

## UTILIZACIÓN DEL CONCEPTO DE SÍMIL EN LA ÓPTICA GEOMÉTRICA

Hernando González Sierra\*  
José Miguel Cristancho Fierro\*\*  
Justo Pastor Valcárcel Montañez\*\*\*

### Resumen

Usamos el concepto de símil para deducir la ley de Snell de la óptica geométrica a partir del principio de Fermat y del principio de mínima acción.

**Palabras clave:** *Concepto de símil, ley de Snell, principio de Fermat, óptica geométrica, principio de mínima acción, símil estructural, enseñanza de la física.*

### USING THE CONCEPT OF RESEMBLANCE IN GEOMETRICAL OPTICS

### Abstract

We use the concept of “simile” to deduce the Snell law of geometrical Optics, starting from the principle of Fermat and the principle of minimum action.

**Key words:** *concept of “simile”, Snell law, principle of Fermat, geometrical optics, principle of minimum action.*

Artículo recibido: 12/02/09 Aprobado: 15/04/09

---

\* Doctor en Ciencias con especialidad en Física. E-mail: [hergosi@hotmail.com](mailto:hergosi@hotmail.com). Profesor de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Surcolombiana. Neiva. A.A385. Colombia.

\*\* Doctor en Biofísica. E-mail: [micrista@usco.edu.co](mailto:micrista@usco.edu.co). Profesor de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Surcolombiana.

\*\*\* Doctor en Ciencias con especialidad en Físico-química. E-mail: [jupaval@gmail.com](mailto:jupaval@gmail.com). Profesor de la Facultad de Educación, Universidad Surcolombiana.

## 1. Introducción

El uso de analogías, analogías estructurales, metáforas y símiles se ha convertido en una potente herramienta para diseñar estrategias metodológicas en la enseñanza de las ciencias y, en particular, en la enseñanza de la Física (Linares e Izquierdo 2006). También muestran su efectividad estas formas del intelecto en su uso para fortalecer el pensamiento creativo (González, et al. 2008).

No es fácil emplear continuamente estas elaboraciones para ser usadas frecuentemente dentro del aula de clase, por diferentes factores (Moro, et al. 2007). En este artículo queremos resaltar en forma práctica la diferencia que existe entre los conceptos de analogía, analogía estructural, metáfora y símil, debido a que en reiteradas ocasiones los docentes confunden estos elementos o los utilizan en forma inapropiada (Fernández, et al. 2002).

Hemos escogido la ley de la refracción de Snell, de la óptica geométrica, para diferenciar los conceptos de analogía y símil aplicados al caso de la enseñanza de la Física. Sabemos que la ley de Snell puede ser obtenida a través del Principio de Fermat (Hecht 2000) o del Principio de Huygens (Tippens 1996); sin embargo, muchos maestros desconocen que elementos cognoscitivos relacionan estos principios.

## 2. Analogías, analogías estructurales, metáforas y símiles

En términos genéricos el concepto de *analogía* consiste en buscar correspondencias de comparación entre los distintos elementos de dos campos del conocimiento (Duit and Wilbers 2000). Por ejemplo, en la formulación de la Teoría del campo electromagnético elaborada por J.C. Maxwell se hizo uso de analogías con la Hidrodinámica. En la elaboración de nuevas teorías y modelos es frecuente la utilización de analogías provenientes de diferentes campos del conocimiento; entre otros aspectos, el uso de analogías produce el fortalecimiento del pensamiento creativo y es de gran utilidad en el campo de la enseñanza de las ciencias (Oliva, et al. s.f.)

La *analogía estructural* es un concepto extraído de la Mecánica Clásica, basado en la universalidad de los principios variacionales. Es conocido que las ecuaciones

de movimiento para un sistema mecánico, por ejemplo, se pueden obtener a partir de las Leyes de Newton o a partir de ecuaciones de Lagrange o Hamilton. Desde otro punto de vista, es frecuente encontrar que diferentes sistemas físicos, pertenecientes a diversos marcos de la Física, por ejemplo, un sistema mecánico masa-resorte en un medio viscoso y un sistema eléctrico inductancia - resistencia, obedecen las mismas ecuaciones diferenciales de movimiento, por lo cual es usual decir que ellos presentan una *analogía estructural* (Goldstein et al. 2002).

El concepto de *símil* es bien diferente al de analogía y está caracterizado porque las correspondencias de comparación entre los distintos elementos se ubican dentro del mismo campo del conocimiento. El tema central de nuestro trabajo radica en mostrar, usando un ejemplo de cotidianidad en el campo de la óptica geométrica, la diferencia entre los conceptos de analogía y símil, los cuales son usados frecuentemente en forma inadecuada en la enseñanza de la Física.

