

UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN

Enrique Guzmán y Valle

*Alma Máter del Magisterio Nacional*

FACULTAD DE CIENCIAS

Escuela Profesional de Ciencias Naturales



**MONOGRAFÍA**

**Interferencia, difracción y polarización de la luz**

- 1.- Interferencia y difracción de ondas luminosas.**
- 2.- Interferencia por dos ranuras. Longitud de onda de la luz natural y láser.**
- 3.- Interferencia en películas delgadas.**
- 4.- Difracción de la luz natural y láser por una rendija única.**
- 5.- Intensidad y amplitud de la luz difractada. Fasores**
- 6.- Difracción en una abertura circular**
- 7.- Difracción por una rejilla.**
- 8.- Polarización de la luz por reflexión. Láminas polarizadoras.**
- 9.- Polarización por doble refracción. Polarización circular.**

Examen de Suficiencia Profesional Res. N° 0739-2018-D-FAC

Presentada por:

**Gomez Pardave, Carlos Guillermo**

Para optar al Título Profesional de Licenciado en Educación

Especialidad: A.P. Física - A.S. Matemática

Lima, Perú

2018

**MONOGRAFÍA****Interferencia, difracción y polarización de la luz**

- 1.- Interferencia y difracción de ondas luminosas.**
- 2.- Interferencia por dos ranuras. Longitud de onda de la luz natural y láser.**
- 3.- Interferencia en películas delgadas.**
- 4.- Difracción de la luz natural y láser por una rendija única.**
- 5.- Intensidad y amplitud de la luz difractada. Fasores**
- 6.- Difracción en una abertura circular**
- 7.- Difracción por una rejilla.**
- 8.- Polarización de la luz por reflexión. Láminas polarizadoras.**
- 9.- Polarización por doble refracción. Polarización circular.**

Designación de Jurado Resolución N° 0739-2018-D-FAC



.....  
**Dr. Marzano Sosa, Roberto Fabián**

Presidente



.....  
**Prof. Hernández Alcántara, Walter Alberto**

Secretario



.....  
**Lic. Cuadros Cárdenas, Pablo Emilio**

Vocal

Línea de investigación: Educación experimental en sistemas bióticos y abióticos

### Dedicatoria

A los seres que inspiran a seguir desarrollándome como persona: mis padres, mis hermanos y mi familia en general.

## Índice de contenidos

Portada.....	i
Hoja de firmas de jurado.....	ii
Dedicatoria.....	iii
Índice de contenidos.....	iv
Lista de figuras.....	vi
Introducción.....	ix
Capítulo I. Interferencia y difracción de ondas luminosas .....	10
1.1 Interferencia destructiva.....	10
1.2 Interferencia constructiva.....	11
Capítulo II. Difracción.....	12
2.1 Difracción de ondas luminosas.....	12
2.2 Interferencia por 2 ranuras.....	15
2.2.1 Experimento de la doble rendija de Young .....	15
2.2.2 Obtenciones de las posiciones de las franjas brillantes .....	17
2.3 Interferencia en películas delgadas.....	20
2.3.1 Difracción de la luz natural y láser por una rendija única.....	28
2. 3.1.1 Difracción de la luz láser .....	28
2.4 Intensidad y amplitud de la luz difractada.....	31
2.4.1 Mínimos de intensidad.....	36
2.4.2 Máximos secundarios .....	37
2.5 Difraccion de una abertura circular .....	38
2.6 Difraccion por una rejilla.....	40
Capítulo III. Polarización de la luz.....	42
3.1 Polarizacion de la luz por reflexión.....	42

3.2 Láminas polarizadoras .....	43
3.3 Polarización doble refracción .....	45
3.4 Polarización circular .....	47
Aplicación didáctica .....	48
Síntesis.....	57
Apreciación crítica y sugerencias.....	58
Referencias.....	59
Apéndice.....	60

## Lista de figuras

Figura 1. Viaje de dos pulsos.....	10
Figura 2. Interferencia destructiva.....	11
Figura 3. Interferencia constructiva.....	11
Figura 4. Difracción producida por láser rojo sobre una rendija estrecha.....	13
Figura 5. Difracción producida por un láser rojo sobre un agujero circular.....	13
Figura 6. Difracción obtenida al incidir un punto de láser sobre una doble rendija.....	14
Figura 7. La difracción, una interferencia de un gran número de fuentes coherentes .....	14
Figura 8. Difracción de Fraunhofer.....	15
Figura 9. Experimento de la doble rendija de Young.....	15
Figura 10. Descripción cualitativa del experimento de Young .....	16
Figura 11. Obtenciones de las posiciones de franjas brillantes.....	17
Figura 12. Patrón de experimentos de Young .....	17
Figura 13. Intensidad de una rendija rectangular angosta de ancho $a$ .....	18
Figura 14. Patrón de interferencia de Young.....	18
Figura 15. Máximo central de difracción .....	19
Figura 16. Fórmula para calcular el número de franjas brillantes.....	19
Figura 17. Fórmula para calcular el número de franjas brillantes de interferencia.....	20
Figura 18. Fórmula de resultado final.....	20
Figura 19. Ecuación para interferencia constructiva .....	21
Figura 20. Ecuación para la diferencia de caminos ópticos.....	21
Figura 21. Índice de refracción.....	22
Figura 22. Resultado de índice de refracción.....	22
Figura 23. Escena física.....	22

Figura 24. Condición para interferencia constructiva.....	23
Figura 25. Condición para interferencia destructiva.....	23
Figura 26. Condición para interferencia constructiva con espesor $e$ .....	24
Figura 27. Condición para interferencia destructiva con espesor $e$ .....	24
Figura 28. Cuña lineal.....	25
Figura 29. Condición para interferencia constructiva.....	26
Figura 30. Condición para interferencia destructiva.....	26
Figura 31. Fórmula para los anillos de Newton.....	26
Figura 32. Fenómeno de los anillos de Newton.....	27
Figura 33. Condición para interferencia constructiva.....	27
Figura 34. Difracción de la luz láser.....	29
Figura 35. Arco de la circunferencia de radio $r$ .....	30
Figura 36. Fórmula para longitud de cuerda.....	30
Figura 37. Resultado, simplificando el radio.....	30
Figura 38. Cuadro de amplitudes.....	31
Figura 39. Intensidad y amplitud de la luz difractada.....	32
Figura 40. Máximo central.....	33
Figura 41. Ecuación de intensidad nula.....	33
Figura 42. Intensidad del máximo central.....	34
Figura 43. Ecuación de intensidad del máximo central.....	34
Figura 44. La intensidad es la máxima posible.....	35
Figura 45. Fórmula máximo central.....	35
Figura 46. Patrón de interferencia sobre la pantalla.....	35
Figura 47. Máxima intensidad producida por el ancho de una rendija.....	36
Figura 48. Difracción de Fraunhofer en rendija angosta.....	36

Figura 49. Máximos secundarios.....	37
Figura 50. Se observa en la figura los máximos secundarios.....	37
Figura 51. Intensidad en posición $x=200$ .....	38
Figura 52. Difracción de una abertura circular.....	39
Figura 53. Ecuación de la circunferencia.....	39
Figura 54. Ecuación de irradiancia.....	40
Figura 55. Rejillas de difracción.....	41
Figura 56. Luz incidente.....	42
Figura 57. Campo eléctrico del rayo refractado.....	43
Figura 58. Láminas polarizadoras cruzadas perpendicularmente no permiten pasar la luz.....	44
Figura 59. Exposición y enfoque manual.....	44
Figura 60. Polarización por doble refracción.....	45
Figura 61. Luz incidente.....	46
Figura 62. Efecto neto.....	46
Figura 63. Luz polarizada.....	47

## **Introducción**

Como parte del avance de la ciencia y por cultura general, hemos escuchado a nuestros maestros decir que las ondas electromagnéticas no requieren un medio de transporte para poder propagarse; es decir, dichas ondas atraviesan los espacios interplanetarios, pudiendo llegar a la tierra desde el sol y demás estrellas del firmamento sin importar su frecuencia o su longitud de onda.

La investigación monográfica está dividida en cuatro capítulos: el capítulo I desarrolla aspectos de interferencia, difracción de la luz; el capítulo II explica sobre la dispersión de ondas luminosas; el capítulo III se refiere a la polarización de la luz; luego, la aplicación didáctica a través de una sesión de aprendizaje. Finalmente, tenemos la síntesis y conclusiones, apreciación crítica y sugerencias, referencias y apéndices.

## Capítulo I

### Interferencia y difracción de ondas luminosas

Las ondas pueden adicionarse constructivamente o de manera destructiva. Ribeiro y Alvarenga (2010) afirman que “en una figura de interferencia se observan líneas nodales, constituidas por puntos permanentemente en reposo llamadas interferencias destructivas, y crestas dobles y valles dobles llamadas interferencias constructivas, se propagan en líneas nodales” (p. 738).

#### 1.1 Interferencia destructiva

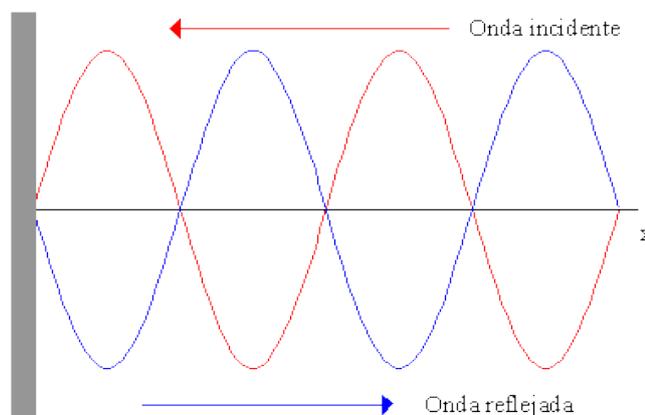


Figura 1. Viaje de dos pulsos. Fuente: Autoría propia.

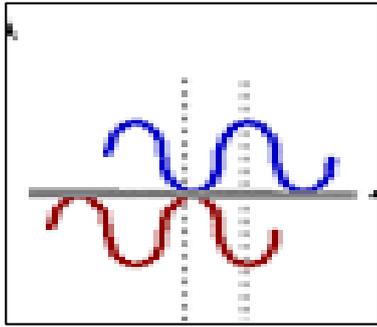


Figura 2. Interferencia destructiva.  
Fuente: Autoría propia.

## 1.2 Interferencia constructiva

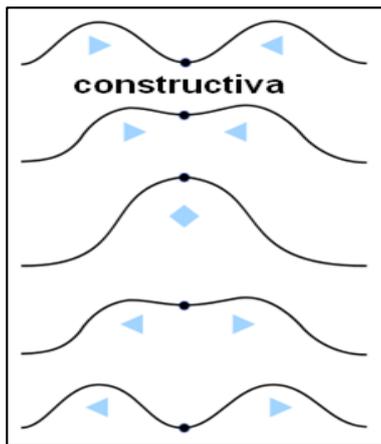


Figura 3. Interferencia constructiva.  
Fuente: Autoría propia.

Este fenómeno también ocurre en las ondas luminosas siempre y cuando respetemos las siguientes condiciones:

“Las fuentes tienen que ser monocromáticas, esto quiere decir solo una longitud de onda, debe haber coherencia en las fuentes, esto quiere decir mantener una fase constante” (Ribeiro y Alvarenga, 2010, p. 23).

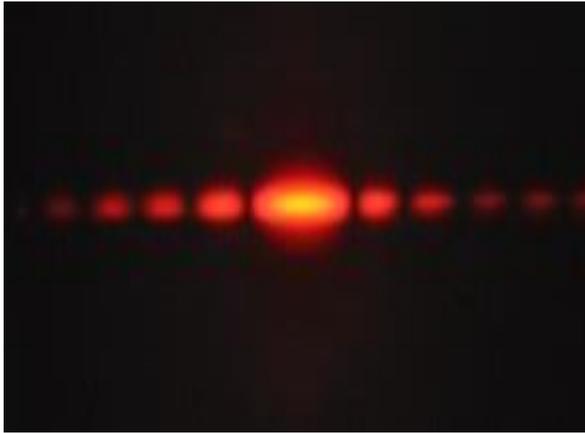
## **Capítulo II**

### **Difracción**

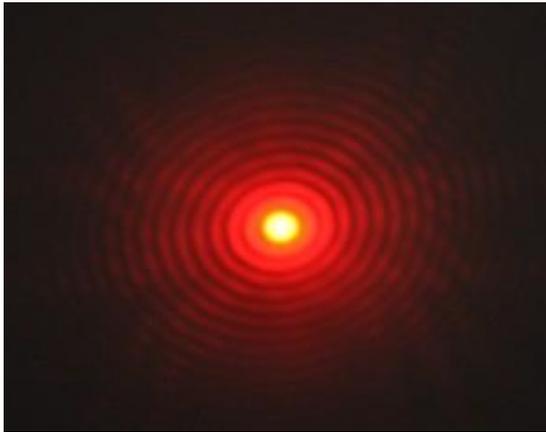
#### **2.1 Difracción de ondas luminosas**

Fresnel refiere que la difracción en las ondas luminosas se da cuando hay obstáculos en su camino, dichos obstáculos son minúsculos, es decir, si tenemos un orificio de las dimensiones de la longitud de una onda, la luz se propaga. Solo es apreciable en minuciosos objetos. Pongamos un ejemplo: un agujero de minúsculas dimensiones, algo así como el agujero de una aguja pequeña. Cuando logramos incidir sobre dicho agujero un láser (Young, 1801).

Todos los puntos que están ubicados alrededor del agujero se transforman en fuentes de ondas que interfieren entre ella produciendo lugares donde se aprecia la luz, es decir, interferencia constructiva y también zonas donde no se puede apreciar la luz; en otras palabras, interferencia destructiva. Por lo tanto, la difracción se produce por la interferencia de un número elevadísimo de fuentes (Young, 1801).



