



Universidad de Alicante

Cuaderno de laboratorio.

Mireia Serrano Beltrá

Técnicas Experimentales II
Curso 2023-2024

Índice

| | |
|--|-----------|
| 1. P1A: Efecto fotoeléctrico y determinación de la constante de Planck | 1 |
| 1.1. Fundamentos físicos básicos | 1 |
| 1.2. Material | 1 |
| 1.3. Realización de la práctica | 2 |
| 1.4. Resultados | 2 |
| 1.4.1. Dependencia con la frecuencia | 2 |
| 1.4.2. Dependencia con la intensidad | 3 |
| 2. P1C: Determinación de la constante de Planck con diodos emisores de luz (LEDs) | 5 |
| 2.1. Fundamentos físicos básicos | 5 |
| 2.2. Material | 5 |
| 2.3. Montaje experimental 1 | 6 |
| 2.4. Montaje experimental 2 | 10 |
| 3. P2: Difracción de luz por una rendija y relación con el principio de incertidumbre. | 11 |
| 3.1. Fundamentos físicos básicos: | 11 |
| 3.2. Cuestiones teóricas | 12 |
| 3.2.1. ¿Cuáles son las diferencias entre difracción de Fresnel y de Fraunhofer? | 12 |
| 3.2.2. Deducción de la expresión 5 | 12 |
| 3.2.3. ¿Para qué valor angular debe observarse el primer mínimo (primer orden)? ¿Y el segundo? | 13 |
| 3.2.4. Deducir cuanto debe valer la relación de intensidades entre el primer máximo secundario y el máximo principal. | 13 |
| 3.2.5. Deducir como se puede verificar el principio de incertidumbre a partir del experimento de difracción por una rendija. | 14 |
| 3.3. Material | 14 |
| 3.4. Realización experimental | 15 |
| 3.5. Resultados | 16 |
| 4. P3: Medida de la velocidad de la luz. | 18 |
| 4.1. Fundamentos físicos básicos | 18 |
| 4.2. Cuestiones teóricas | 18 |
| 4.3. Material | 20 |
| 4.4. Realización de la práctica | 21 |
| 4.4.1. Velocidad de la luz en el aire | 21 |
| 4.4.2. Velocidad de la luz en agua y resina | 21 |
| 4.4.3. Figuras de Lissajous | 23 |
| 5. P8: Análogo clásico de la distribución de Fermi-Dirac | 24 |
| 5.1. Fundamentos físicos básicos | 24 |
| 5.2. Material | 25 |
| 5.3. Realización de la práctica | 25 |

1. P1A: Efecto fotoeléctrico y determinación de la constante de Planck

1.1. Fundamentos físicos básicos

La energía de un fotón:

$$E = h \cdot \nu$$

h es la constante de Planck y ν la frecuencia de la radiación.

La **energía cinética** del electrón:

$$m \frac{v^2}{2} = h\nu - \Phi$$

donde Φ es la energía necesaria para que un electrón escape del metal.

La **energía cinética máxima** corresponde al valor mínimo de Φ , que es la **función de trabajo** del metal Φ_0 :

$$m \frac{v^2}{2} = h\nu - \Phi_0$$

Ecuación de Einstein para el efecto fotoeléctrico:

$$V_0 = \frac{h}{e}\nu - \frac{\Phi_0}{e} \quad (1)$$

donde V_0 es el **potencial de frenado**.

Si la frecuencia de radiación es menor que la **frecuencia umbral** (ν_0) no es posible la emisión.

$$\nu_0 = \frac{\Phi_0}{h} \quad (2)$$

En esta práctica mediremos el potencial de frenado V_0 para diferentes frecuencias, y así obtendremos el valor de la constante de Planck y de la función de trabajo del metal.

1.2. Material

- Lámpara espectral de mercurio.
- Lente de distancia focal de 10 cm.
- Filtros interferenciales:

| Color | λ (nm) |
|----------|----------------|
| Amarillo | 578 |
| Verde | 546 |
| Violeta | 436 |
| Violeta | 405 |
| UV | 365 |

Tabla 1: Longitudes de onda de los filtros interferenciales.

- Fototubo en el interior de una caja con obturador.

- Polímetro, cables de conexión.
- Amplificador.
- Filtros de densidad óptica.

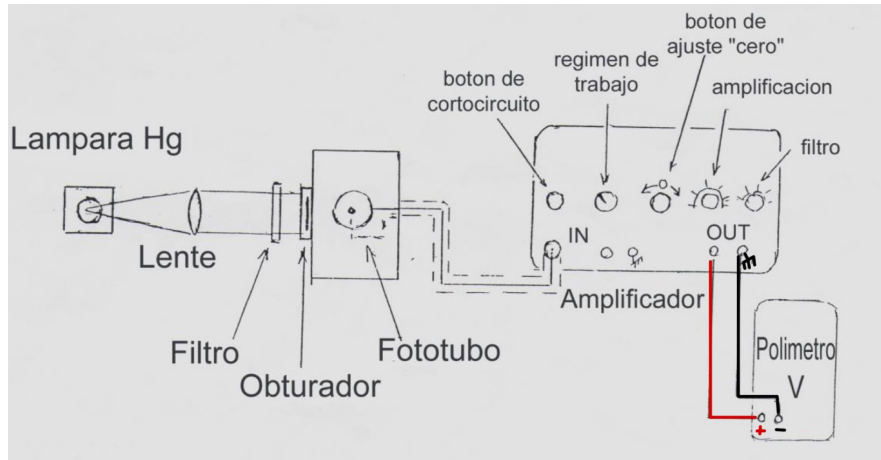


Figura 1: Esquema montaje experimental.