Las *metáforas* son construcciones del lenguaje para mostrar algún rasgo de utilidad entre diferentes conceptos (González s.f.). Se consideran como una deformación del lenguaje pero muchas veces se utilizan para buscar complementos a conceptos que no son abstractos o poco entendibles usando el lenguaje propio del contexto donde se ubican. Un ejemplo se da cuando tratamos de dar sentido real al concepto de espín en la Mecánica Cuántica y lo asociamos al movimiento de rotación de la tierra sobre su propio eje; sin embargo, se debe entender que el concepto de espín tiene un origen completamente distinto al de movimiento de rotación alrededor de un punto fijo y que no podemos mezclar estos dos aspectos.

## 3. El Principio de Fermat y la Ley de Snell

El principio de Fermat es un principio variacional basado en un valor estacionario y tiene su origen en el cálculo de variaciones (Corben and Sthele 1994). La magnitud física importante es la denominada *longitud del camino óptico* (Tipler 1999).

Enunciamos el principio de Fermat de la siguiente manera: “*El camino óptico recorrido por la luz para ir de un punto a otro es tal que el camino óptico recorrido es estacionario respecto a las variaciones de los caminos posibles*”.

Matemáticamente se expresa este principio como sigue: el tiempo que tarda la luz en recorrer una distancia  $L$  en un medio dado es

$$t = \frac{L}{v} \quad (1)$$

donde  $v$  es la velocidad de la luz en ese medio (suponemos que la velocidad de la luz es constante en todo el medio, sin importar la dirección de desplazamiento).

Definiendo el índice de refracción como

$$n = \frac{c}{v} \quad (2)$$

En la ecuación anterior  $c$  es la velocidad de propagación de la luz en el espacio vacío ( $c = 3 \times 10^8$  m/s).

De las ecuaciones (1) y (2) obtenemos

$$t = \frac{nL}{c} \quad (3)$$

En el caso más general el índice de refracción  $n$  depende de  $L$ , como en el caso de un medio estratificado, de tal forma que la ecuación (3) para desplazamientos infinitesimales de la luz en un medio de índice de refracción  $n(L)$ , puede ser escrita como

$$dt = \frac{n(L)dL}{c} \quad (4)$$

La cantidad  $n dL$  se denomina *longitud del camino óptico*,  $d\Gamma$ , de tal forma que

$$d\Gamma = \sum_i n_i(L) dL_i \quad (5)$$

cuando el rayo de luz marcha a través de un medio de índice de refracción estratificado, el índice de refracción en general es dependiente de la posición.

Entonces, el tiempo empleado por la luz en ir del punto A al punto B es

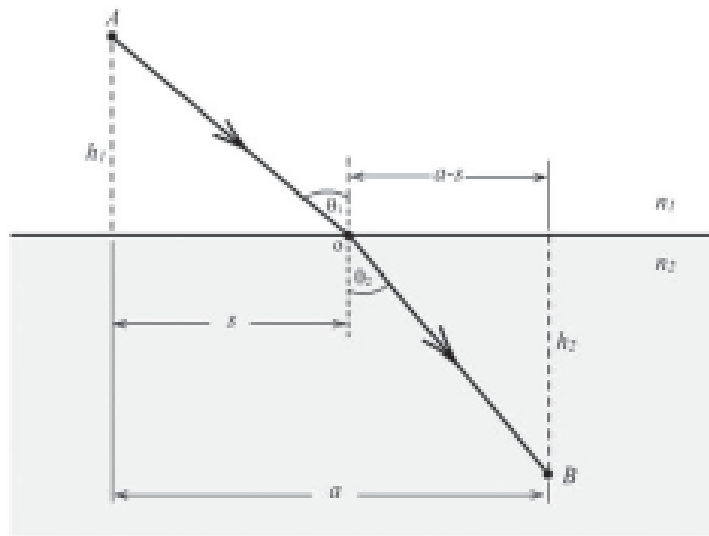
$$t = \frac{1}{c} \int_A^B n(L) dL$$

Como el tiempo debe ser un valor estacionario respecto de la trayectoria de movimiento de la luz, podemos escribir

$$\delta \int_A^B n(L) dL = \delta \int_A^B d\Gamma = 0 \quad (6)$$

La expresión anterior es la forma que adopta el principio de Fermat.

Ahora usamos el principio de Fermat para deducir la Ley de la refracción de Snell.



**Figura 1.** Un rayo de luz pasa del punto A del medio 1, índice de refracción  $n_1$ , al punto B del medio 2, índice de refracción  $n_2$ . La distancia horizontal entre los puntos A y B es  $a$  y la distancia vertical es  $h_1 + h_2$ . Igualmente, la distancia horizontal entre el punto A y el punto de incidencia O es  $s$ .