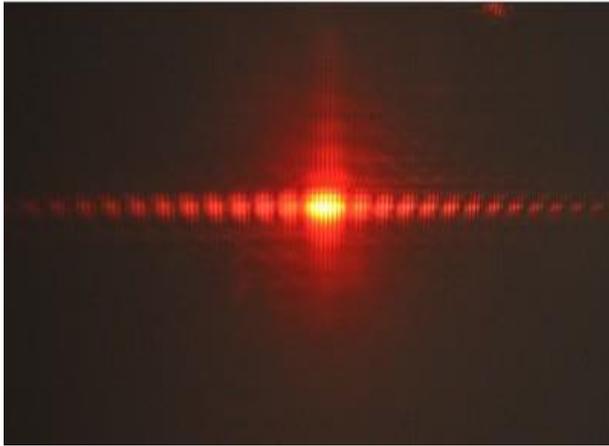
*Figura 4.* Difracción producida por láser rojo sobre una rendija estrecha. Fuente: Autoría propia.



*Figura 5.* Difracción producida por láser rojo sobre un agujero circular. Fuente: Autoría propia.

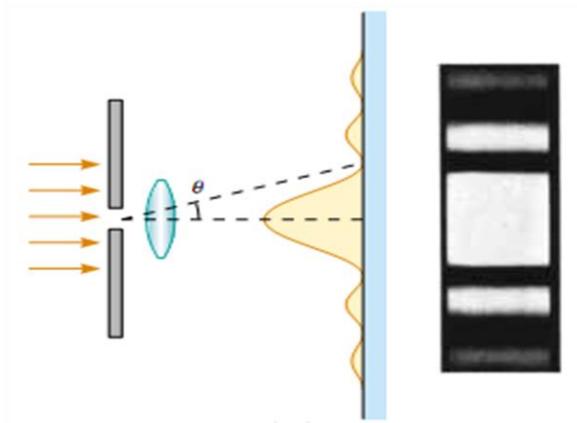
En la imagen se puede observar el centro iluminado con gran intensidad y, a su vez, los círculos a su alrededor de manera iluminada y oscura. Se dice que las zonas iluminadas son producidas por interferencia constructiva, pero va descendiendo poco a poco a medida que nos alejamos del centro.

En la experiencia de doble rendija se sobreponen tanto interferencia y difracción, de manera que la difracción produce interferencia, resultando así la teoría de máximos y mínimos con semejante intensidad y equivalente espaciado, obteniendo un central máximo brillante y a su alrededor lugares de luz y sombra que disminuye su intensidad acorde al patrón de difracción que le compete (Young, 1801, párr. 6).



*Figura 6.* Difracción obtenida al incidir un punto de láser sobre una doble rendija: Autoría propia.

El gráfico observado (ver figura 6) ha sido establecido por difracción de ondas. En los lugares con brillo (difracción) se puede apreciar líneas verticales oscuras y luminosas de forma alternada, esto se debe a la interferencia de ondas.



*Figura 7.* La difracción, una interferencia de un gran número de fuentes coherentes. Fuente: Difracción e Interferencia de ondas luminosas, 2018.

La luz emitida por una fuente es desviada de su trayectoria, de tal manera que entra en el de otra línea produciendo sombra. Este tipo de práctica es considerada la difracción de Fraunhofer, cuyos rayos de luz que inciden lo hacen en rectas paralelas; sin embargo, se debe considerar que la distancia de la fuente hacia la pantalla debe ser mínima, lo que coincide con lo establecido (Young, 1801).

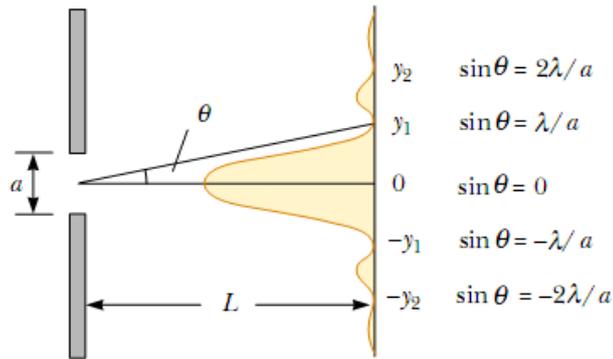


Figura 8. Difracción de Fraunhofer. Fuente: Difracción e Interferencia de ondas luminosa, 2018.

Interferencia y difracción, en dichos conceptos no se encuentra diferencia entre la difracción y la interferencia de ondas. Se puede decir que usamos el término interferencia cuando la cantidad de fuentes que intervienen es realmente pequeña (cuantitativo); sin embargo, el término de difracción es cuando la cantidad de fuentes es continua, no es contable.

## 2.2 Interferencia por 2 ranuras

### 2.2.1 Experimento de la doble rendija de Young.

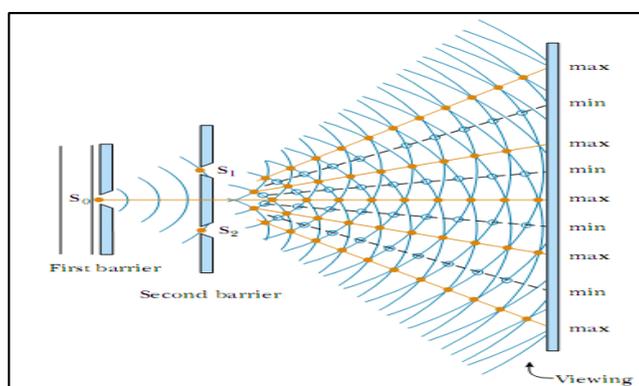


Figura 9. Experimento de la doble rendija de Young. Fuente: Difracción e Interferencia de ondas luminosas, 2018.

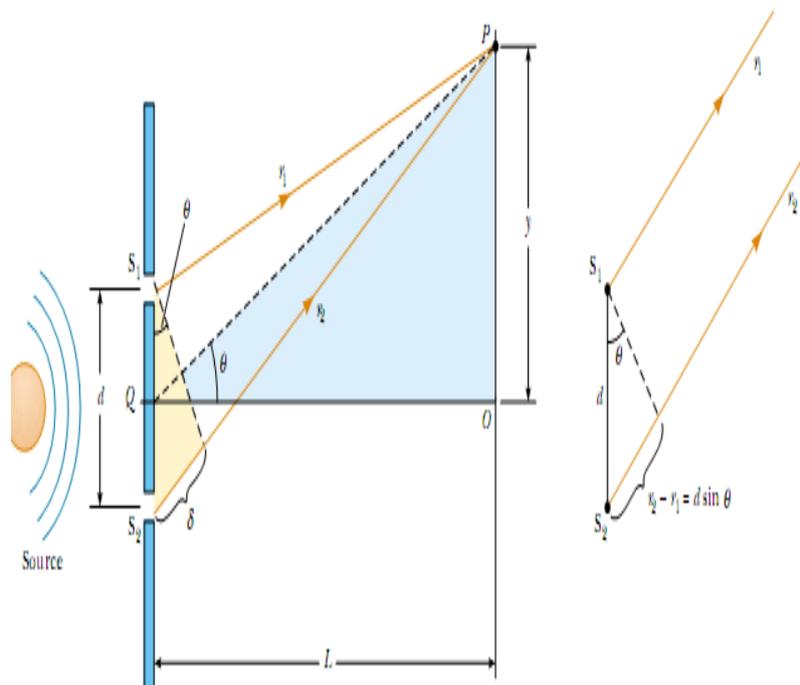


Figura 10. Descripción cualitativa del experimento de Young. Fuente: Difracción e Interferencia de ondas luminosa, 2018.

Sea  $\delta$  = diferencia de recorrido =  $r_2 - r_1$ . Esta ecuación supone que  $r_1$  y  $r_2$  muestran paralelismo y  $L \gg d$ . La diferencia de dichas trayectorias comprueba en  $\theta$ , las ondas  $r_1$  y  $r_2$  estarán en fase al llegar a P.

Si dicha diferencia de trayectoria es nula o múltiplo de una longitud de onda, entonces las ondas estarán en fase al llegar a P produciendo interferencia constructiva. Por tanto, las zonas brillantes o interferencias constructivas en P son:  $\delta = m\lambda = d \sin\theta$ ;  $m \in \mathbf{Z}$ , siendo “m” el número de orden. La franja brillante central en  $\theta = 0$  ( $m = 0$ ), recibiendo un nombre de máximo de orden cero (Young, 1801).

Sin embargo, si dicha diferencia de trayectoria es un múltiplo impar de  $(\lambda/2)$ , entonces las dos ondas al llegar a P estarán  $\pi$  radianes. Se dice entonces que dichas ondas están en desfase, dando origen a una interferencia destructiva:  $\delta = (2m + 1)\lambda = (m + 1/2)\lambda = d \sin\theta$ ;  $m \in \mathbf{Z}$ . (Young, 1801).

### 2.2.2 Obtenciones de las posiciones de las franjas brillantes.

Si  $L \gg d$ ,  $d \gg \lambda$ , implica que el ángulo es muy pequeño, entonces  $\text{sen } \theta \approx \text{tg } \theta$

, ahora

$$y_{\text{brillante}} = l \text{ sen } \theta \text{ pero } d \text{ sen } \theta = m \lambda$$

$$\text{sen } \theta = (m \lambda) / d$$

Luego

$$y_{\text{brillante}} = l (m \lambda) / d$$

Para las oscuras se tiene que

$$y_{\text{oscuro}} = l \text{ sen } \theta \text{ pero } d \text{ sen } \theta = (m + 1/2) \lambda$$

$$\text{sen } \theta = (m + 1/2) \lambda / d$$

*Figura 11.* Obtenciones de las posiciones de las franjas brillantes. Fuente: Difracción e Interferencia de ondas luminosas, 2018.

Al analizar la interferencia producida por dos rendijas se asume que el estrecho de las rendijas eran lo suficiente para que las ondas que inciden, puedan ser consideradas que se produjeron por fuentes constantes; no obstante, dicha condición, en la práctica muy difícilmente ocurre. Así que, al analizar la interferencia producida por dos, sabiendo que el ancho de cada rendija es mayor que la longitud de onda de la luz, entonces cada una de las rendijas emite difracción, lo que se observa en la pantalla es la consecuencia de la superposición ondas difractadas (Young, 1801).

$$I = 4I_0 \cos^2 \left( \frac{\Delta \phi}{2} \right)$$

A su vez,

$$\Delta \phi = \frac{2\pi b \text{ sen } \theta}{\lambda}$$

*Figura 12.* Patrón de experimento de Young. Fuente: Difracción e Interferencia de ondas luminosas, 2018.

Se expuso que, al tener una rendija estrecha, rectangular y de ancho “a”, es decir su intensidad en el punto P (en la pantalla) está determinada por la siguiente imagen (Young, 1801).

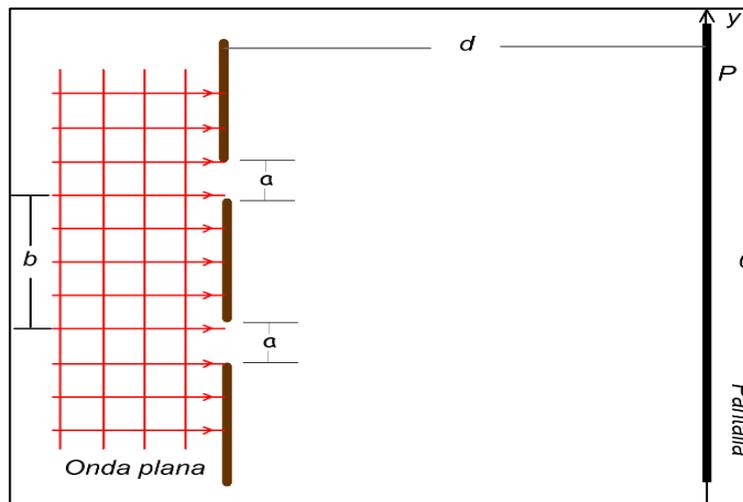


Figura 13. Intensidad de una rendija rectangular angosta de ancho a.  
Fuente: Difracción e Interferencia de ondas luminosas, 2018.

Al tener dos rendijas rectangulares estrechas teniendo un ancho “a” estando separadas por la distancia “b” (observar la figura 13), observamos que la repartición de espacios de las franjas corresponde a la interferencia de Young y la intensidad de cada franja depende de la difracción en la rendija rectangular.

Consecuentemente, dicha intensidad resultante pertenece a la que propuso: “se emite la intensidad por el patrón de difracción que en la rendija rectangular se produce” (Young, 1801, p. 2). Así:

$$I_p(\theta) = 4I_o \left[ \frac{\text{sen}\left(\frac{\pi a \text{sen}\theta}{\lambda}\right)}{\frac{\pi a \text{sen}\theta}{\lambda}} \right]^2 \cos^2\left(\frac{\pi b \text{sen}\theta}{\lambda}\right)$$

Figura 14. Patrón de interferencia de Young. Fuente: Difracción e Interferencia de ondas luminosa, 2018.

Dicho resultado explica la razón de la disminución de intensidad en las franjas a medida que nos vamos distanciando del centro de la pantalla.

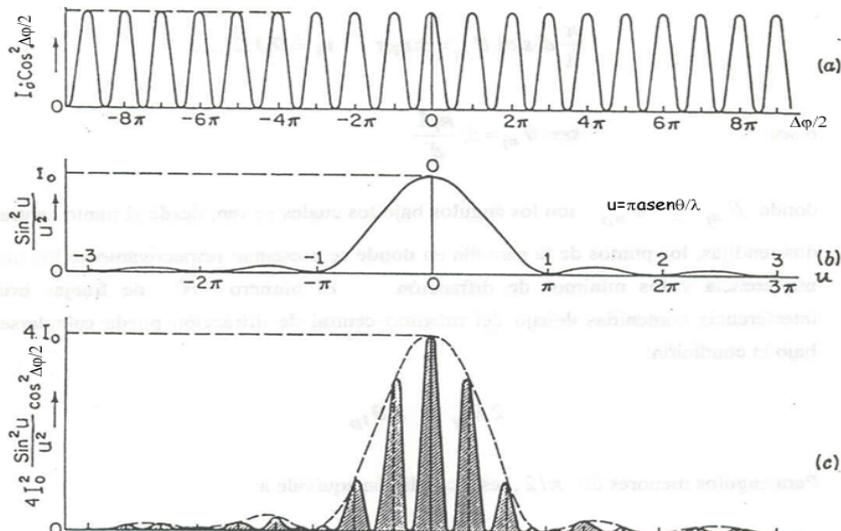


Figura 15. Máximo central de difracción. Fuente: Difracción e Interferencia de ondas luminosas, 2018.