1.3. Realización de la práctica

En primer lugar encendemos la lámpara de mercurio, situamos la lente de manera que los rayos salgan paralelos (nos aseguramos de que la sección del haz se mantiene lo más uniforme y paralela posible a medida que varía la distancia de la pantalla) y colocamos uno de los filtros. Para conectar los cables para medir la diferencia de potencial utilizamos el polímetro. El amplificador se utiliza como electrómetro y tiene una gran impedancia por lo que debe ser descargado pulsando el botón de cortocircuito entre medidas hasta que el polímetro marque 0. Para comprobar que el resultado es aceptable realizaremos distintas medidas para cada color.

1.4. Resultados

Distinguimos dos partes:

1.4.1. Dependencia con la frecuencia

Representamos los valores de V_0 en función de la frecuencia.

| λ (nm) | V1 | V2 | V3 | \bar{V} (V) | Frecuencia (Hz) |
|----------------|-------|-------|-------|--------------------|-----------------------|
| 578 | 0,631 | 0,65 | 0,624 | $0,6350 \pm 0,013$ | $5,19 \times 10^{14}$ |
| 546 | 0,789 | 0,785 | 0,81 | $0,7945 \pm 0,013$ | $5,49 \times 10^{14}$ |
| 436 | 1,344 | 1,32 | 1,359 | $1,34 \pm 0,02$ | $6,88 \times 10^{14}$ |
| 405 | 1,523 | 1,541 | 1,578 | $1,54 \pm 0,03$ | $7,41 \times 10^{14}$ |
| 366 | 1,833 | 1,813 | 1,835 | $1,8270 \pm 0,012$ | $8,19 \times 10^{14}$ |

Tabla 2: Resultados frente a la frecuencia.

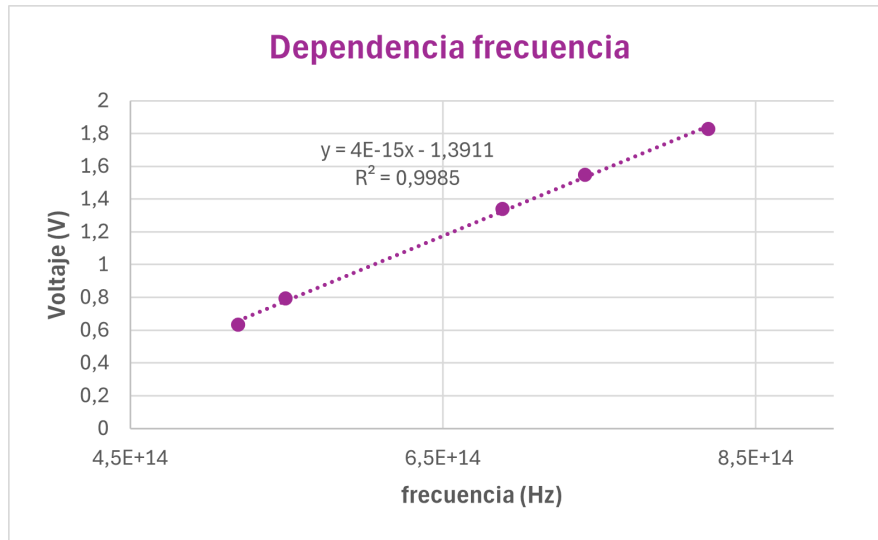


Figura 2: Gráfica dependencia con la frecuencia.

Hemos representado la ecuación 1. En el eje y hemos representado la diferencia de potencial, y en el eje x las frecuencias obtenidas a partir de las longitudes de onda: $\nu = \frac{c}{\lambda}$. Por lo tanto, la pendiente de la recta será la constante de Planck dividida entre la carga del electrón $e = 1,6 \times 10^{-19}$ C y la ordenada en el origen será la función de trabajo.

| Constante de Planck h ($J \cdot s$) | Función de trabajo Φ_0 (eV) |
|---|----------------------------------|
| $(6,32 \pm 0,14) \times 10^{-34}$ | $1,39 \pm 0,06$ |

Tabla 3: Resultados

La frecuencia umbral se obtiene de la ecuación 2 :

$$\nu_0 = \frac{1,39 \cdot 1,6 \times 10^{-19}}{6,32 \times 10^{-34}} = 3,5 \times 10^{14} \text{Hz}$$

1.4.2. Dependencia con la intensidad

En este apartado, repetimos el mismo procedimiento pero añadimos los filtros de densidad óptica.

| Frecuencia (Hz) | Diferencia de potencial (V) | | | | | |
|-----------------------|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,7 | 1 |
| $5,19 \times 10^{14}$ | 0,618 | 0,606 | 0,598 | 0,583 | 0,555 | 0,522 |
| $5,49 \times 10^{14}$ | 0,764 | 0,751 | 0,739 | 0,728 | 0,683 | 0,643 |
| $6,88 \times 10^{14}$ | 1,236 | 1,202 | 1,179 | 1,146 | 1,05 | 0,987 |
| $7,41 \times 10^{14}$ | 1,343 | 1,313 | 1,273 | 1,232 | 1,116 | 1,041 |
| $8,19 \times 10^{14}$ | 1,438 | 1,387 | 1,325 | 1,253 | 1,005 | 0,825 |

Tabla 4: Resultados frente a la intensidad.

