidad según el medio, y como además su velocidad está relacionada con la longitud de onda. Por lo tanto, existe una relación entre el índice de refracción del medio refractante y la longitud de onda de la onda refractada.

Esto quiere decir que el índice de refracción DEPENDE de la longitud de onda y del medio (sustancia), e implicará que cada rayo de luz monocromática al refractar tendrá un ángulo de desviación que depende de su longitud de onda. A continuación, en la Tabla 3-3, vemos cómo cambia el índice de refracción para un mismo valor de longitud de onda, dependiendo en que medio se propaga.

Color		Medio: Agua		Medio: Vidrio tipo Crown	
Longitud de onda λ (nm)	Sensación visual	Velocidad v (km/s)	Índice de refracción n	Velocidad v (km/s)	Índice de refracción n
670,8	Rojo	225.272	1,3308	198.144	1,513
589,3	Amarillo	224.900	1,333	197.622	1,517
486,4	Cian	224.211	1,3371	196.199	1,528
404,7	Violeta	223.259	1,3428	195.687	1,532

Tabla 3-3: Índices de refracción para distintas longitudes de onda propagándose en distintos materiales.

3.4.6 Dispersión de la luz

Si incide luz blanca (compuesta por longitudes de ondas diferentes) en un medio se observará una **dispersión cromática**, dado que cada color tendrá un ángulo de refracción diferente.



Figura 3-16: Isaac Newton y la dispersión de la luz

¿Sabías que?

Isaac Newton, en 1672, realizó el experimento en una habitación oscura, usando un pequeño agujero para permitir la entrada de un rayo de luz solar. Luego colocó un prisma en el camino de la luz, lo que hizo que la luz se descompusiera en sus colores constituyentes.

A través de este experimento, Newton concluyó que la luz blanca está compuesta por todos los colores del arco iris, y que la luz de colores es simplemente luz blanca separada por un prisma.

Este descubrimiento fue fundamental para el desarrollo de la óptica y la comprensión de la naturaleza de la luz.

3.4.7 Reflexión total interna

Cuando el rayo proviene de un medio de mayor índice de refracción se desvía de la normal y se observa que a partir de un ángulo crítico, donde la refracción es de 90° deja de existir tal refracción y se produce una reflexión interna total. Aplicando la ley de Snell, (Ecuación 3-4)

$$n_1 \text{sen}(\theta_1) = n_2 \text{sen}(\theta_2)$$

$$n_1 \text{sen}(\theta_c) = n_2 \text{sen}(90^\circ) = n_2$$

$$\text{sen}(\theta_c) = \frac{n_2}{n_1}$$

Ecuación 3-6

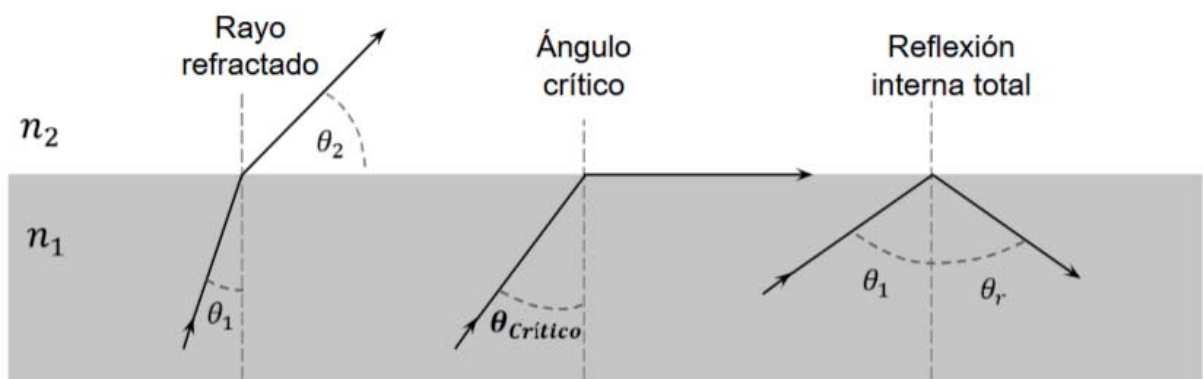


Figura 3-17: Reflexión total. El ángulo crítico es aquel que satisface la ecuación 3-6 y existe únicamente cuando $n_1 > n_2$. Para ángulos de incidencia mayores que el ángulo crítico, se produce reflexión interna total.