Al ver la figura 15 evidenciamos que las franjas son más brillantes cuando están cerca a la pantalla central; a su vez, observamos franjas cuya intensidad va disminuyendo a medida que nos vamos alejando de dicha pantalla central, esto es, la mayor difracción se da en el centro de la pantalla.

Asimismo, podemos calcular la cantidad de franjas brillantes de interferencia concentradas dentro de la pantalla “máximo de difracción”, consideramos a su vez que los primeros mínimos se producen por  $u = \pm\pi$ , es decir:

$$\frac{\pi}{\lambda} a \sin\theta_{1D} = \pm\pi$$

Obteniéndose,

$$\sin\theta_{1D} = \pm \frac{\lambda}{a}$$

Figura 16. Fórmula para calcular el número de franjas brillantes. Fuente: Difracción e Interferencia de ondas luminosa, 2018.

Por otro lado, se puede calcular los máximos de interferencia mediante la siguiente ecuación.

$$\frac{\pi}{\lambda} b \operatorname{sen} \theta_{n_i} = \pm n_i \pi \quad \text{con } n_i = 0, 1, 2, \dots$$

$$\operatorname{sen} \theta_{n_i} = \pm \frac{n_i \lambda}{b}$$

Figura 17. Fórmula para calcular el número de franjas brillantes de interferencia. Fuente: Difracción e Interferencia de ondas luminosas, 2018.

Donde  $\theta_{n_i}$  y  $\theta_{n_D}$  son ángulos que permiten observar desde el centro de las dos rendijas los máximos de interferencia y, a su vez, los mínimos de difracción. También se puede calcular el número de franjas brillantes que se encuentran debajo del máximo central por la siguiente condición:  $2\theta_{n_i} = 2\theta_{n_D}$  (Young, 1801).

Para ángulos menores de  $\pi/2$  esta condición es igual a,  $2\operatorname{sen} \theta_{n_i} = 2\operatorname{sen} \theta_{n_D}$ ,

de donde obtenemos,  $\pm \frac{n_i \lambda}{b} = \pm \frac{\lambda}{a}$  o sea,  $n_i = \frac{b}{a}$ . Evidentemente, el número N es igual a

$2n_i + 1$ , dado que habrá  $n_i$  franjas brillantes de interferencia al lado derecho y al lado izquierdo de la franja central:

$$N = 2n_i + 1 = 2 \frac{b}{a} + 1$$

Figura 18. Fórmula de resultado final. Fuente: Difracción e Interferencia de ondas luminosas, 2018.

### 2.3 Interferencia en películas delgadas

Otra técnica de cómo conseguir fuentes que estén en fase teniendo como base una fuente de luz proveniente del sol es reflejando la luz solar sobre planos de películas delgadas.

Este caso se considera que sucede por división en la amplitud de onda, es decir, la onda que ingresa se refleja en la primera superficie, pero también en la segunda superficie; en otras palabras, existe refracción en la primera capa y reflexión en la segunda capa. Pueden ser también tres medios, siendo sus índices de refracción  $n_1$ ,  $n_2$  y  $n_3$  separados por capas pequeñísimas, asumimos también que en la capa medio se tiene como espesor a “e”, siendo “e” una dimensión similar a la longitud de la luz.

Una manera de poder identificar la interferencia, tanto constructiva como destructiva, es sin lugar a dudas recordando las ecuaciones básicas de interferencia de ondas (Young, 1801).

$$\Delta \ell = m \lambda_o \quad \text{siendo } m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

*Figura 19.* Ecuación para interferencia constructiva. Fuente: Difracción e Interferencia de ondas luminosas, 2018.

“Cuando los caminos ópticos (asumiéndolos en condiciones normales) de los rayos que inciden en la primera y segunda superficie hasta llegar a la pantalla proyectada en un punto P, siendo dicha pantalla nuestra propia retina o algún sensor de cámara” (Ribeiro y Alvarenga, 2010, p. 746). es:

$$\Delta l = [n\Delta l = n_1 AB + n_2 BC + \Lambda_2 + n_2 CD + n_1 DP] - [n_1 AB + \Lambda_1 + n_1 B$$

*Figura 20.* Ecuación para la diferencia de caminos ópticos. Fuente: Difracción e Interferencia de ondas luminosas, 2018.

En este contexto,  $\Lambda_2$  y  $\Lambda_1$  pertenecen a ciertos incrementos dados en la trayectoria óptica que realiza la luz en el momento de las reflexiones superficiales, el incremento de lo observado se dará cuando los rayos de luminosos entran desde un medio con menor índice de refracción hacia otro de mayor índice. Dicho lo siguiente, conlleva a un incremento de fase igual a  $\pi$  (Young, 1801).

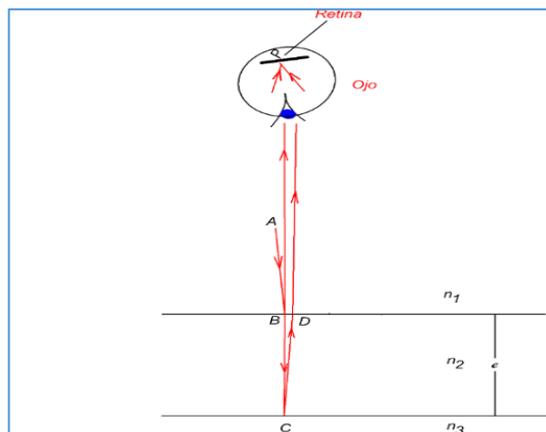


Figura 21. Índice de refracción. Fuente: Difracción e Interferencia de ondas luminosas, 2018.

$$\Delta \ell = 2n_2 e + (\Lambda_2 - \Lambda_1)$$

Figura 22. Resultado de índice de refracción. Fuente: Difracción e Interferencia de ondas luminosa, 2018.

Ejemplo: Explicar el fenómeno producido al incidir ondas luminosas con longitud de onda en el vacío  $\lambda_0$  teniendo dirección perpendicular y con índice de refracción  $n_1$  que ingresa a una película delgada cuyo espesor es “e” cuyo índice de refracción  $n_2$  está dentro de un sustrato cuyo índice de refracción es  $n_3$ , siendo  $n_1 < n_2 < n_3$ , hallar interferencia constructiva en la luz reflejada con espesor igual a ,  $e = \frac{m\lambda_0}{2n_2}$  siendo  $m = 1; 2; 3; \dots$  a su vez, hallar interferencia destructiva con espesor igual a ,  $e = m' \frac{m\lambda_0}{4n_2}$  siendo  $m = 1; 3; 5; \dots$

Solución: en la siguiente figura ilustramos la escena pedida.

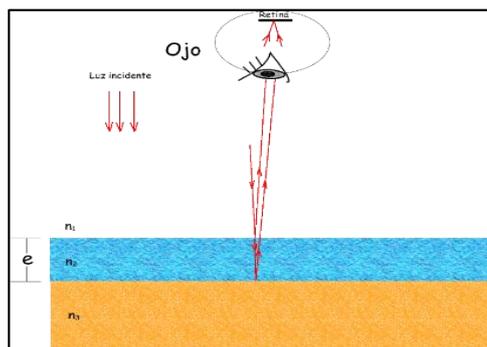


Figura 23. Escena física. Fuente: Difracción e Interferencia de ondas luminosas, 2018.

“Debido a la reflexión en la primera y segunda superficie, en este caso se obtiene,

$\Lambda_1 = \frac{\lambda_0}{2}$ ,  $\Lambda_2 = \frac{\lambda_0}{2}$  siendo consecuencia luego  $\Delta l = 2n_2e$ ”. (Ribeiro y Alvarenga, 2010, p.

781). Entonces, se constata para la interferencia constructiva:

$$\Delta l = m \lambda_0 \text{ siendo } m = 0; \pm 1; \pm 2; \dots$$

Figura 24. Condición para interferencia constructiva. Fuente: Difracción e Interferencia de ondas luminosas, 2018.

Se puede decir que habiendo interferencia constructiva en películas delgadas es necesario cumplir con  $m = 1, 2, 3, \dots$ . Observamos que  $m$  no posee valores negativos debido a que, si los tuviesen entonces los espesores evidenciarían espesor negativo en la película, lo cual no tiene sentido en física. A su vez, no tomamos en cuenta el valor cero debido a que pertenecería a un espesor nulo. La condición para interferencia destructiva es,

$$\Delta \ell = m' \frac{\lambda_0}{2} \quad \text{con } m' = \pm 1, \pm 3, \dots$$

Figura 25. Condición para interferencia destructiva. Fuente: Difracción e Interferencia de ondas luminosas, 2018.

“Por lo tanto, existirá interferencia destructiva en películas delgadas cuyos espesores sean:  $e = m' \frac{m\lambda_0}{4n_2}$  siendo  $m = 1; 3; 5; \dots$ . De igual manera, no se tiene en cuenta para  $m$  los valores negativos por las razones dadas anteriormente” (Ribeiro y Alvarenga, 2010, p. 781).

Ejemplo: Evidenciar que al incidir ondas de luz con longitud en el vacío  $\lambda_0$  con dirección casi perpendicular desde un medio cuyo índice de refracción es  $n_1$  sobre una película delgada cuyo espesor es  $e$ , teniendo como índice de refracción  $n_2$  en un sustrato con índice de refracción  $n_3$ , siendo  $n_1 < n_2$  y  $n_2 > n_3$ , la luz reflejada poseerá interferencia constructiva teniendo las películas delgadas un espesor igual a:

$e = (2m + 1) \frac{\lambda_0}{4n_2}$  siendo  $m = 1; 2; 3; \dots$  luego interferencias destructivas en

películas delgadas cuyo espesor sea:  $e = (m' + 1) \frac{\lambda_0}{4n_2}$  siendo  $m' = 1; 3; 5; \dots$

Resolvemos: Al observar la figura 23 se evidencia la escena física. Siendo así que para la reflexiones primera y segunda tenemos:  $\Lambda_1 = \frac{\lambda_0}{2}$ ,  $\Lambda_2 = 0$ . Obteniendo así:

$\Delta l = 2n_2e - \frac{\lambda_0}{2}$ , Para lo cual la ecuación de la interferencia constructiva es:

$$\Delta l = m \lambda_0 \quad \text{con } m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Figura 26. Condición para interferencia constructiva con espesor  $e$ . Fuente: Difracción e Interferencia de ondas luminosas, 2018.

Entonces, se puede afirmar que existirá interferencia constructiva cuando los espesores de las películas delgadas tengan de espesor “a” y para la interferencia destructiva:

$$\Delta l = m' \frac{\lambda_0}{2} \quad \text{con } m' = \pm 1, \pm 3, \dots$$

Figura 27. Condición para interferencia destructiva con espesor  $e$ . Fuente: Difracción e Interferencia de ondas luminosas, 2018.

Ejemplo: Se desea recubrir una placa plana de vidrio ( $n = 1,50$ ) con un material transparente ( $n = 1,25$ ) de tal modo que no refleje la luz de 620 nm de longitud de onda (en el vacío) que incide normalmente. ¿Qué espesor mínimo tendría el recubrimiento?

La luz incide desde el aire. La película delgada es el material transparente de índice 1,25 que se depositará sobre el vidrio de índice 1,50. Para no reflexión la condición es de

interferencia destructiva que, según ese ejemplo, es,  $e = m' \frac{\lambda_0}{4n_2}$  con  $m' = 1, 3, 5, \dots$  Es

decir que el mínimo espesor es, 
$$e = \frac{\lambda_o}{4n_2}$$
 Reemplazando  $n_2 = 1,25$  y  $\lambda_o = 620 \text{ nm}$  se obtiene,  $e = 124 \text{ nm}$  (Difracción e Interferencia de ondas luminosas, 2018).

Ejemplo: “Una cuña de aire formada por dos láminas de vidrio de índice  $n$  forman un ángulo muy pequeño, Si incide luz de longitud de onda en el vacío  $\lambda_o$  demostrar que las franjas brillantes están ubicadas (Difracción e Interferencia de ondas luminosas, 2018).

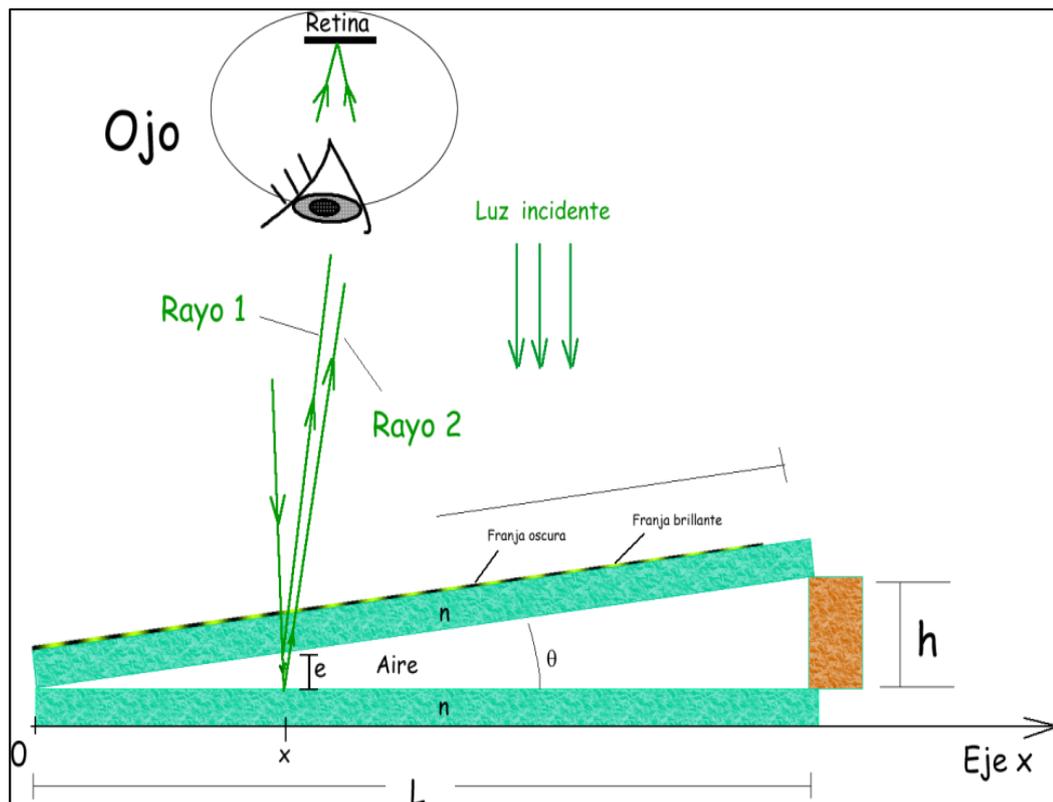


Figura 28. Cuña lineal. Fuente: Difracción e Interferencia de ondas luminosas, 2018.