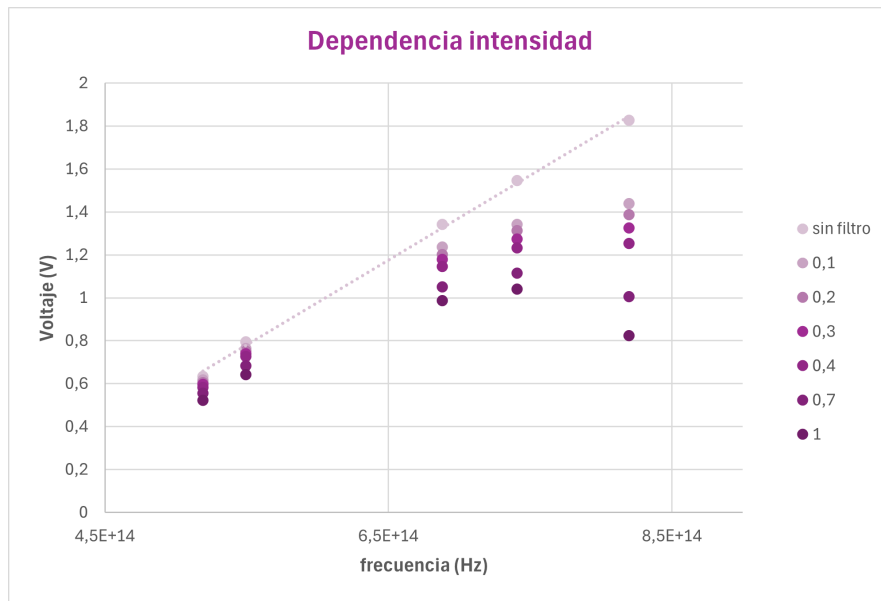


Figura 3: Gráfica dependencia con la intensidad.

2. P1C: Determinación de la constante de Planck con diodos emisores de luz (LEDs)

2.1. Fundamentos físicos básicos

Un LED es un semiconductor, consta de dos capas dopadas n y p. Los electrones llenan la banda conductora en el lado n y luego caen a la banda de valencia, en el lado p, con menor energía.

El **gap de energía**: diferencia de energía entre la banda de valencia y la de conducción. Para los LEDs varía en función del material. Influye en el valor de la energía de los fotones emitidos, por tanto en la frecuencia y en el color de la luz.

La **curva I-V**: a voltajes bajos, la intensidad de corriente es muy pequeña y a partir de un voltaje umbral V_{th} aumenta de forma exponencial.

La energía de los electrones que pasan de una banda a otra cuando el voltaje es el umbral se puede obtener a partir de este voltaje:

$$E = q \cdot V_{th} \quad (3)$$

Esta energía es la energía del fotón:

$$E = h \cdot \nu \quad (4)$$

2.2. Material

- LEDs:

| LEDs | λ (nm) |
|-------|----------------|
| UV | 399 nm |
| Azul | 463 nm |
| Verde | 530 nm |
| Rojos | 632 nm |
| IR | 921 nm |

Tabla 5: LEDs

- 2 multímetros
- Cables
- Fuente de alimentación

2.3. Montaje experimental 1

Se conectan los LEDs a la fuente de alimentación, con un multímetro se mide la caída de potencial V en el LED y con el otro la intensidad de corriente I .

Vamos aumentando el voltaje hasta conseguir una intensidad $I = 0,01$ mA, este será el voltaje V_{th} buscado.

| λ (nm) | ν (Hz) | V (V) | E (J) |
|----------------|------------|-------|-----------|
| 399 | 7,5188E+14 | 2,36 | 3,776E-19 |
| 463 | 6,8807E+14 | 2,12 | 3,392E-19 |
| 530 | 5,6604E+14 | 1,76 | 2,816E-19 |
| 632 | 4,7468E+14 | 1,35 | 2,16E-19 |
| 921 | 3,2573E+14 | 0,74 | 1,184E-19 |

Tabla 6: Resultados montaje 1

Representamos la energía $E = q \cdot V_{th}$ frente a la frecuencia para hallar la constante de Planck.

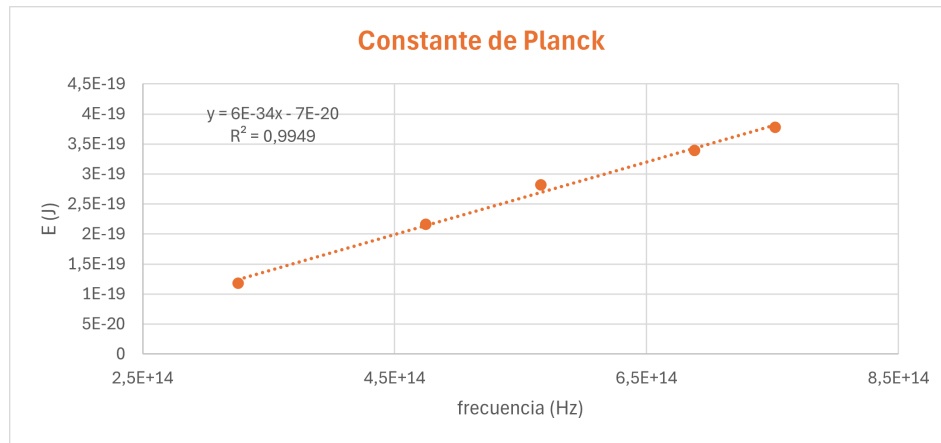


Figura 4: Representación energía frente a la frecuencia.

La pendiente de la recta es $h = (6,1 \pm 0,3) \times 10^{-34} J \cdot s$ que es compatible con el valor tabulado $h = 6,62 \times 10^{-34} J \cdot s$.