Únicamente podrá existir reflexión total interna cuando el índice de refracción del medio incidente es mayor que el índice de refracción del medio donde se refracta el rayo ($n_1 > n_2$), como se deduce de la Ecuación 3-6.

Ejemplo:

Un rayo atraviesa un vidrio grueso cuyo índice de refracción es $n=1,52$ y sale refractado en aire cuyo índice de refracción es $n=1$, como se observa en la Figura 3-18. ¿Cuál es su ángulo de refracción? ¿Podría haber reflexión interna total? Si es posible ¿cuál es el ángulo crítico a partir del cual ya no hay refracción?

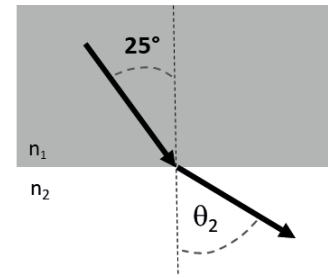


Figura 3-18: Esquema de un rayo que atraviesa una interfaz vidrio – aire. Lo hace incidiendo sobre la superficie que separa ambos medios, con un ángulo de 25° .

Resolución:

Usando la Ley de Snell obtenemos el ángulo de refracción:

$$n_1 \cdot \text{sen}(\theta_1) = n_2 \cdot \text{sen}(\theta_2)$$

$$\text{sen}(\theta_2) = \frac{1,52 \cdot \text{sen}(25^\circ)}{1} = 0,6423$$

$$\theta_2 = \text{sen}^{-1} 0,6423 = 39,96^\circ$$

El rayo de luz podría no ser refractado (reflexión interna total) dado que cumple con la condición $n_1 > n_2$. El ángulo crítico de incidencia es:

$$\text{sen}(\theta_c) = \frac{n_2 \cdot \text{sen}(90^\circ)}{n_1} = \frac{1}{1,52} = 0,65789$$

$$\theta_c = \text{sen}^{-1}(0,65789) = 41,14^\circ$$

Si el ángulo de incidencia es mayor que el ángulo crítico ya no hay refracción y solo hay reflexión interna.

3.4.8 Resumiendo: Refracción y Reflexión:

1. La longitud de onda del rayo de luz monocromática en vacío (o aire) λ_0 será modificada al refractarse en un medio de índice n_m (Ecuación 3-5):

$$\lambda_m = \frac{\lambda_0}{n_m}$$

2. En la reflexión el rayo incidente, la normal y el reflejado están en el mismo plano y los ángulos entre ambos, respecto de la normal son iguales (Ecuación 3-2):

$$\theta_1 = \theta_3$$

3. En la refracción el rayo incidente cumple esta relación entre los ángulos (Ley de Snell, Ecuación 3-4)

$$n_1 \text{sen}(\theta_1) = n_2 \text{sen}(\theta_2)$$

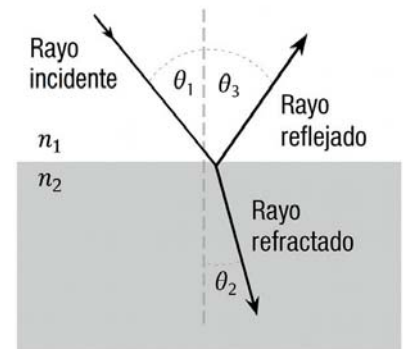


Figura 3-19: Refracción y reflexión, trazado de rayos. Los ángulos se miden todos respecto a la normal a la superficie que separa ambos medios como se observa en la figura.