Resolvemos: En este caso, debido a la reflexión en la primera y segunda superficies, se tiene,  $\Lambda_1 = 0$   $\Lambda_2 = \frac{\lambda_o}{2}$  Y, por lo tanto, la ecuación se convierte en,

$$\Delta l = 2n_2 e + \frac{\lambda_o}{2}$$
 . El espesor  $e$  es variable y se puede expresar como, 
$$e = \frac{h x}{L}$$
 Y, por lo

tanto,  $\Delta\ell = 2n_2 \frac{h x}{L} + \frac{\lambda_0}{2}$  (“Difracción e Interferencia de ondas luminosas”, 2018).

Teniendo entonces la ecuación para la interferencia constructiva:

$$\Delta\ell = m \lambda_0 \quad \text{con } m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Figura 29. Condición para interferencia constructiva. Fuente: Difracción e Interferencia de ondas luminosas, 2018.

$$\Delta\ell = m' \frac{\lambda_0}{2} \quad \text{con } m' = \pm 1, \pm 3, \dots$$

Figura 30. Condición para interferencia destructiva. Fuente: Difracción e Interferencia de ondas luminosas, 2018.

Ejemplo: el fenómeno de los anillos de Newton se produce por la reflexión de la luz entre una superficie plana y otra esférica, figura 32. Teniendo como fuente luz monocromática y longitud  $\lambda_0$ , se observa, a su vez, una cadena de anillos concéntricos alternando lo oscuro de lo brillante. Demostrar que los radios de los anillos brillantes cumplen,

$$r_{\max} = \left[ \left( m - \frac{1}{2} \right) \lambda R \right] \quad \text{con } m = 1, 2, 3, \dots$$

Figura 31. Fórmula para los anillos de Newton. Fuente: Difracción e Interferencia de ondas luminosas, 2018.

Resolvemos: Para la reflexión en la primera y segunda superficie se tiene,

$$\Delta_1 = 0, \quad \Delta_2 = \frac{\lambda_0}{2}.$$

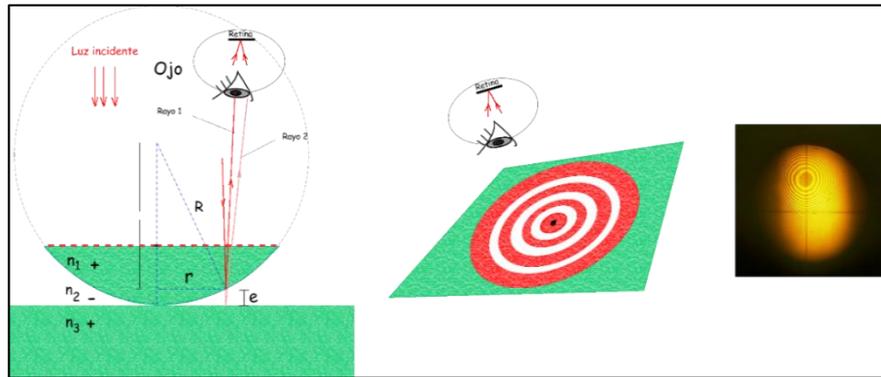


Figura 32. Fenómeno de los anillos de Newton. Fuente: Difracción e Interferencia de ondas luminosas, 2018.

Convertimos la ecuación en,  $\Delta\ell = 2n_2e + \frac{\lambda_o}{2}$ , Para el espesor que es variable lo

expresamos como,  $e = R - \sqrt{R^2 - r^2}$ , siendo  $r$  el radio de los anillos. Pero,  $r \ll R$ ,

$$e = R - R\sqrt{1 - \frac{r^2}{R^2}} \text{ así, } e \cong R - R\left[1 - \frac{1}{2}\frac{r^2}{R^2}\right] \cong \frac{1}{2}\frac{r^2}{R}. \text{ Por lo tanto, } \Delta\ell = 2n_2\left(\frac{1}{2}\frac{r^2}{R}\right) + \frac{\lambda_o}{2}$$

(“Difracción e Interferencia de ondas luminosas”, 2018). De esta forma la condición para interferencia constructiva es:

$$\Delta\ell = m \lambda_o \quad \text{con } m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Figura 33. Condición para interferencia constructiva. Fuente: Difracción e Interferencia de ondas luminosas, 2018.

Es decir, el valor “ $r$ ” de los anillos brillantes es,

$$r_{\max} = \left[ \left( m - \frac{1}{2} \right) \frac{\lambda_o}{n} R \right]^{\frac{1}{2}} \text{ con } m = 1, 2, 3 \dots$$

$$r_{\max} = \left[ \left( m - \frac{1}{2} \right) \lambda R \right]^{\frac{1}{2}} \text{ con } m = 1, 2, 3 \dots$$

Observamos que  $r > 0$  cuando  $m = 1$ , emite que el centro es oscuro. También se concluye que el radio de la superficie curva debe ser muy grande para poder apreciar el

fenómeno, identificando las partes que alternan entre lo oscuro y lo brillante (“Difracción e Interferencia de ondas luminosas”, 2018).

### **2.3.1 Difracción de la luz natural y laser por una rendija única.**

#### ***2.3.1.1 Difracción de la luz láser.***

Young (1801) nos dice que la difracción en ondas es uno de los fenómenos más importantes que se produce por la interferencia constructiva o destructiva de las ondas, y sucede cuando en el camino de la onda se encuentra un obstáculo o rendija cuyas dimensiones son tan minúsculas como la longitud de una onda. Dicho obstáculo, que en ejemplo puede ser un pequeño objeto como hilo fino, pelo, etc., va interrumpiendo el paso de la onda; sin embargo, lo que hace la rendija es permitir el paso, pero a solo a una pequeña parte de la onda incidente.

Pero si utilizamos rendijas de forma rectangular donde sus aberturas son muy estrechas y hacemos pasar ondas monocromáticas, se observará, a una distancia totalmente grande una serie de líneas concentradas. Dicho fenómeno nos permite relacionar de manera matemática el ancho de la abertura que posee la rendija y a su vez, la longitud de onda que ingresa por dicha rendija. También, al irradiar varios obstáculos o rendijas, se produce el fenómeno de las ondas difractadas por las rendijas cuya demostración es observar una pantalla con líneas entrecortadas. Lo que permite que exista dicho fenómeno es interferencia de ondas que modula la difracción (Ribeiro y Alvarenga, 2010, p. 672).

Utilizaremos el patrón de difracción de varias rendijas para poder hallar el ancho que hay entre rendija y rendija. Utilizaremos rendijas dobles y algunas redes de difracción para que el fenómeno se pueda evidenciar.

El patrón que rige la difracción al iluminar una rendija con un láser se da por una serie de máximos y mínimos de intensidad que se puede realizar en un diagrama de

difracción. Consideraremos una rendija cuyo ancho es  $b$ , con ello podemos estudiar la intensidad que se obtiene en función al ángulo  $\theta$  respecto a la dirección de incidencia. La intensidad en el centro será mayor en dirección perpendicular ( $\sin\theta = 0$ ) e irá disminuyendo hasta llegar a cero, siendo el ángulo que depende de la anchura  $b$ , a su vez de la longitud de onda de la fuente monocromática. “En el caso límite, si la rendija es muy estrecha, no existen puntos de intensidad nula en el patrón y la rendija actúa como fuente de ondas cilíndricas” (Láser, 2018, párr. 3).

Según el principio de Huygens, al incidir una onda sobre una rendija, todos los puntos de su plano son convertidos en fuentes secundarias de ondas, produciendo así nuevas ondas llamadas ondas difractadas, a lo que la explicación del fenómeno de difracción no es cualitativo adverso a la interferencia. “Ya habiendo realizado constantes simulaciones de lo explicado, se puede explicar que la difracción se produce a partir de un número ilimitado de fuentes que interfieren entre sí” (Láser, 2018, párr.12).

#### Descripción

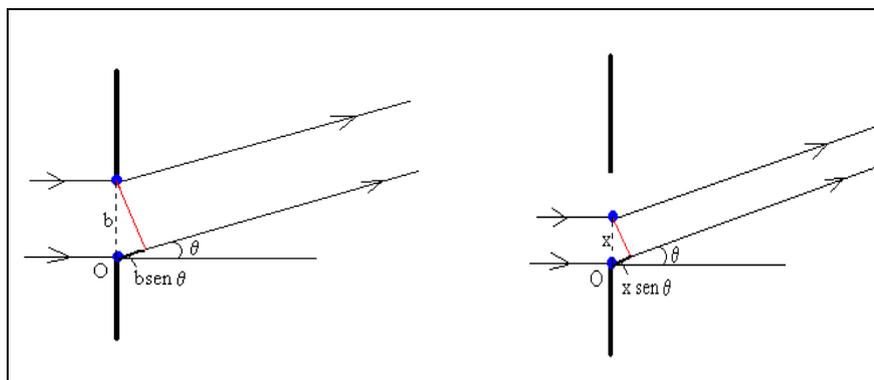


Figura 34. Difracción de la luz láser. Fuente: Autoría propia.

“Consideremos  $b$  el ancho de la rendija produciendo infinitas fuentes secundarias de ondas distribuidas en la rendija, notaremos que, la diferencia de caminos de fuente pasa por el punto  $x$  está dado por:  $x \cdot \sin \theta$ ” (Láser, 2018, párr. 12). mientras que la diferencia de la fuente del origen y del extremo de la rendija es:  $b \cdot \sin \theta$ .

El punto P manifiesta la superposición de infinitas fuentes creadas expresadas en vectores y, la suma de dichos vectores produce un arco de circunferencia, siendo A la cuerda resultante.

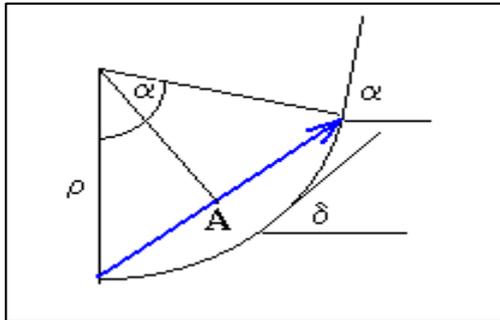


Figura 35. Arco de la circunferencia de radio r.  
Fuente: Autoría propia.

El ángulo  $\alpha$ , situado en  $x = b$  vale,  $k b \text{sen} \theta$ , siendo este ángulo el mismo que subtiende el arco de la circunferencia de radio r, el ángulo  $\delta$ , situado en x vale,  $k x \text{sen} \theta$  (“Polarización y estabilización”, 2001). Se puede calcular la longitud de cuerda, por no decir la resultante de la siguiente manera:

$$\text{cuerda } A = 2, \rho \text{sen } \frac{1}{2} \alpha = 2, \rho \text{sen } \frac{\pi b \text{sen } \theta}{\lambda}$$

$$\text{arco } A_0 = \rho \alpha = \rho \frac{2 \pi b \text{sen } \theta}{\lambda}$$

Figura 36. Fórmula para longitud de cuerda. Fuente: Difracción e Interferencia de ondas luminosas, 2018.

$$A = A_0 \left( \frac{\text{sen } \frac{\pi b \text{sen } \theta}{\lambda}}{\frac{\pi b \text{sen } \theta}{\lambda}} \right)$$

Figura 37. Resultado, simplificando el radio.  
Fuente: Difracción e Interferencia de ondas luminosas, 2018.

A su vez, las intensidades son proporcionales al cuadrado de las amplitudes

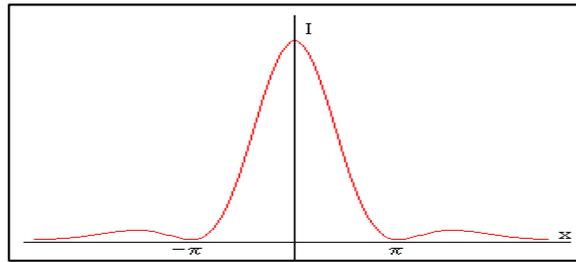


Figura 38. Cuadro de amplitudes. Fuente: Difracción e Interferencia de ondas luminosas, 2018.

## 2.4 Intensidad y amplitud de la luz difractada

De lo expuesto anteriormente, planeemos repetir la experiencia, pero en una rendija única de ancho a algo pequeño, pero no despreciable. Iluminado perpendicularmente por un láser, en este caso la de un láser teniendo longitud  $\lambda$ . Notaremos que la luz se difracta por diferentes direcciones, pero que es producida por una sola dirección que es  $\theta$ , esto se debe a que el ancho entre rendijas ya no es muy angosto. Ahora son con frente de ondas cilíndricas.

Según el principio de Huygens, asumimos que en el ancho de la rendija  $\theta$  caben infinitos focos cilíndricos que cuando se superponen unos con otros forman el frente de onda que difracta la rendija (“Informe polarización de la luz”, 2018). Dado que la fuente incidente es un láser, la iluminación que llega a un punto P en pantalla será el resultado de interferencia entre ondas que están dentro del ancho de rendija. Se concluye ahora que cada fuente que se genera no está en las rendijas sumamente estrechas, sino que están dentro de una sola rendija cuyo ancho no es tan despreciable.

Facilitando el estudio de este subtema consideremos el punto de observación alejado de la rendija, motivo que queremos a los rayos que vamos a hacer incidir son nuestra visión sean casi paralelos, a esto denominamos difracción de Fraunhofer (“Informe polarización de la luz”, 2018).