Ahora medimos la intensidad de corriente para diversos valores del voltaje para cada LED, y obtenemos las siguientes curvas I-V:

| IR $\lambda = 921$ nm | |
|-----------------------|-------|
| V (V) | I (A) |
| 0,74 | 0,001 |
| 1,07 | 0,096 |
| 1,24 | 0,343 |
| 1,42 | 0,689 |
| 1,62 | 1,073 |

Tabla 7: Infrarrojo

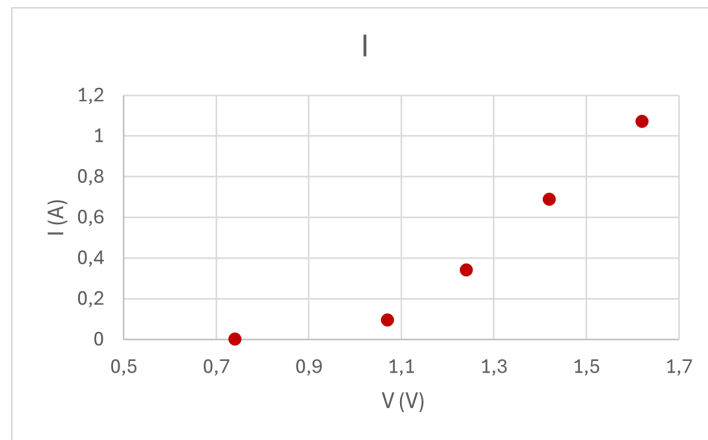


Figura 5: Curva I-V infrarrojo.

| Rojo ($\lambda = 632 \text{ nm}$) | |
|-------------------------------------|-------|
| V (V) | I (A) |
| 1,35 | 0,001 |
| 1,61 | 0,03 |
| 1,87 | 0,378 |
| 1,95 | 0,539 |
| 2,16 | 0,934 |

Tabla 8: Rojo

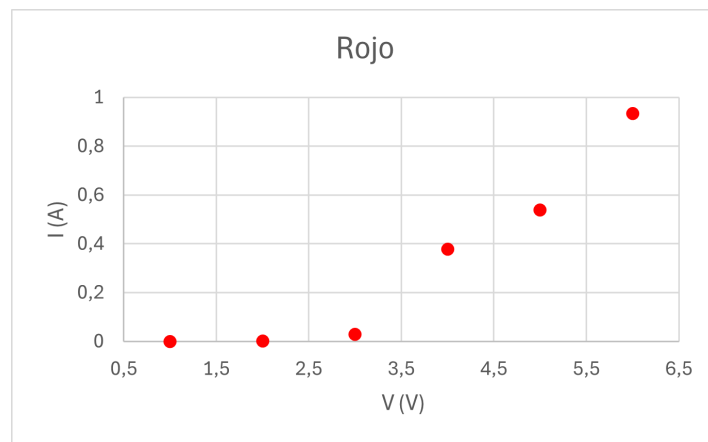


Figura 6: Curva I-V rojo.

| Verde $\lambda = 530 \text{ nm}$ | |
|--|--------------|
| V (V) | I (A) |
| 1,76 | 0,001 |
| 2,51 | 0,047 |
| 2,73 | 0,21 |
| 2,98 | 0,62 |
| 3,17 | 1,002 |

Tabla 9: Verde

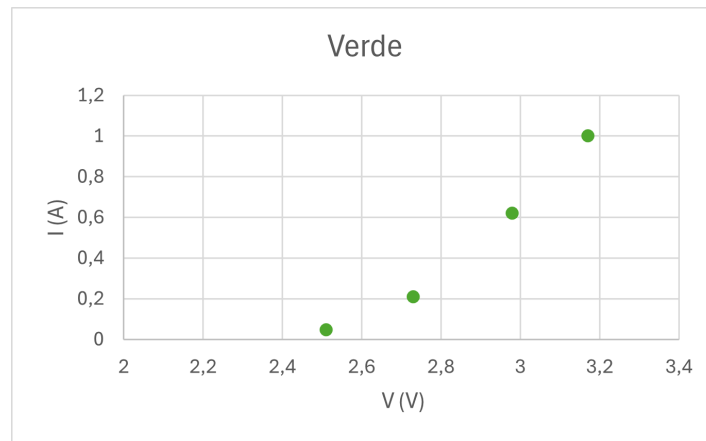


Figura 7: Curva I-V verde.

| Azul ($\lambda = 463 \text{ nm}$) | |
|---|--------------|
| V (V) | I (A) |
| 2,12 | 0,001 |
| 2,52 | 0,082 |
| 2,67 | 0,249 |
| 2,9 | 0,614 |
| 3,09 | 0,964 |

Tabla 10: Azul

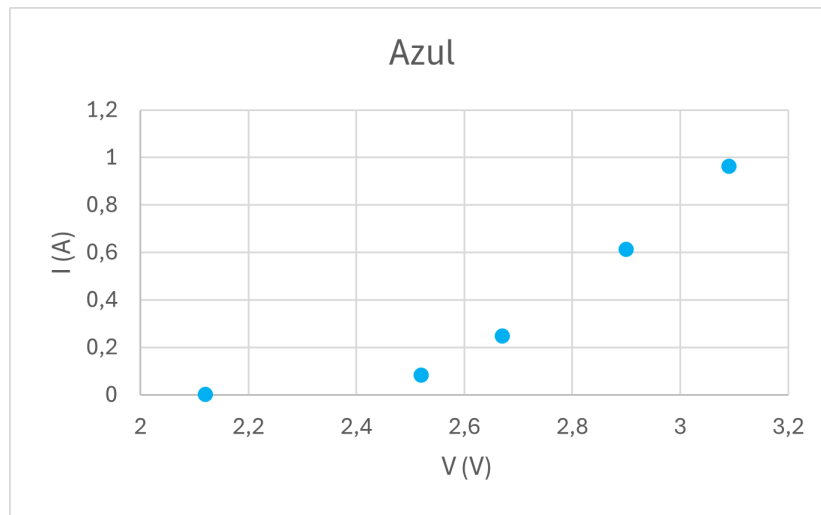


Figura 8: Curva I-V azul.