La figura 1 ilustra el paso de la luz desde el medio 1, con índice de refracción  $n_1$ , al medio 2, con índice de refracción  $n_2$ . De acuerdo con la ecuación la longitud del camino óptico, que recorre la luz desde el punto A hasta el punto B, es

$$\Gamma = n_1 L_1 + n_2 L_2 \tag{7}$$

La longitud del camino óptico se determina de la geometría de la figura de acuerdo con

$$\Gamma(s) = n_1 \sqrt{s^2 + h_1^2} + n_2 \sqrt{(a-s)^2 + h_2^2} \tag{8}$$

El principio de Fermat, en esta circunstancia especial, expresa que la funcional  $\Gamma(s)$  debe ser un extremal; es decir, debe ser un máximo o un mínimo implicando entonces que su derivada primera, con respecto al parámetro  $s$ , debe anularse. Así,

$$n_1 \frac{s}{\sqrt{s^2 + h_1^2}} - n_2 \frac{a-s}{\sqrt{(a-s)^2 + h_2^2}} = 0$$

Mostrando de la figura 1 que

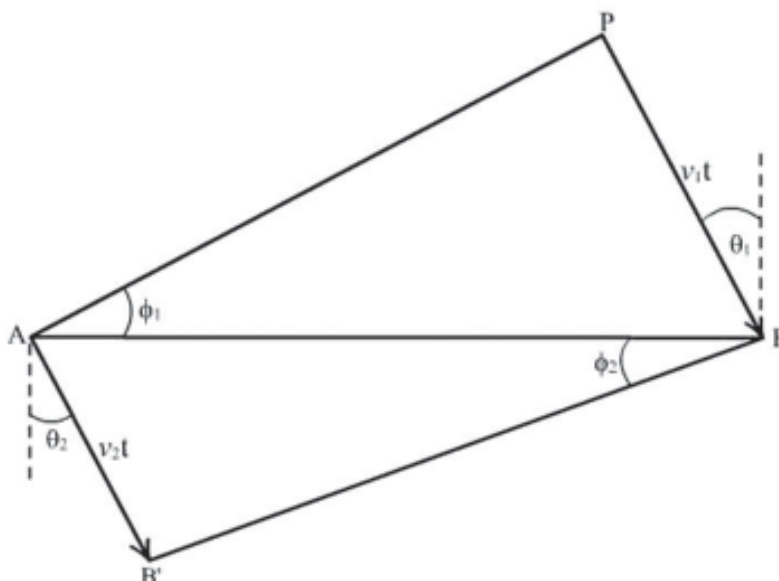
$$n_1 \text{sen} \theta_1 = n_2 \text{sen} \theta_2 \tag{9}$$

Que es la ley de refracción de Snell.

#### 4. El Principio de Huygens y la Ley de Snell

La propagación de cualquier onda a través del espacio puede ser descrita usando un método geométrico descubierto por Huygens en el siglo XVII, el cual ahora conocemos como principio de Huygens o construcción de Huygens: “Cada punto de un frente de onda primario sirve como fuente de ondas secundarias esféricas con una frecuencia y velocidad iguales a las de la onda primaria. El frente de onda primario en algún tiempo posterior es la envolvente de estas ondas”.

La figura 2 muestra una onda incidente en una interface de dos medios con índices de refracción  $n_1$  (onda incidente) y  $n_2$  (onda transmitida). Ahora aplicaremos la construcción de Huygens para encontrar el frente de onda de la onda transmitida. La línea AP indica una porción del frente de onda en el medio de índice de refracción  $n_1$  y forma un ángulo  $\phi_1$  con la interfase de separación entre los dos medios.



**Figura 2.** Una porción de onda incidente en un medio de índice de refracción  $n_1$ , representada por el frente de onda AP penetra a un medio de índice de refracción  $n_2$ . El frente de onda transmitido está representado por el frente de onda BB'. Mientras el extremo P del frente de onda incidente recorre una distancia  $v_1 t$ , el extremo A del frente de onda transmitido recorre una distancia  $v_2 t$ .

En un tiempo  $t$  el frente de onda desde  $P$  recorre la distancia  $v_1 t$  y alcanza el punto  $B$  sobre la línea  $AB$  que separa los dos medios, mientras que la porción del frente de onda en  $A$  recorre una distancia  $v_2 t$  hasta el punto  $B'$  ubicado en el segundo medio. El nuevo frente de onda no es paralelo al frente de onda original  $AP$  debido a que las velocidades de propagación de la luz en los dos medios,  $v_1$  y  $v_2$ , son diferentes.