Al observar la figura 39. Asumimos la dirección  $\theta$  con lo que llegan los rayos cumpliendo que  $a \sin \theta = \lambda$ ; asimismo, se observa que el rayo difractado en el borde superior de la rendija lo hace de manera destructiva, estando así desfasado media longitud de onda con el rayo que incide de la fuente monocromática.

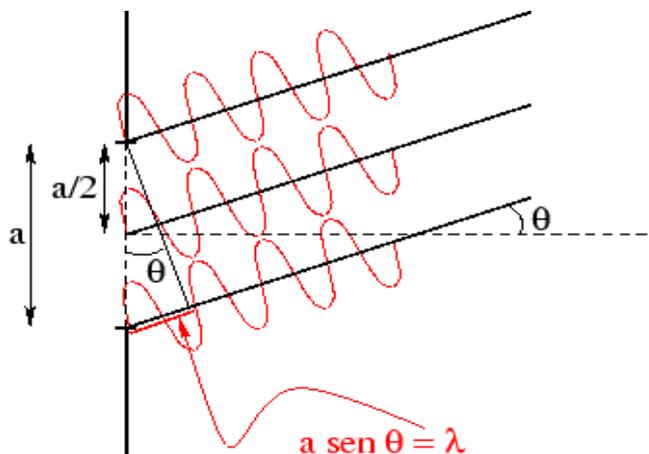


Figura 39. Intensidad y amplitud de la luz difractada. Fuente: Difracción e Interferencia de ondas luminosas, 2018.

Podemos deducir que habiendo considerado la dirección  $\theta$ , aparecerá un cero en la luz difractada. Ahora consideremos otra dirección  $\theta'$  que  $a \sin \theta' = 2\lambda$ , se tendrá un caso bastante similar debido a que el rayo difractado en el borde de la rendija interfiere de manera destructiva pero ahora con un rayo que está a una distancia de  $a/4$  más abajo; luego, el rayo de  $a$  continuación interfiere de manera destructiva con el rayo que está  $a/2$  abajo, lo mismo sucede con el último rayo que difracta de manera destructiva con el rayo que está en el borde interior. Concluyendo así, la ecuación para la intensidad cero de difracción de luz monocromática por una rejilla de ancho “ $a$ ”.

Se da un caso particular cuando el ángulo  $\theta$  es cero, en esta instancia lo dicho líneas arriba ya no se podrá cumplir debido a que en este momento no hay desfase entre los rayos que salen de cada foco dentro de lo ancho de la rendija. Debido a ello cuando  $\theta = 0$  se

dará de manera visible un máximo de intensidad del patrón de interferencia (ver figura 40) (“Difracción e Interferencia de ondas luminosas”, 2018).

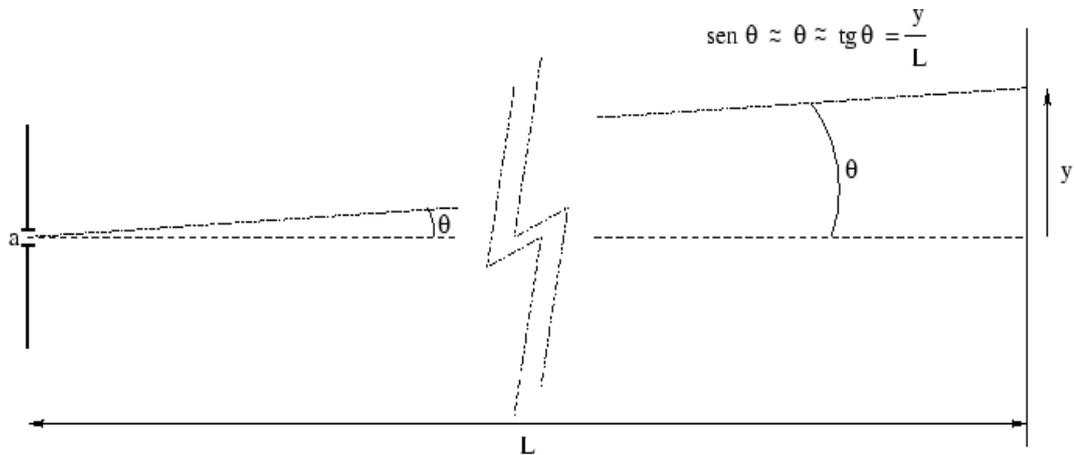


Figura 40. Máximo central. Fuente: Fuente: Difracción e Interferencia de ondas luminosas, 2018.

Al estudiar la difracción en ondas monocromáticas (láser), por lo general se puede apreciar lo ocurrido en la figura 40, donde el patrón de interferencia que se da sobre una pantalla considerablemente distante de la rendija, el ángulo  $\theta$ , donde se transportan los rayos que se interceptan en un punto situado a una distancia del máximo central, es necesariamente pequeño donde se aproxima su valor del seno y la tangente. Debido a eso, las posiciones para “ $Y_m$ ” sobre la pantalla son consideradas nulas (“Informe polarización de la luz”, 2018).

$$m\lambda = a \sin \theta \Big|_{\text{intensidad 0}} \approx a \frac{y_m}{L} = m\lambda \Rightarrow y_m \Big|_{\text{intensidad 0}} = m \frac{\lambda}{a} L.$$

Figura 41. Ecuación de intensidad nula. Fuente: Informe polarización de la luz, 2018.

Es importante mencionar que no debemos confundir la rendija única que tiene por ancho el valor de  $a$ , con una rendija de múltiples líneas, siendo la anchura entre línea y línea prácticamente cero. Sin embargo, siendo  $a \sin \theta = m\lambda$ , siendo  $m$  un número

entero diferente a cero, nos indicará los ángulos para intensidad cero; por consiguiente, en la rendija única que tiene por relación  $d \sin \theta = m\lambda$ , siendo m un numero entero, muestra los ángulos para un máximo en una rendija de múltiples líneas (“Informe polarización de la luz”, 2018).

Sin embargo, lo manifestado líneas arriba para una rendija única es correcto, pero visto desde un enfoque cualitativo, es decir, que teniendo conocimiento que en el interior de una fuente monocromática hay infinitas ondas cilíndricas que se superponen y generan interferencias destructivas, solo se ha estudiado tres ondas. Sin embargo, es correcto, debido a que se puede demostrar de manera matemática y hacer un procedimiento con mayor precisión, llegando así a concluir con una relación o ecuación que demuestre el patrón de interferencia para cada uno de los infinitos rayos que emanan de una fuente monocromática, siendo la ecuación siguiente:

$$I(\theta) = I_0 \left( \frac{\sin \left( \frac{2\pi a \sin \theta}{\lambda} \right)}{\left( \frac{2\pi a \sin \theta}{\lambda} \right)} \right)^2$$

Figura 42. Intensidad del máximo central. Fuente: Difracción e Interferencia de ondas luminosas, 2018.

Siendo  $I_0$  la intensidad de un máximo central, afirmando lo expresado líneas arriba del resultado cualitativo, siempre y cuando sigamos considerando al ángulo  $\theta$  diferente de cero. Esto conlleva a que la intensidad será cero para cada desfase de una longitud de onda (“Informe polarización de la luz”, 2018).

$$\frac{2\pi a \sin \theta}{\lambda} = \pi, 2\pi, 3\pi, \dots$$

Figura 43. Ecuación de intensidad del máximo central. Fuente: Informe polarización de la luz, 2018.

Por otro lado, si consideramos  $\theta = 0$ , entonces cumplirá que la intensidad será la máxima. Quiere decir que  $I_0$ , con los valores de  $\theta$  que tienden a cero, el seno y la tangente tendrán similar valor expresado por lo siguiente:

$$\boxed{\text{sen} \left( \frac{2\pi a \text{ sen } \theta}{\lambda} \right) \stackrel{\theta \approx 0}{\approx} \left( \frac{2\pi a \text{ sen } \theta}{\lambda} \right)}$$

Figura 44. La intensidad es la máxima posible. Fuente: Informe polarización de la luz, 2018.

$$\boxed{I(\theta = 0) \stackrel{\theta \rightarrow 0}{\rightarrow} I_0 \left( \frac{\left( \frac{2\pi a \text{ sen } \theta}{\lambda} \right)^2}{\left( \frac{2\pi a \text{ sen } \theta}{\lambda} \right)^2} \right) = I_0}$$

Figura 45. Fórmula máximo central. Fuente: Informe polarización de la luz, 2018.

Ponemos como énfasis que, para la intensidad máxima central cuando el ángulo tiende a cero, ocurre de manera independiente con respecto a la longitud de onda o independientemente también, a lo ancho de la rendija.

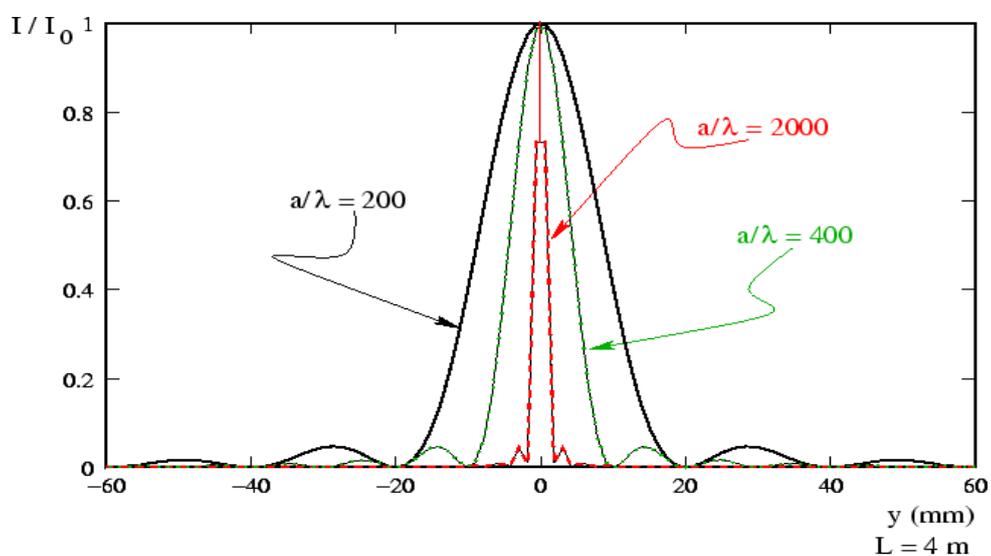


Figura 46. Patrón de interferencia sobre la pantalla. Fuente: Difracción e Interferencia de ondas luminosas, 2018.

Al observar la figura 46 se pone de manifiesto que la intensidad que se aprecia en la pantalla dependerá del ángulo  $\theta$  que forma el rayo perpendicular con la rendija.

Teniendo un montaje como en la figura 40, con  $L = 4\text{m}$  y  $a/\lambda=200$ , dará como resultado en la pantalla un patrón de interferencia visto en la figura 46. Los mínimos de intensidad se darán en la siguiente relación:  $Y = 20, 40, \dots, \text{mm}$ .

Profundizando un poco más, la intensidad no solo depende del ángulo sino también del ancho de la rendija. Al observar la figura 46, sobre los tres datos que van creciendo en lo ancho de la rendija y tendiendo frente a la longitud de onda del láser, se ve que mientras se va aumentando el ancho de la rendija el patrón de luz se concentra como una mancha en el centro de la pantalla. Entonces, se tiene establecido una ecuación donde el estudio ya no corresponde al ángulo de incidencia sino a la anchura de la rendija. La intensidad, teniendo como referencia a la anchura “a” de la rendija, es:

$$\lim_{a \rightarrow \infty} I(\theta \neq 0) = I_0 \lim_{a \rightarrow \infty} \left( \frac{\text{sen} \left( \frac{2\pi a \text{sen } \theta}{\lambda} \right)}{\left( \frac{2\pi a \text{sen } \theta}{\lambda} \right)} \right)^2 = 0,$$

Figura 47. Máxima intensidad producida por el ancho de una rendija.  
Fuente: Informe polarización de la luz, 2018.

#### 2.4.1 Mínimos de intensidad.

Los mínimos de intensidad se dan cuando el límite del seno es un factor entero de  $\pi$ , también, cuando la expresión  $b \text{sen } q = n\lambda$ , siendo  $n = 1; 2; 3$ ; (“Polarización y estabilización”, 2001).

$$b \text{sen } q = n\lambda$$

Figura 48. Difracción de Fraunhofer en rendija angosta. Fuente: Polarización y estabilización del transistor bipolar, 2018.

### 2.4.2 Máximos secundarios.

Los máximos secundarios se obtienen al derivar la ecuación de la intensidad, teniendo como base:

$$I = I_0 \frac{\text{sen}^2 x}{x^2}$$

$$\frac{dI}{dx} = 2I_0 \left( \frac{\text{sen} x}{x} \right) \left( \frac{x \cos x - \text{sen} x}{x^2} \right)$$

Figura 49. Máximos secundarios. Fuente: Polarización y estabilización del transistor bipolar, 2018.

Para  $\text{sen} x / x = 0$ , se tiene un mínimo de intensidad debido a  $I = 0$ , luego  $x \cos x - \text{sen} x = 0$ , también, para  $x = \text{tang} x$ , se tiene un máximo de intensidad (“Polarización y estabilización”, 2001).

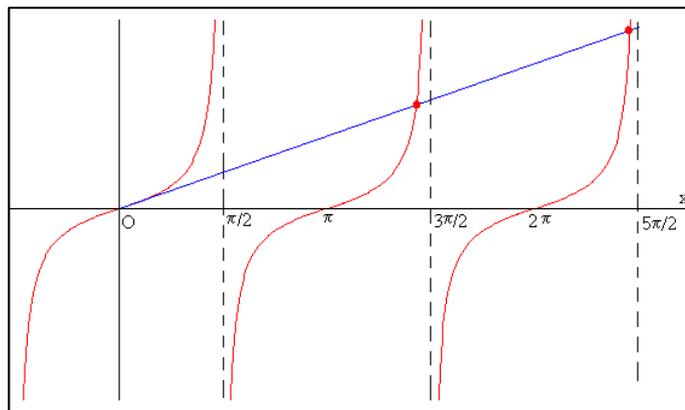


Figura 50. Se observa en la figura los máximos secundarios. Fuente: Polarización y estabilización del transistor bipolar, 2001.