| UV $\lambda = 399 \text{ nm}$ | |
|-------------------------------|-------|
| V (V) | I (A) |
| 2,36 | 0,001 |
| 2,73 | 0,03 |
| 3,1 | 0,309 |
| 3,48 | 0,749 |
| 3,75 | 1,08 |

Tabla 11: UV

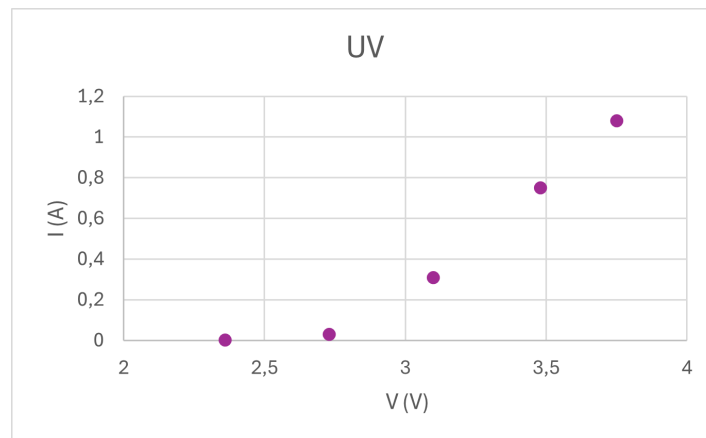


Figura 9: Curva I-V UV.

2.4. Montaje experimental 2

En este apartado tomamos las mismas medidas pero sin utilizar un amperímetro, detectamos el voltaje umbral viendo cuándo se enciende el LED. En este caso no podremos obtener el voltaje para el infrarrojo.

| λ (nm) | ν (Hz) | V (V) | E (J) |
|----------------|------------|-------|-------------------------|
| 399 | 7,5188E+14 | 2,88 | $4,608 \times 10^{-19}$ |
| 463 | 6,8807E+14 | 2,53 | $4,048 \times 10^{-19}$ |
| 530 | 5,6604E+14 | 2,14 | $3,424 \times 10^{-19}$ |
| 632 | 4,7468E+14 | 1,67 | $2,672 \times 10^{-19}$ |

Tabla 12: Resultados experimentales montaje 2.

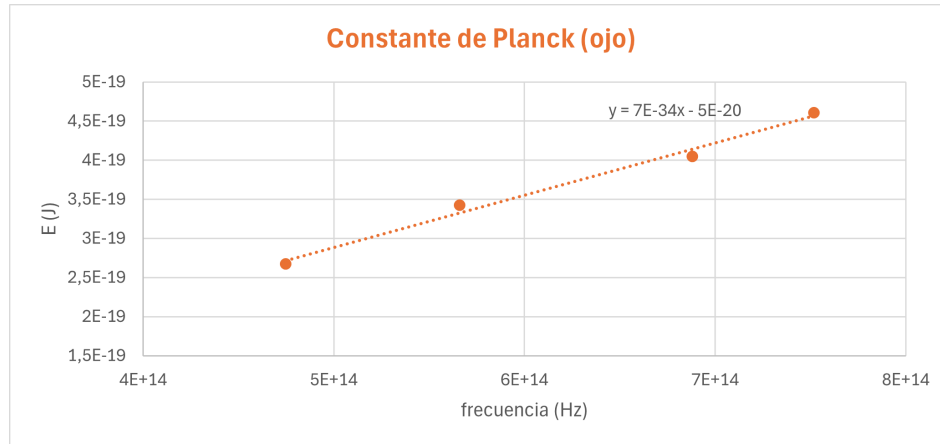


Figura 10: Representación energía frente a la frecuencia (ojo).

La pendiente de la recta es $h = (6,7 \pm 0,5) \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ que es compatible con el valor tabulado $h = 6,62 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$.

3. P2: Difracción de luz por una rendija y relación con el principio de incertidumbre.

3.1. Fundamentos físicos básicos:

- **Difracción de luz por una rendija (Fraunhofer):** El tamaño de la rendija es del orden de la longitud de onda de la luz, y la pantalla está situada a una distancia lo suficientemente grande. La intensidad en función del ángulo de desviación:

$$I(\theta) = I(0) \cdot \left(\frac{\sin(\beta)}{\beta} \right)^2 \quad (5)$$

$$\beta = \frac{\pi a}{\lambda} \sin(\theta) \quad (6)$$

donde a es la anchura de la rendija.

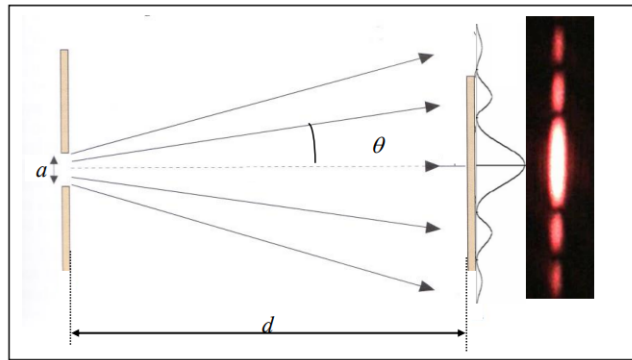


Figura 11: Difracción en una rendija.

- **Principio de incertidumbre de Heisenberg:** La posición (x) y el momento (p_x) no pueden determinarse simultáneamente con una precisión más elevada que:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \sim h \quad (7)$$

Las partículas que vamos a considerar son fotones, cuyo momento lineal asociado es:

$$p = \frac{h}{\lambda} \quad (8)$$

3.2. Cuestiones teóricas

3.2.1. ¿Cuáles son las diferencias entre difracción de Fresnel y de Fraunhofer?