3.4.9 Refracción y Reflexión en acción (curiosidades)

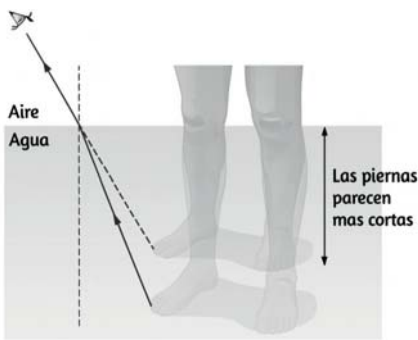


Figura 3-20: La imagen parece distorsionada respecto de lo esperado. Las piernas parecen más cortas de lo que realmente son.



Figura 3-21: Si colocamos una regla en un vaso con agua, y la miramos lateralmente, parece que ésta se quiebra. La imagen que vemos no coincide con lo esperado.



Figura 3-23: El “espejismo del asfalto mojado” es una ilusión óptica causada por la refracción de la luz debido a las diferencias de temperatura del aire sobre una superficie caliente.

Imagen distorsionada: Pensemos cuando estamos en una pileta. Las piernas “parecen” más cortas de lo que son como se observa en la Figura 3-20, ¿Por qué?

Toma una regla, sumérgirla parcialmente en un vaso con agua y mírala lateralmente, parece que se quiebra como se observa en Figura 3-21, ¿no?

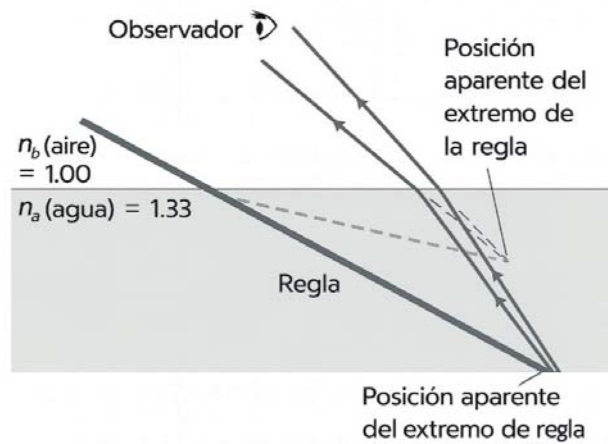


Figura 3-22: Trazado de rayos: posición aparente de la regla.

Se observa en la Figura 3-22 que los rayos de luz provenientes de cualquier objeto sumergido se desvían alejándose de la normal cuando salen al aire. Desde el punto de vista de un observador situado afuera de la superficie del agua, el objeto parece estar mucho más cerca de la superficie de lo que en realidad está.

Espejismo: Es común presenciar este fenómeno en la ruta, en días calurosos de verano (Figura 3-24). Las capas de aire que están a distintas temperaturas provocan diferencias en el índice de refracción (la capa más cercana a la carretera está a mayor temperatura, tiene menor densidad y su índice de refracción es menor).

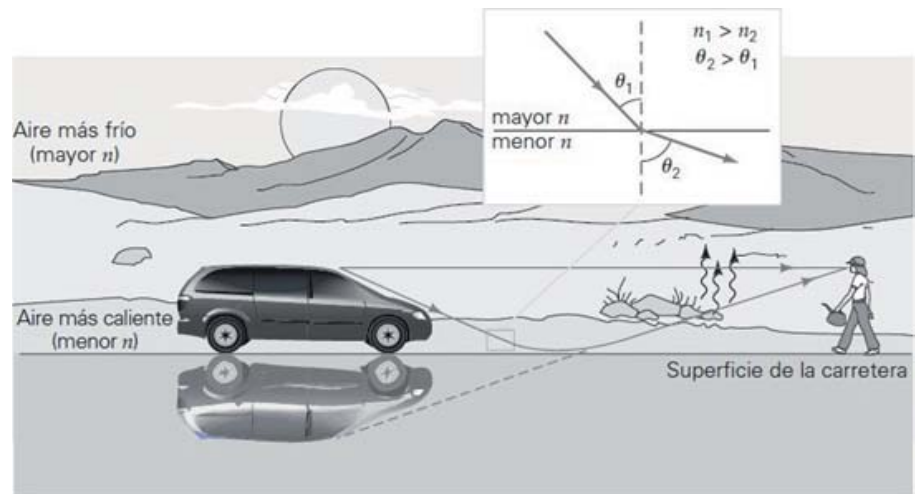


Figura 3-24: Espejismo: trazado de rayos.