En la figura 50 se puede observar los máximos secundarios que ocurren para el siguiente patrón:  $X_n \approx (2n + 1) \frac{\pi}{2}$ , donde  $n = \pm 1; \pm 2; \pm 3; \dots$ , asumiendo a su vez a  $\text{sen} x$ , la intensidad se da por la orientación correspondiente a los máximos secundarios e, que por lo general es inversamente proporcional a  $n$  (“Polarización y estabilización”, 2001).

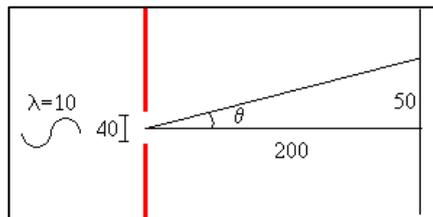


Figura 51. Intensidad en posición  $x=200$ .  
Fuente: Polarización y estabilización del transistor bipolar, 2018.

De la figura 51, se aprecia el primer mínimo de intensidad ubicado en  $y = 50$ , hacemos una pequeña ecuación para calcular el ángulo, que sería así:  $\text{Tan}\theta = 50 / 200$ , para comprobar, que  $b\text{sen}\theta = \lambda$ .

Tenemos en cuenta que, en la difracción de una rendija, el que toma el papel de observador debe estar a una distancia totalmente mayor a comparación de lo ancho de la rendija, pero nos percatamos de que en este caso no cumple. Eso es porque no es nuestro objetivo calcular los mínimos sino, por el contrario, mostrar que la difracción es un fenómeno cualitativo, contrario a la interferencia (“Polarización y estabilización”, 2001).

## 2.5 Difracción de una abertura circular

Al estudiar la difracción en una rendija circular, toma mayor importancia el análisis, ya que el patrón óptico que forman la imagen proyectada en la pantalla está compuesto por lentes de prototipo circular. Para poder calcular la intensidad de luz que irradia en un plano que está alejado de su abertura se aplica un procedimiento similar a la rendija única o rendija múltiple, siendo la única diferencia la forma de las aberturas (“Polarización y estabilización”, 2001).

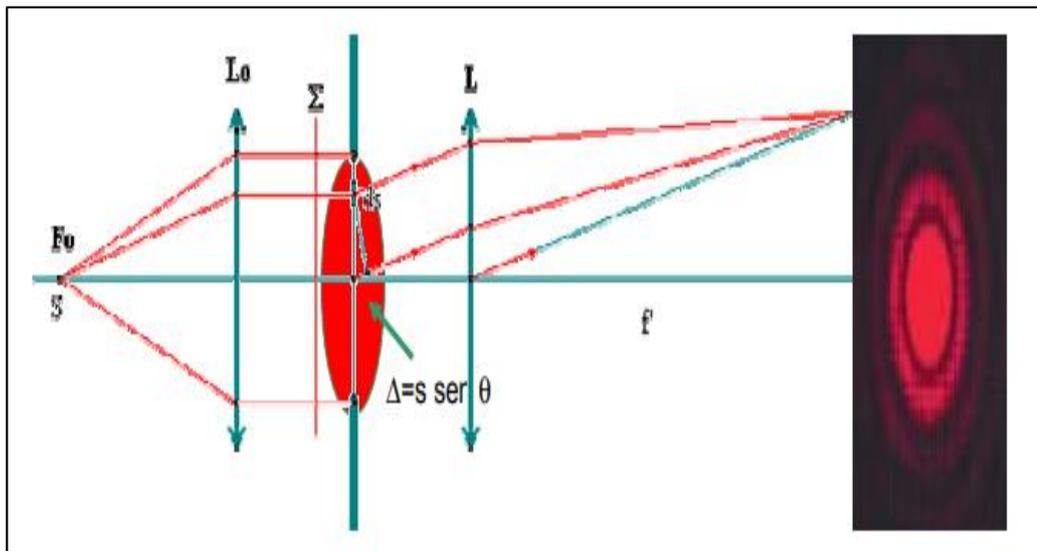


Figura 52. Difracción de una abertura circular. Fuente: Polarización y estabilización del transistor bipolar, 2001.

Se puede extender por división la abertura del lente, de manera que tenga un espesor  $dz$  y, a su vez, una longitud  $2x$ . Entonces, al calcular el área de una de las rendijas se dará por:  $dA = 2xdz$ , esto es, derivando. A su vez, las coordenadas de  $x$  y  $z$  se relacionan por la ecuación de la circunferencia.

$$x^2 + z^2 = \frac{D^2}{4}$$

Por lo tanto, el elemento de área se podrá escribir como

$$dA = 2\sqrt{\frac{D^2}{4} - z^2} dz$$

Al igual que en el caso de la rendija, el campo radiado por la subrendija central se podrá poner como

$$dE = \frac{CLdA}{r_0} e^{i(k_0 r - \omega t)}$$

Por otra parte, el campo radiado por la rendija situada a la distancia  $z$  del centro será

$$dE = \frac{2CLxdz}{r_0 - \Delta} e^{i(k(r_0 - \Delta) - \omega t)}$$

donde se ha tenido en cuenta el retraso  $\Delta$  de onda secundaria respecto de la onda central. El campo total en P a las contribuciones de todas las rendijas infinitesimales será

$$E = \frac{2CL}{r_0} e^{i(kr_0 - \omega t)} \int_{-D/2}^{D/2} \sqrt{\frac{D^2}{4} - z^2} e^{ik_0 z \text{sen} \theta} dz$$

Figura 53. Ecuación de la circunferencia. Fuente: Polarización y estabilización del transistor bipolar, 2001.

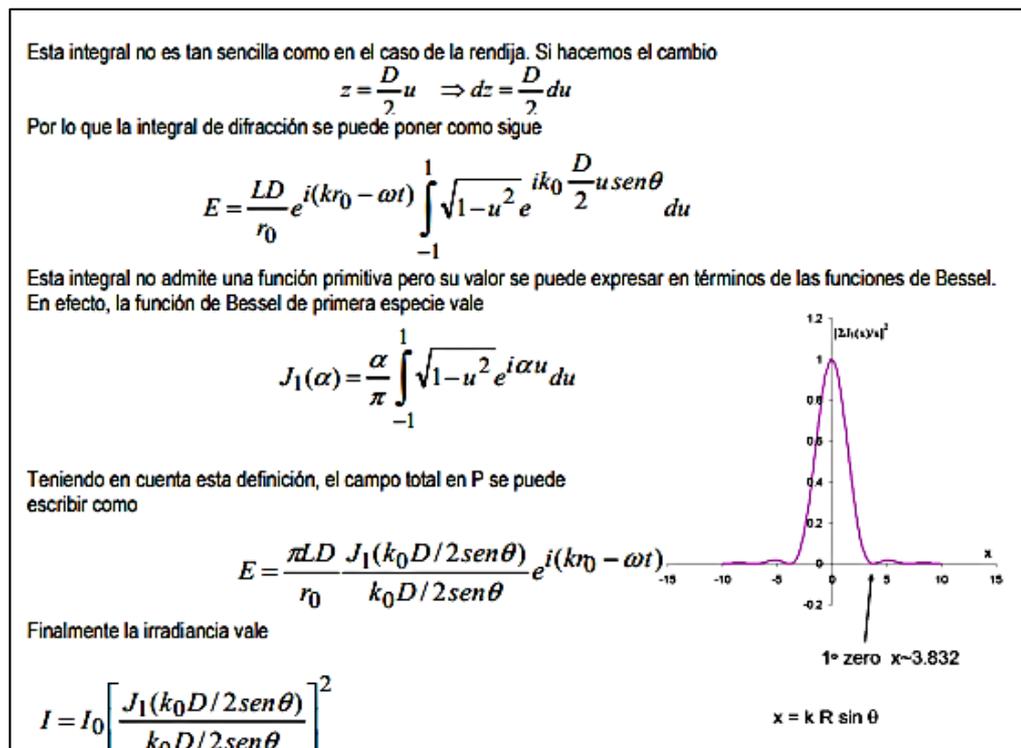


Figura 54. Ecuación de irradiancia. Fuente: Polarización y estabilización del transistor bipolar, 2001.

## 2.6 Difracción por una rejilla

La difracción que se puede hacer por una rejilla optométrica requiere un sinnúmero de requerimientos, ya que, al no ser consideradas, no sería tan útil en la simulación de experiencias, esto quiere decir que no tendríamos resultados óptimos en los experimentos que realicemos. Para ello se debe considerar lo siguiente en las rejillas: eficiencia, rango de longitud de onda y poder de resolución. Esto permite realizar los experimentos de difracción por una rendija, rendija múltiple y difracción circular (“Polarización y estabilización”, 2001).

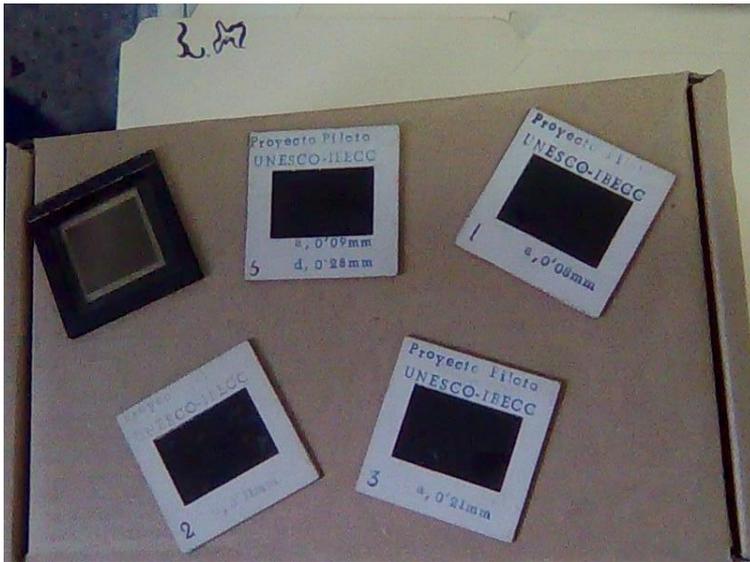


Figura 55. Rejillas de difracción. Fuente: Autoría propia.

## Capítulo III

### Polarización de la luz

#### 3.1 Polarización de la luz por reflexión

Una de las fuentes más comunes de luz polarizada es el ubicuo proceso de la reflexión en medios dieléctricos. El brillo esparcido sobre el cristal de ventana, una hoja de papel o la cabeza de un clavo, el lustre en la superficie de un teléfono, etc. Todos están parcialmente polarizados (Hecht, 2000).

La figura, a continuación, muestra la luz que incide con el ángulo de polarización, donde la luz reflejada está totalmente polarizada.

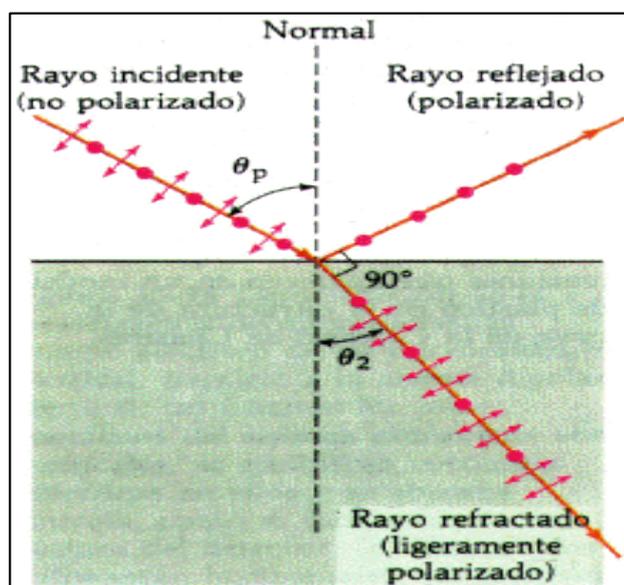


Figura 56. Luz incidente. Fuente: Hecht, 2000.

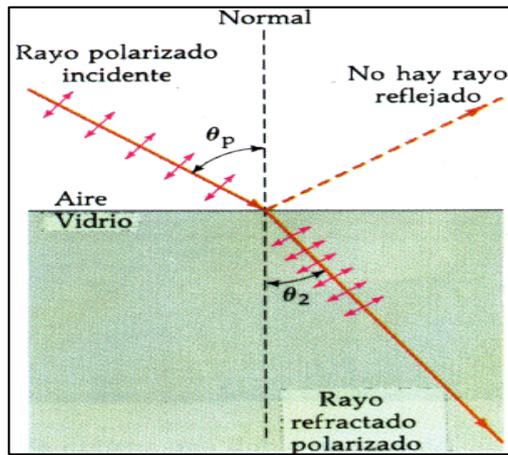


Figura 57. Campo eléctrico del rayo refractado.  
Fuente: Hecht, 2000.

En el caso de que las moléculas del vidrio estén oscilando en dirección paralelo del campo eléctrico del rayo refractado, no radiará energía en la dirección del rayo reflejado (“Escritos sobre el fenómeno de la luz”, 2016).

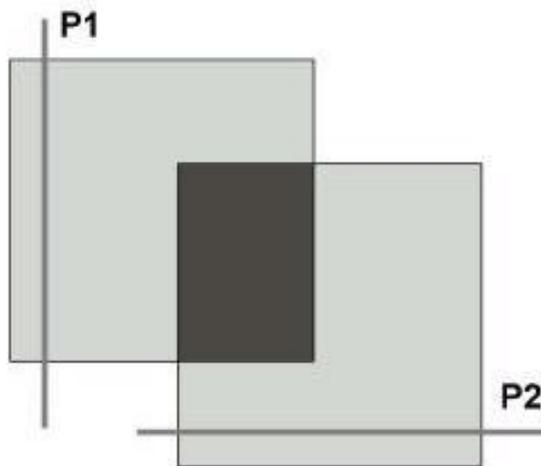
### 3.2 Láminas polarizadoras

Las ondas de un rayo de luz se propagan en diferentes direcciones con respecto a su propagación inicial. Es así que se puede observar a las ondas desplazarse en sentido vertical, horizontal y en diferentes sentidos (Hecht, 2000).