La difracción de Fraunhofer es un caso particular de la de Fresnel. Sea F el número de Fresnel:

$$F = \frac{a^2}{\lambda d} \quad (9)$$

donde a es la anchura de la rendija, d la distancia del obstáculo y λ la longitud de onda de la luz. La **difracción de Fresnel** tiene lugar cuando :

$$F \geq 1$$

Mientras que la **difracción de Fraunhofer** tiene lugar cuando:

$$F \leq 1$$

3.2.2. Deducción de la expresión 5

Consideraremos que las infinitas fuentes secundarias de ondas están distribuidas a lo largo de la rendija.

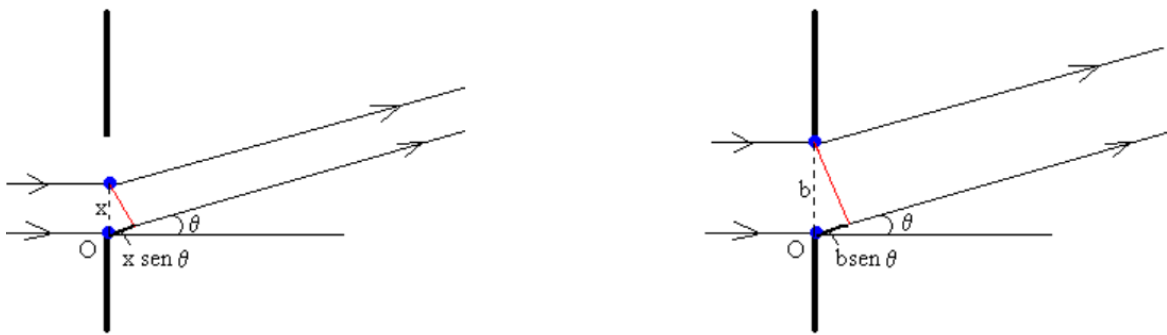
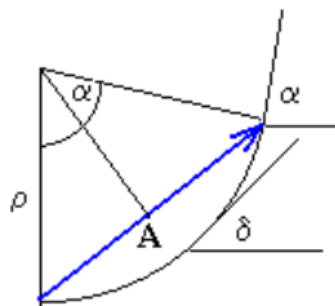


Figura 12: Esquema demostración.

La diferencia de camino entre la fuente que pasa por el origen y la que pasa por x es : $x \cdot \sin(\theta)$. Mientras que la diferencia de camino entre la fuente situada en el origen y la situada en el otro extremo es: $a \cdot \sin(\theta)$. La suma de los infinitos vectores de amplitud infinitesimal produce un arco de circunferencia cuya cuerda resultante es A .



El ángulo δ que forma el vector situado en x con la horizontal vale $kx \sin(\theta)$. Mientras que el que forma el vector situado en $x = a$ vale: $k \cdot a \cdot \sin(\theta) = 2\pi a \frac{\sin(\theta)}{\lambda}$. Este ángulo es el mismo que el del arco de la semicircunferencia de radio r .

$$A = 2r \sin\left(\frac{1}{2}\right) \alpha = 2r \sin \frac{\pi a \sin(\theta)}{\lambda}$$

$$A_0 = r \alpha = r \frac{2\pi a \sin(\theta)}{\lambda}$$

Si hacemos el cociente $\frac{A}{A_0}$ se nos queda:

$$A = A_0 \left(\frac{\sin\left(\frac{\pi a \sin(\theta)}{\lambda}\right)}{\frac{\pi a \sin(\theta)}{\lambda}} \right)$$

Como la intensidad es proporcional al cuadrado de la amplitud:

$$I = I(0) \cdot \left(\frac{\sin(\beta)}{\beta} \right)^2$$

donde:

$$\beta = \frac{\pi a}{\lambda} \sin(\theta)$$

3.2.3. ¿Para qué valor angular debe observarse el primer mínimo (primer orden)? ¿Y el segundo?

Calculamos la derivada de I respecto de β e igualamos a 0:

$$\frac{dI}{d\beta} = I_0 \frac{2\sin(\beta)(\beta \cos(\beta) - \sin(\beta))}{\beta^3} = 0 \begin{cases} \sin \beta = 0 \\ \beta \cos(\beta) - \sin(\beta) = 0 \end{cases}$$

De la primera solución $\sin \beta = 0$ obtenemos que el primer mínimo se obtiene en $\beta = \pm\pi$, el segundo en $\beta = \pm 2\pi$, y así sucesivamente.

3.2.4. Deducir cuanto debe valer la relación de intensidades entre el primer máximo secundario y el máximo principal.

Para ello utilizaremos:

$$\beta \cos(\beta) - \sin(\beta) = 0 \Leftrightarrow \beta \cos(\beta) = \sin(\beta)$$

$$\tan(\beta) = \beta$$

Graficamos y obtenemos que la ecuación se cumple para $\beta = 4,492$ rad. Si decimos que la intensidad del máximo central es la máxima, siendo $I_1 = I_0$, entonces la intensidad del primer máximo secundario es:

$$I_2 = I_0 \frac{\sin(257,4)^2}{4,492^2} = 0,0472 I_0$$

Y podemos obtener la relación entre I_1 e I_2 :

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{I_0}{0,0472 I_0} = 21,18$$

3.2.5. Deducir como se puede verificar el principio de incertidumbre a partir del experimento de difracción por una rendija.

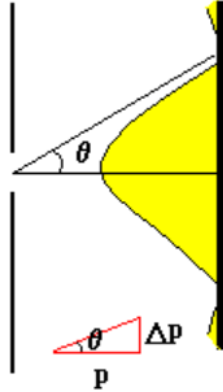


Figura 13: Relación difracción con principio de incertidumbre.