Esto origina el punto “mojado” que en realidad es una imagen espejada del cielo (visto desde quien está en el auto) y una imagen invertida de un objeto (visto desde alguien que está detenido en el camino, Figura 3-24).

Fibra óptica: La fibra óptica es una tecnología que permite transmitir información utilizando luz en lugar de electricidad. Está formada por hilos muy delgados de vidrio o plástico por los que viaja la luz, reflejándose continuamente en el interior completamente cada vez, **reflexión total interna**.

Este fenómeno ocurre cuando la luz que viaja por un medio más denso (como el vidrio de la fibra) choca con la pared interna en un ángulo tal que, en vez de salir, rebota completamente hacia adentro. Esto permite que la señal de luz viaje grandes distancias sin perder intensidad. La fibra óptica se utiliza en telecomunicaciones, internet, medicina (como en endoscopios), y en algunos sensores industriales, por su gran velocidad y capacidad de transmitir datos con mucha precisión, (Figura 3-25).

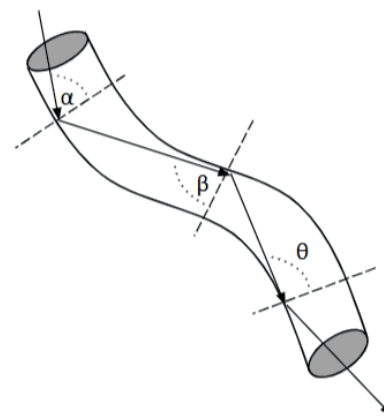


Figura 3-25: La luz queda atrapada, rebotando dentro de la varilla, ya que los ángulos de incidencia son mayores que el ángulo crítico.

3.5 LENTES DELGADAS

En este apunte vamos a estudiar la formación de imágenes a través de **lentes delgadas**, utilizando la **aproximación paraxial** (rayos cercanos al eje óptico y con pequeños ángulos), con el objetivo de comprender el funcionamiento de instrumentos ópticos y fenómenos cotidianos relacionados con la luz y la visión.

Aprenderemos a **diferenciar objetos e imágenes reales y virtuales**, a **trazar los rayos** principales en lentes convergentes y divergentes, y a **construir imágenes** gráficamente.

También veremos cómo **calcular la distancia focal** de una lente y a aplicar la **fórmula de las lentes delgadas** para determinar la posición y el tamaño de las imágenes formadas.

3.5.1 Sistema óptico

El sistema óptico más usado es una lente, o un conjunto de lentes, o un espejo o el conjunto de lentes y espejos, un prisma o varios, etc.

La función de un sistema óptico es recoger y remodelar una parte del frente de onda incidente, a menudo con la intención esencial de formar una imagen del objeto.

Una lente es un dispositivo refractor que reconfigura la distribución de la energía emitida. Una lente delgada es aquella cuyo espesor es despreciable frente a otras longitudes ópticas como radios de curvatura, distancias focales, etc.

El ojo humano funciona como un sistema óptico complejo que permite la visión al enfocar la luz en la retina. Este sistema, compuesto principalmente por la córnea y el cristalino, refracta los rayos de luz para formar una imagen invertida en la retina. Las células fotorreceptoras de la retina convierten esta imagen en señales nerviosas que son enviadas al cerebro para su interpretación, permitiendo la percepción visual.

Cuando nos referimos al objeto, nos referimos por ejemplo a la persona que estamos mirando, cuya imagen se forma en nuestra retina. Como vemos en este caso la imagen es invertida. Dependiendo



Figura 3-26: Sistema óptico, conjunto de elementos que se utilizan para manipulan la luz, como lentes y espejos, para controlar la forma en que la luz viaja y, por lo tanto, la imagen que se forma.