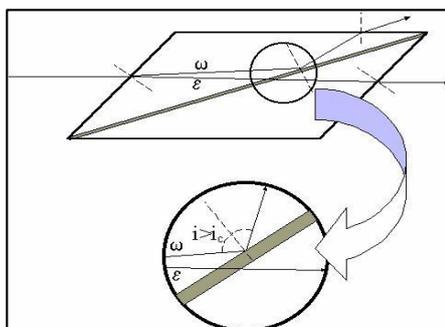
Se tiene conocimiento que en la actualidad existe un filtro polarizador cuya función es dejar pasar únicamente a las ondas que están en dirección de sus rejillas. El filtro polarizador está hecho a base de un material cuyo nombre es polaroid, que es similar al plástico. A dicho material lo condicionan para que sus patrones moleculares sean orientados en un solo sentido. Solo así puede quedar bien definida para que, al momento de colocarlo en rayo de luz, solo deje pasar a las ondas que tienen la misma dirección que el filtro polarizador (Hecht, 2000).

El filtro polarizador fue elaborado por primera vez por Edwin Land, aproximadamente en el año de 1928, fue así que le dio nombre a la empresa que lo estaba fabricando como polaroid.

Se puede clasificar en dos categorías a los filtros polarizadores: las lineales y las circulares. Sin embargo, se puede decir que los filtros lineales son más comerciales, ya que son más económicos y efectivos, claro está que dichos filtros no son utilizados en las cámaras digitales ni cámaras de filmaciones, ya que estos últimos usan una deformación de los filtros polarizadores, combinando parte de su composición con espejos (Hecht, 2000).



*Figura 58.* Láminas polarizadoras cruzadas perpendicularmente no permiten pasar la luz.  
Fuente: Hecht, 2000.



*Figura 59.* Exposición y enfoque manual.  
Fuente: Hecht, 2000.

### 3.3 Polarización doble refracción

Un haz de luz que atraviesa por un filtro polarizador tiene como consecuencia que sus ondas queden separadas de manera perpendicular entre sí. Ahora, si colocásemos un segundo filtro polarizador de manera perpendicular al primer filtro, observaríamos que no pasaría la luz. Dicha curiosidad lo desarrolló en primer momento William Nicol en 1828, en una curiosa experiencia con un romboedro. Luego, dicho prisma sería estudiado por Nicol (“Escritos sobre el fenómeno de la luz”, 2016).

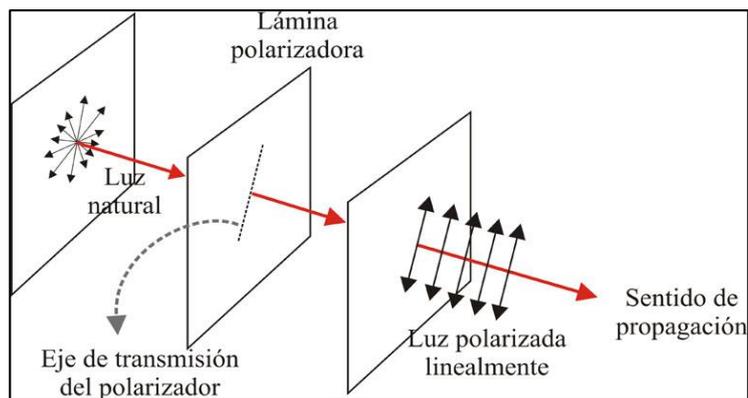


Figura 60. Polarización por doble refracción. Fuente: Escritos sobre el fenómeno de la luz, 2016.

En el prisma de Nicol el haz luminoso que incide por uno de los extremos del romboedro se desdobra en dos haces que siguen trayectorias distintas (están linealmente polarizados), a esto se dice que una de ellas es una onda ordinaria, mientras que la otra es una onda extraordinaria. Ambos haces tienen como llegada a la superficie del prisma cuyos ángulos de incidencia son diferentes. El haz ordinario tiene un índice superior al del prisma, a su vez, es superior al ángulo límite, experimenta una reflexión neta, quedando así polarizada por las paredes del prisma.

Mientras que el extraordinario cuyo índice es similar al del prisma tiene el paso libre sin desvío, recorriendo así el interior del prisma y en su camino recoge el haz de luz que ha sido polarizada (“Escritos sobre el fenómeno de la luz”, 2016).

Sin embargo, con el pasar del tiempo se fue perfeccionando el prisma, es así que apareció el prisma de Glan-Foucault, que, en vez de ser un prisma sólido, ahora es un prisma por aire. No obstante, hubo otros prismas que modificaron ligeramente la geometría del romboedro, pero que, en esencia, desde su inicio, quedó bien definida con el prisma de Nicol, como se indica en la siguiente figura:

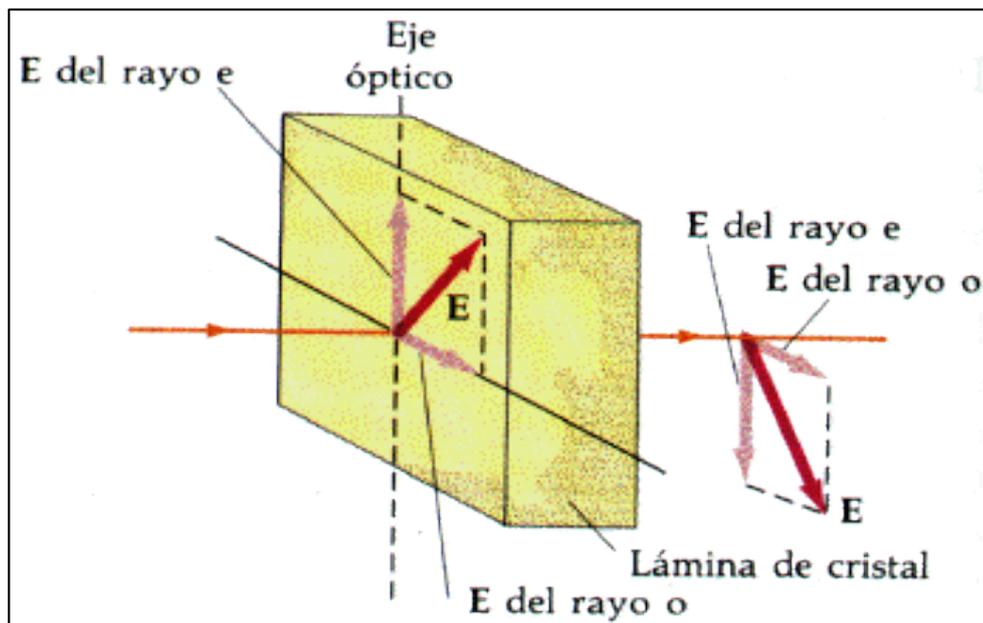


Figura 61. Luz incidente. Fuente: Escritos sobre el fenómeno de la luz, 2016.

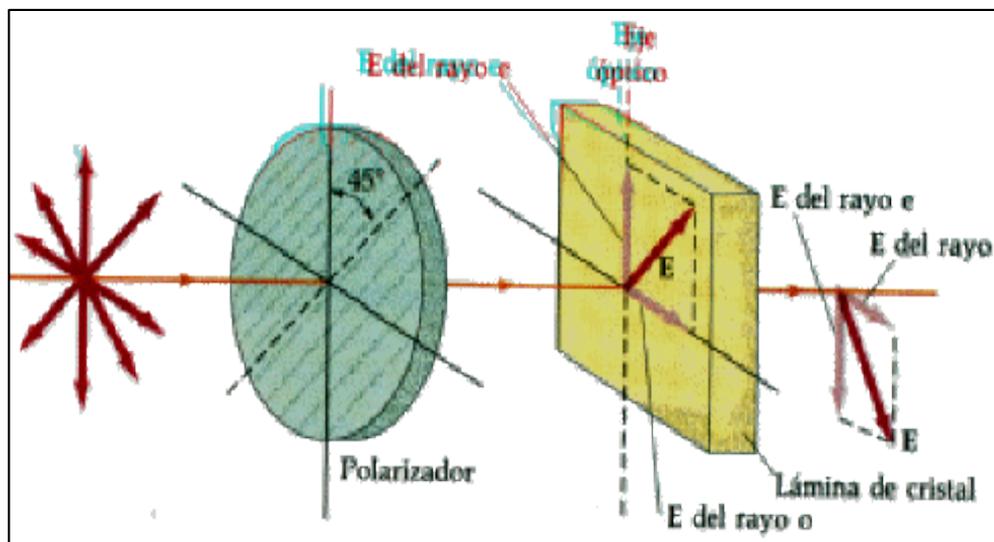


Figura 62. Efecto neto. Fuente: Escritos sobre el fenómeno de la luz, 2016.

### 3.4 Polarización circular

Este tipo de polarización está constituido por dos ondas electromagnéticas, cuyas ondas son planas y que son perpendiculares entre sí con una diferencia de fase de  $90^\circ$ . Solo así se puede decir que está polarizado circularmente.

Si lográsemos ver el sentido del campo notaríamos que se moviese en un círculo a medida que se va acercando. Si seguimos observando la fuente de luz Si mientras se mira la fuente de luz, el vector del campo eléctrico de la luz, viniendo hacia adelante, aparece girando en sentido antihorario, se dice que la luz está polarizada circularmente hacia la derecha. Si fuera en sentido horario, se diría que está polarizada circularmente hacia la izquierda. El vector del campo eléctrico dibuja una vuelta completa cuando la luz avanza una longitud de onda completa. Otra forma de decirlo es que, si el dedo pulgar de la mano derecha apuntara en la dirección de propagación de la luz, el vector del campo eléctrico estaría girando en la dirección marcada por los demás dedos.

La luz polarizada circularmente se puede producir haciendo pasar la luz polarizada linealmente a través de una placa de un cuarto de onda con un ángulo incidente de  $45^\circ$  respecto del eje óptico de la placa (“Escritos sobre el fenómeno de la luz”, 2016)

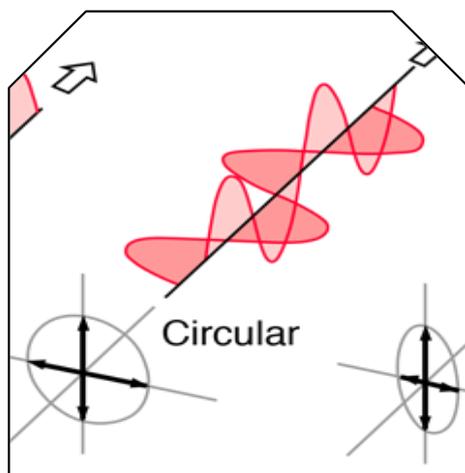


Figura 63. Luz polarizada. Fuente: Escritos sobre el fenómeno de la luz, 2016.

## Aplicación didáctica

### Sesión de aprendizaje

#### I. DATOS GENERALES:

INSTITUCIÓN EDUCATIVA: Pedro Paulet

ASIGNATURA : Física

SESIÓN DE CLASE : Interferencia, difracción y polarización de la luz

HORAS PEDAGÓGICAS : 2 h

#### II. COMPETENCIAS:

- Explica el mundo físico, basado en conocimientos científicos

#### III. CAPACIDADES

- Comprende y aplica conocimientos científicos y argumenta científicamente

#### IV. INDICADORES DE LOGRO:

- Sustenta que el oscurecimiento en luces difractada se produce por la interferencia destructiva de ondas.

- Experimenta la polarización de la luz usando láminas polarizadoras.

#### V. CONTENIDOS:

Momentos	Acciones	Tiempo
INICIO	<p style="text-align: center;"><u>Presentación:</u></p> <p>El docente saluda a los estudiantes, promueve la limpieza y orden del aula, habla sobre los valores, creando un ambiente favorable.</p> <p style="text-align: center;"><u>Motivación:</u></p> <p>El docente iniciará la clase reproduciendo el experimento de YOUNG sin que se le explique en qué consiste dicha ley.</p> <p>El objetivo es despertar la curiosidad en los estudiantes, para lo cual el docente pregunta: ¿se puede dividir la trayectoria de la luz?</p> <p>Materiales: láser, metro, rendijas de difracción.</p>	10 min

	<p style="text-align: center;"><u>Saberes previos</u></p> <p>Después de que los estudiantes hayan vivenciado la experiencia, el docente les pregunta: ¿Qué conocimientos científicos (temas) están relacionados a la experiencia anterior? Luego de un conversatorio entre pares, los estudiantes dan sus posibles respuestas. El docente menciona que hoy estudiaremos las propiedades de ondas luminosas. Interferencia, Difracción y Polarización de la luz</p> <p><u>Conflicto cognitivo.</u> Activamos el conflicto cognitivo al realizar la siguiente pregunta: ¿Cómo se produce la formación de varios puntos en la pared?</p>	
PROCESO	<p><u>Presentación del tema</u></p> <p>El docente escribe el tema a tratar “Propiedades de ondas luminosas. Interferencia, difracción y polarización de la luz” y complementa las respuestas diciendo la importancia y la relación con el tema a tratar.</p> <p>El docente define propiedades de ondas luminosas. Interferencia, difracción y polarización de la luz con sus respectivos ejemplos y gráfica.</p> <p>Participan constantemente respondiendo las preguntas o dando interrogantes</p> <p>Se les indica formar grupo de 4 estudiantes para realizar la ficha de práctica realizando el experimento propuesto.</p> <p>El docente retroalimenta algunos puntos del tema tratado que no se entendieron en el proceso de la clase.</p>	65 min
SALIDA	<p>Evaluación</p> <p>Se sortea para elegir 2 grupos a fin de que expongan sus conclusiones del experimento.</p> <p><u>Metacognición</u></p> <p>¿Qué aprendí? ¿Cómo aprendí? ¿Qué no entendí? ¿Y por qué?</p> <p>Se brinda las recomendaciones pertinentes para el repaso o culminación de la tarea en casa.</p>	15 min

## VI. REFERENCIAS:

- Alvarenga, B., & Antonio Máximo. (1983). *Física General con experimentos sencillos*. Ministerio de Educación. (2012). *Ciencia, Tecnología y Ambiente de 5.º Grado de Educación Secundaria*. Lima: Santillana S. A. Nueva Edición Actualizada Harla.
- Serway Bechner. *Física para ciencias e ingeniería*. 5ta. edición, tomo II.