Sea Δ la diferencia de camino óptico:

$$\Delta = \Delta x \cdot \text{sen}(\theta) = m\lambda = 1 \cdot \lambda$$

$$\Delta x = \frac{\lambda}{\text{sen}(\theta)} \quad (10)$$

De la figura sacamos que:

$$\text{sen}(\theta) = \frac{\Delta p}{p}$$

Si sustituimos en la ecuación 10 obtenemos:

$$\Delta x = \frac{\lambda \cdot p}{\Delta p} \Leftrightarrow \Delta x \cdot \Delta p = \lambda \cdot p$$

Utilizando la longitud de onda de De Broglie: $p = \frac{h}{\lambda}$:

$$\Delta x \cdot \Delta p = h$$

3.3. Material

- Láser de He-Ne ($\lambda=633$ nm).
- Rendija y soporte.
- Pantalla.
- Microscopio (para medir la anchura de la rendija).
- Fotorresistencia (para medir la intensidad de la luz).
- Polímetro..

Una **fotorresistencia** es una resistencia cuyo valor cambia ante las variaciones de luz. Cuando incide luz sufre una reacción química que altera su resistencia eléctrica. Su funcionamiento se basa en el efecto fotoeléctrico.

Si la luz que incide es de alta frecuencia, los electrones absorbidos por el semiconductor dan a los electrones enlazados suficiente energía para saltar a la banda de conducción. Estos electrones libres son los que conducen la electricidad, lo que reduce la resistencia, ya que es inversamente proporcional a la intensidad.

Por otro lado, para medir el ancho de la rendija, utilizaremos el **microscopio**. Cuando la imagen se vea nítida contamos las líneas que mide (1,9). Colocamos la regla en el microscopio y vemos cuánto miden las líneas que hemos contado, y obtenemos:

$$a = 0,06 \pm 0,01 \text{ mm}$$

3.4. Realización experimental

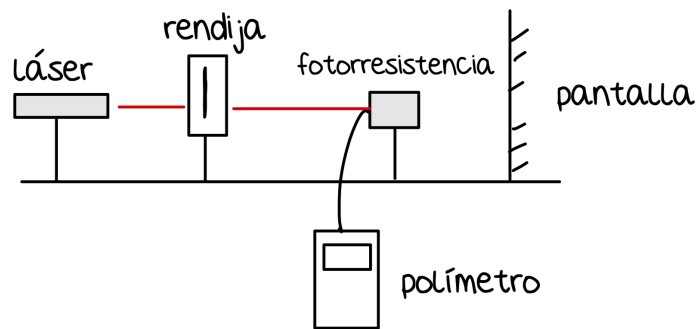


Figura 14: Montaje experimental.

Con el montaje de la figura 14 medimos la distribución de la intensidad de la luz difractada por la rendija sobre la pantalla (desde el segundo mínimo de un extremo hasta el segundo mínimo del otro, medimos ida y vuelta). Variamos la posición de la fotorresistencia de 1 mm en 1 mm. El polímetro nos da el valor de la resistencia, para obtener la intensidad graficamos $\frac{1}{R}$. Y calcularemos el ángulo de desviación θ en cada punto:

$$\theta = \arctan\left(\frac{x}{D}\right)$$

donde D es la distancia entre la rendija y la fotorresistencia:

$$D = 135,0 \pm 0,1 \text{ cm}$$

3.5. Resultados

En primer lugar representamos la intensidad ($\frac{1}{R}$) frente a x , que es la distancia entre el fotodetector y el máximo central.

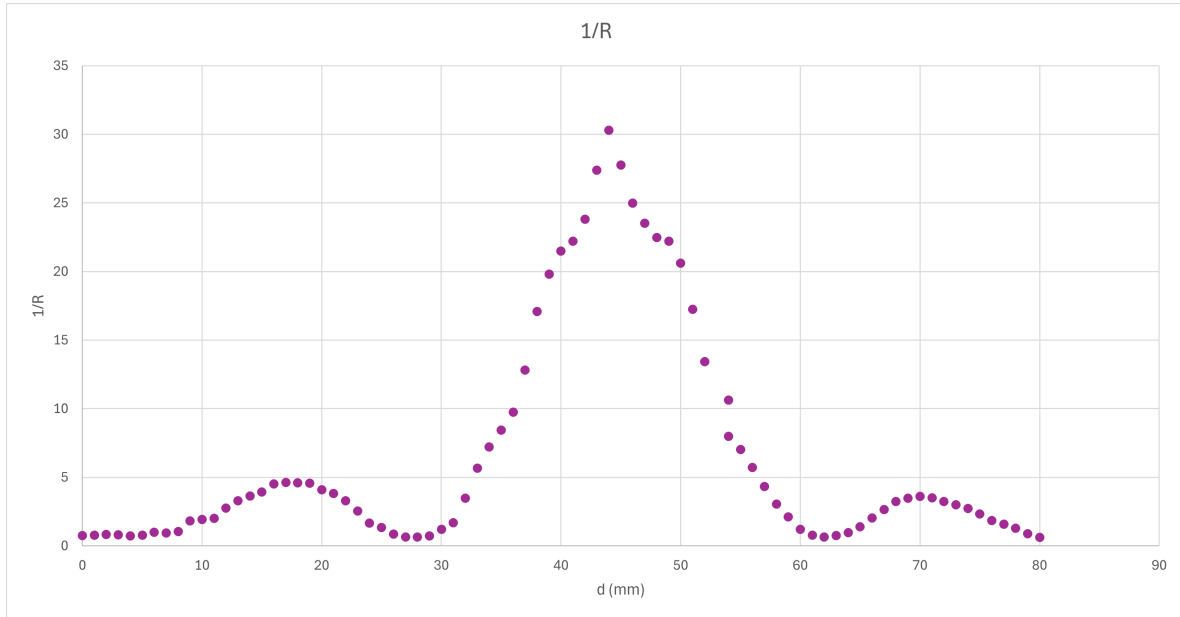


Figura 15: Intensidad.