Usando el triángulo  $APB$ , que es recto en  $P$ ,

$$\text{sen}\phi_1 = \frac{v_1 t}{AB} \quad (10)$$

De donde se obtiene

$$AB = \frac{v_1 t}{\text{sen}\phi_1} = \frac{v_1 t}{\text{sen}\theta_1} \quad (11)$$

El ángulo  $\phi_1$  es igual al ángulo de incidencia  $\theta_1$  por tener sus lados respectivamente perpendiculares. Ahora del triángulo  $AB'B$  se obtiene

$$AB = \frac{v_2 t}{\text{sen}\phi_2} = \frac{v_2 t}{\text{sen}\theta_2} \quad (12)$$

Siendo  $\theta_2$  el ángulo de refracción. Igualando las ecuaciones (11) y (12) obtenemos

$$\frac{\text{sen}\theta_1}{v_1} = \frac{\text{sen}\theta_2}{v_2} \quad (13)$$

Teniendo en cuenta en la ecuación (13) que  $v_1 = \frac{c}{n_1}$  y

$v_2 = \frac{c}{n_2}$  llegamos al resultado

$$n_1 \text{sen}\theta_1 = n_2 \text{sen}\theta_2 \quad (14)$$

La cual es la ley de la refracción de Snell.

## 5. Conclusiones

En las dos secciones anteriores hemos obtenido la ley de Snell a partir del principio de Fermat y del principio de Huygens, lo cual muestra la equivalencia de estos dos principios en el contexto de la óptica geométrica. Como los dos principios operan en un mismo campo de la Física decimos que ellos son *similes estructurales* (término acuñado por los autores).

El término *simil estructural* se refiere a que dos principios, aparentemente distintos, dan cuenta de un mismo efecto, que en este caso es la ley de Snell.

En otros campos de la Física se pueden encontrar ejemplos de *similes estructurales*. Veamos:

- 1) El Principio de D'Alembert y el Principio de Hamilton en la formulación Lagrangeana de la Mecánica (Goldstein 2002).
- 2) El principio de conservación de la energía y las leyes de Kirchhoff en circuitos eléctricos (Halliday 1994).
- 3) La mecánica ondulatoria de Schrodinger y la mecánica matricial de Heisenberg en la Mecánica Cuántica (Cohen et al. 1977).

## Referentes Bibliográficos

Cohen, C. et al. 1977. *Quantum Mechanics*. Vol. 1. Londres: John Wiley.

Corben, H. C., and P. Sthele. 1994. *Classical Mechanics*. New York: Dover Publications..

Duit, R. Y., and J. Wilbers. 2000. *On the benefits and pitfalls of analogies in teaching and learning physics*. Paris: Physics Teacher Education Beyond.

Fernández, I. et al. 2002. Visiones deformadas de la ciencia transmitidas por la enseñanza. *Revista Enseñanza de las Ciencias* 20, No. 3: 477-88.

Goldstein, H. et al. 2002. *Classical Mechanics*. Tercera ed. México: Addison Wesley.

González, H. et al. "El uso de analogías para fortalecer el pensamiento creativo". *Encuentro Nacional de Grupos de Investigación registrados y reconocidos por Colciencias en el área de Educación*. Neiva, Mayo de 2008.

González, M. J. 1997. *Aprendizaje por analogías: análisis de procesos de inferencia analógica para la adquisición de nuevos conocimientos*. Madrid: Trotta.

Halliday, D. et al. 1994. *Física*. Cuarta ed. México: Cecsca.

Hecht, E. 2000. *Optica*. Addison Wesley Iberoamericana. México D.F.

Linares, R., y M. Izquierdo. 2006. El rescate de la princesa encerrada en lo más alto de la torre: un episodio para aprender sobre analogías, símiles y metáforas. *Revista del Hombre y la Máquina* 27 (Julio-Diciembre): 24-36.

Moro, R. et al. 2007. Aprendizaje de los conceptos de masa, peso y gravedad. Investigación de la efectividad de un modelo analógico. *Revista Eureka sobre enseñanza y divulgación de las ciencias* 4, No. 2: 477-88.

Oliva, J. M. et al. 2001. "Una propuesta didáctica basada en la investigación para el uso de analogías en la enseñanza de las ciencias". *Revista Enseñanza de las Ciencias* 19, No. 3 (Septiembre-Diciembre): 453-70.

Tipler, P. A. 1999. *Physics for scientists and engineers*. Cuarta ed. New York: W.H. Freeman and Company.

Tippens, P. E. 1996. *Física: conceptos y aplicaciones*. México D.F.: McGraw-Hill.