### Ficha de práctica evaluativa

FICHA DE TRABAJO PRÁCTICO						
INSTITUCIÓN EDUCATIVA PRIVADA "PEDRO PAULET"	Área	FISICA	Aprendizaje a lograr			
	Tema	Propiedades de ondas luminosas Interferencia, Difracción y Polarización de la luz	-Sustenta que el oscurecimiento en luces difractada se produce por la interferencia destructiva de ondas.  - Experimenta la polarización de la luz usando láminas polarizadoras.			
	Grado	5to. de secundaria				
Nivel Secundaria	Docente	Carlos Gomez Pardavé	Fecha	13	09	2018
Responsable			Nota			

## Guías de laboratorio

### 1. Objetivo:

Comprueba experimentalmente las características de interferencia de ondas.

Relaciona la interferencia de ondas con la difracción de ondas.

Explica experimentalmente la ley de Fraunhofer.

Elabora un reporte del desarrollo de los experimentos y las conclusiones obtenidas.

### 2. Normas de Seguridad:

Es necesario usar los materiales con bastante cuidado.

Trabajar con responsabilidad y esmero.

### 3. Materiales:

Láser

Metro

Rejillas de difracción

Láminas polarizadoras

Lápiz (para hacer apuntes)

Regla para realizar los gráficos necesarios, etc.

## INSTITUCIÓN EDUCATIVA “PEDRO PAULET”

### GUÍA 1

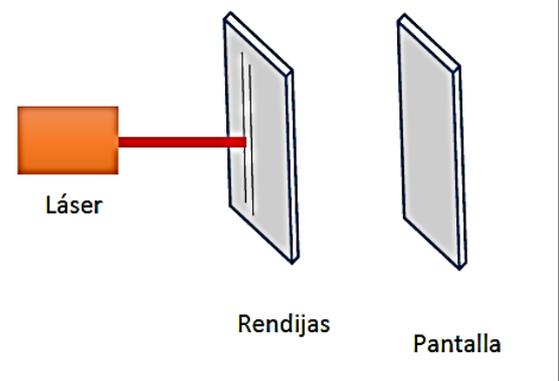
*Nombres y apellidos:* \_\_\_\_\_

**Instrucciones:** en cada momento estar atento a la instrucción del docente, dicho guía se recogerá en cualquier momento. Registre su nombre para considerar su debida asistencia y participación. Sus predicciones serán muy importantes para la realización de la práctica.

**Materiales:** láser, espejo pequeño con 2 líneas delgadas, por ahí pasará la luz; una pantalla blanca y acetato con líneas.

**Observaciones de seguridad:** no apuntar el láser a los ojos.

**Descripción:** realizar la experiencia según manda la imagen.

<p><b>Predicciones</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. ¿Qué crees que sucederá al apuntar el láser por la rendija?, dibuja y describe lo que observas.</li> <li>2. Varía la distancia entre la rendija y el láser. ¿Qué crees que sucederá? Anota.</li> <li>3. Si disminuimos la separación de las rendijas, ¿qué esperas que sucederá? A dibujar lo que se espera observar.</li> <li>4. ¿Qué sucede en la pantalla mientras realizamos la experiencia anterior? Dibuja lo que observas en la pantalla.</li> <li>5. ¿Hay variaciones en las experiencias realizadas? Dibuja las relaciones y diferencias que encuentres.</li> </ol>	
---	---

Preguntas taller:

Al encender la láser. ¿qué imagen observaste en la pantalla y cuál fue tu predicción?

En el centro de patrón de la pantalla, ¿hay una franja brillante o franja oscura?

Al momento de variar la distancia entre a pantalla y la rendija, ¿varió la imagen inicial?

Dibuja todas tus observaciones y conversa con tu profesor las experiencias vividas.

## INSTITUCIÓN EDUCATIVA “PEDRO PAULET”

### GUÍA 2

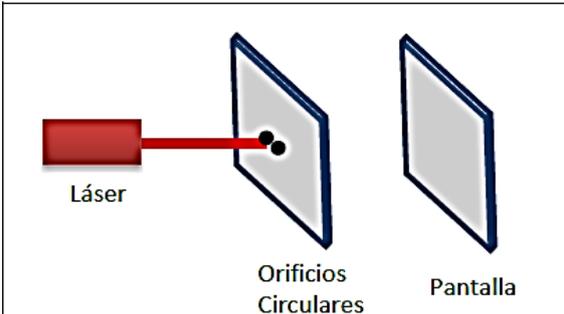
**Nombres y apellidos:** \_\_\_\_\_

**Instrucciones:** en cada momento estar atento a la instrucción del docente, dicho guía se recogerá en cualquier momento. Registre su nombre para considerar su debida asistencia y participación. Sus predicciones serán muy importantes para la realización de la práctica.

**Materiales:** láser casero, laminas circulares con 2 orificios pequeños, pantalla.

**Observaciones de seguridad:** cuide que el láser no apunte a los ojos.

**Descripción:** armar el equipo según se muestra en la imagen.

<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ¿Cuáles son tus expectativas de observación que tienes? Anota tus predicciones.</li> <li>2. Si aumentamos el tamaño o separación de los orificios, ¿cambiará lo que se observó inicialmente? Anota tus predicciones.</li> <li>3. ¿Existe alguna relación con lo realizado en la guía número 1 de la clase anterior?</li> <li>4. ¿Crees que cambiará lo observado si se aleja los orificios de la pantalla?, anótalo.</li> <li>6. Dibuja todo lo que observas en la práctica.</li> </ol>	 <p style="text-align: center;">Láser                      Orificios Circulares                      Pantalla</p>
---	--

Preguntas tipo taller:

1. ¿Cuáles son tus observaciones al incidir el láser sobre los orificios? Describe y dibuja. Usa colores si crees conveniente.

2. ¿Guarda alguna relación lo realizado con los orificios circulares y la rendija? Describe.

3. Al momento de separar los orificios, ¿qué sucedió en la pantalla? Anota y dibuja.

4. Al momento de unir los orificios, ¿qué sucedió en la pantalla? Anota y dibuja.

## INSTITUCIÓN EDUCATIVA “PEDRO PAULET”

### GUÍA 3

**Nombres y apellidos:** \_\_\_\_\_

**Instrucciones:** en cada momento estar atento a la instrucción del docente, dicho guía se recogerá en cualquier momento. Registre su nombre para considerar su debida asistencia y participación. Sus predicciones serán muy importantes para la realización de la práctica.

**Materiales:** láser, rendija pequeña para hacer pasar el láser, pantalla, placa pequeña con orificio circular.

**Observaciones de seguridad:** cuide que el láser no apunte a los ojos.

**Descripción:** amarr el equipo como se muestran en la figura.

<p><b>Predicciones:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. ¿Cuáles son tus expectativas al iluminar las rendijas con el láser? Dibuja tus experiencias</li> <li>2 ¿Cuáles son tus expectativas al iluminar las placas con orificios circulares con el láser? Dibuja tus experiencias.</li> <li>3. ¿Se relacionan lo realizados en los pasos anteriores? Coméntalos.</li> <li>4. ¿Qué opinas que sucederá si alejamos la rendija o la placa de orificio? Anota lo que consideres y dibújalo.</li> </ol>	
---	--

#### Preguntas para descripción de los resultados:

1. En el momento de iluminar la rendija, ¿qué pudo observar en la pantalla? Dibújalo con colores lo observado.
2. En el momento de iluminar la lámina con un orificio, ¿qué pudo observar en la pantalla? Dibuje la experiencia teniendo en cuenta los detalles de ancho.
3. ¿Tienen similitud o diferencia la experiencia con la rendija y la placa? Coméntalos.
4. Detalle lo que sucedió al momento de alejar la rendija y/o el orificio de la pantalla.

## INSTITUCIÓN EDUCATIVA “PEDRO PAULET”

### GUÍA 4

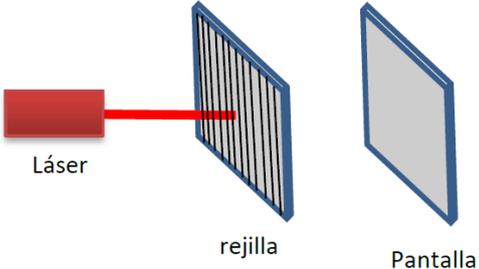
**Nombres y apellidos:** \_\_\_\_\_

**Instrucciones:** en cada momento estar atento a la instrucción del docente, dicho guía se recogerá en cualquier momento. Registre su nombre para considerar su debida asistencia y participación. Sus predicciones serán muy importantes para la realización de la práctica.

**Materiales:** láser, rejilla pequeña y pantalla.

**Observaciones de seguridad:** cuide que el láser no apunte a los ojos.

**Descripción:** armar el equipo como se muestra en la figura.

<p><b>Predicciones:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Al incidir el láser sobre la rejilla, ¿qué puedes observar? Anota tus observaciones y dibuja.</li> <li>2. Al variar la distancia entre la rejilla y la pantalla, ¿afecta en algo el patrón de franjas observado? Explica lo que sucede y dibuja.</li> <li>3. ¿Qué crees que puede suceder si en vez de láser usamos un foco de casa? Anota tus predicciones y dibuja.</li> </ol>	
--	---

#### Preguntas para descripción de los resultados:

1. cuando iluminamos la rejilla, ¿Cómo se forma el patrón de luz que se observa en la pantalla?

2. En el momento de variar la distancia entre la pantalla y la rejilla, ¿cambió en algo el patrón de luz? Comenta lo que sucedió y dibuja.

3. ¿Qué ocurrió al cambiar el láser por un foco casero? Anota y dibuja tu experiencia.

### LISTA DE COTEJO

	<b>Práctica en el Laboratorio</b>
<b>Nombre del alumno(s)</b>	
<b>Instrucciones</b>	<p>En la siguiente lista se tienen los criterios que validarán el desempeño de los estudiantes en la práctica realizada.</p> <p>Marcar con un check toda observación que efectuó el estudiante.</p>

<b>Desarrollo</b>	Sí	No	
Atendió las instrucciones para el desarrollo del experimento.			
Resolvió adecuadamente los problemas suscitados.			
Tomó notas de manera óptima.			
Desarrolló el objetivo de la práctica.			
Utilizó de manera adecuada las herramientas y materiales.			
Trabajó en equipo.			
Realizó la gráfica y la interpretación.			
Durante el desarrollo de la actividad experimental trabajó con orden y limpieza.			
Hizo el cuestionario.			
Completó la práctica en el tiempo establecido.			
Resolvió los problemas adecuadamente			

## Síntesis

Al momento de que la luz incide en un obstáculo se produce un fenómeno de desviación o difracción, donde dicho obstáculo, por lo general, no produce una especie de sombra nítida. Para que se pueda producir interferencia se tiene que traslapar una sobre otra una o más ondas. Esto es, en efecto, lo que Thomas Young dio a conocer cuando refutó la tesis de Newton, que la luz solo estaba compuesta por partículas. Ahora sabemos del comportamiento dual de la luz.

Cuando hablamos de interferencia y difracción de ondas, son fenómenos producidos a todo tipo de ondas y no solo a las ondas que emiten la luz.

La polarización es el impedimento del libre pase de ondas luminosas, en el cual podemos concluir que se puede polarizar total o parcialmente la luz.

Se puede polarizar la luz natural y artificialmente. De manera natural, en el momento de un fenómeno de refracción, donde el rayo de incidencia y el rayo refractado formen  $90^\circ$ . Se puede polarizar de manera artificial con los diferentes insumos de material llamado polaroid, donde el vector polarización está siempre contenido en dirección de propagación.

### **Apreciación crítica y sugerencias**

Muchos de estos temas no se llegan a enseñar a los estudiantes de 5to. de secundaria debido a la complejidad de ecuaciones de uso superior, pero puede ser útil en los colegios de formación técnica, graduando la complejidad de sus cálculos.

Lo relevante no solo es comprender cabalmente las demostraciones matemáticas sino también el proceso del fenómeno físico, analizando y cuestionándonos el porqué de cada suceso, acompañándonos de buenas fuentes de información.

Es interesante analizar y comprender los fenómenos físicos y poder demostrarse a través de múltiples experimentos que pueden ser sencillos incentivando el aprendizaje de los estudiantes.

## Referencias

- Alvarenga B. & Máximo A. (1983). *Física general con experimentos sencillos*. Oxford, Estados Unidos. Editorial Harla.
- Fempatri. (2016, 5 de diciembre). Escritos sobre el fenómeno de la luz. *Fempatri*. Recuperado de: <http://fempatrimoni.blogspot.com/search?updated-max=2013-12-06T08:58:00%2B14:00&max-results=7>
- Haliday, Davis & Resnick, R. (2001). *Fundamentos de física*. Mexico df, Mexico. Editorial Cesca.
- Hecht, P.A (2000). *Física*. Nueva York, Estados Unidos. Editorial Mc Graw Hill.
- Láser. (2018, 15 de enero). Estudio sobre la polarización. *Láser*. Recuperado de <http://láser.uvigo.es>
- Sc. (2001, 15 de febrero). Polarización y estabilización del transistor bipolar. *Electrónica básica*. Recuperado de: [http://www.sc.ehu.es/sbweb/electronica/elec\\_basica/default.htm](http://www.sc.ehu.es/sbweb/electronica/elec_basica/default.htm)
- Serway & Beichner. (2000). *Física para ciencias e ingeniería. Vol. II*. Oxford, EEUU Editorial Mc Graw Hill.
- Serway & Jewett. (1992). *Física. Vol. II*. Oxford, EEUU. Editorial Thomson.
- Thomas Young (1801). *Experimentos de la doble rendija*. Chisholm, Inglaterra, Editorial. Encyclopedia Britannica.
- Universidad Nacional de Colombia. (2018). *Difracción e Interferencia de ondas luminosas*. Recuperado de <http://www.unal.edu.co>
- Universidad Nacional de Rioja. (2018). *Informe polarización de la luz*. Recuperado de: <http://www.unirioja.es>

## Apéndices

Apéndice A: fotos sobre el fenómeno de difracción.