En el máximo central es donde se mide el valor mínimo de la resistencia, por tanto $I_0 = 3,03 \times 10^{-5} \Omega^{-1}$ que es el valor máximo de la intensidad porque $I = \frac{1}{R}$. A continuación representamos $\frac{I}{I_0}$ en función del ángulo de desviación, y obtenemos la siguiente gráfica normalizada:

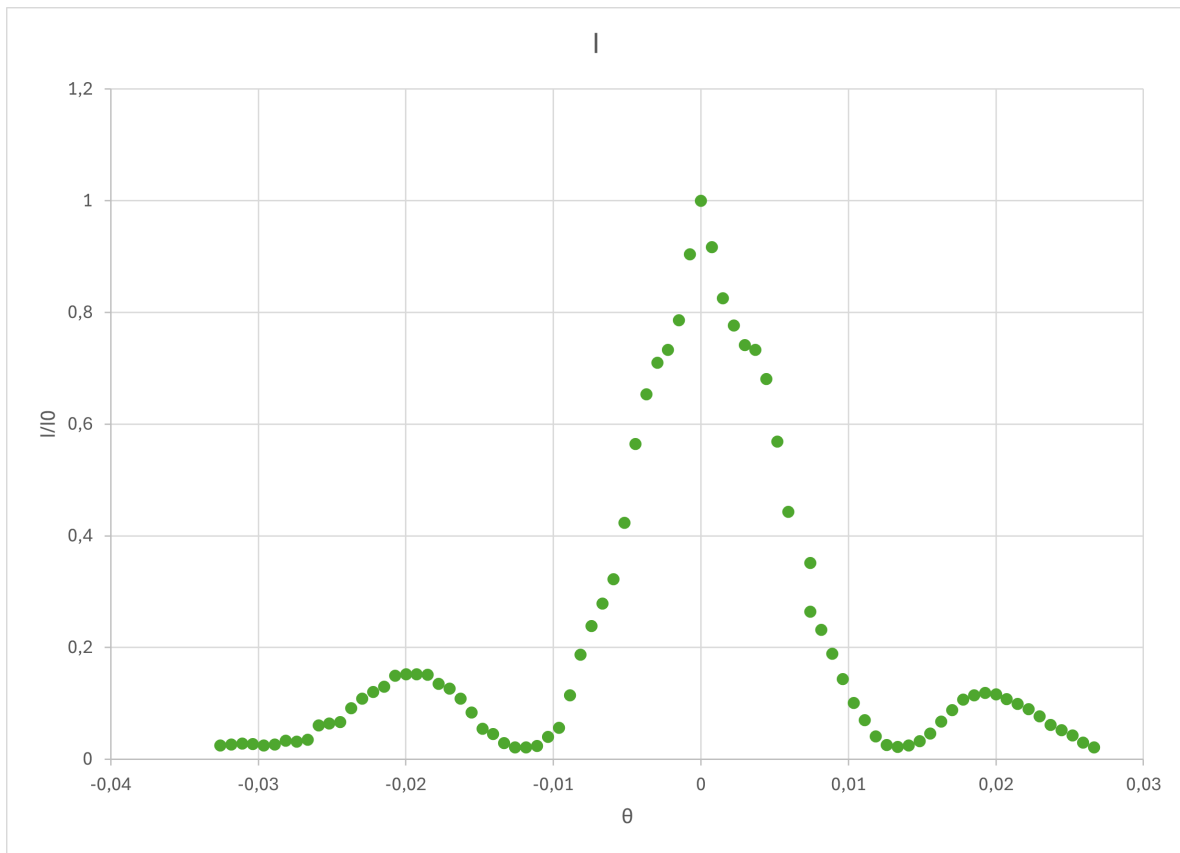


Figura 16: Intensidad frente al ángulo de desviación.

Comprobación principio de incertidumbre:

El primer mínimo se obtiene en:

$$\beta = \pi = \frac{\pi a \sin(\theta)}{\lambda} \Rightarrow \theta = \arcsen\left(\frac{\lambda}{a}\right) = 0,604 \text{ rad}$$

$$\Delta p = p \sin(\theta) = \frac{h}{\lambda} \sin(\theta) = 16587,67 \cdot h$$

$$\Delta x = 0,06 \text{ mm}$$

Entonces:

$$\Delta x \cdot \Delta p \simeq h$$

4. P3: Medida de la velocidad de la luz.

4.1. Fundamentos físicos básicos

Vamos a determinar la velocidad de la luz considerando el recorrido de un espacio pequeño. Mediremos desfases en lugar de tiempos. El haz recorre una distancia $\Delta S/2$ en el aire, incide en el reflector y vuelve al fotodiodo, en ese instante ha recorrido ΔS y tiene un retraso temporal Δt que es equivalente a un desfase $\Delta\varphi$. La velocidad de la luz viene dada por:

$$c = \frac{\Delta S}{\Delta t} = \omega \frac{\Delta S}{\Delta\varphi} = 2\pi f \frac{\Delta S}{\Delta\varphi} \quad (11)$$

4.2. Cuestiones teóricas

Obtener la expresión matemática que se debe utilizar para obtener la velocidad de la luz en medios diferentes del aire y para obtener el índice de refracción de cada medio.

La velocidad de la luz a través de la materia es menor que en el vacío, porque la luz interactúa con los átomos de un material. Podemos definir una constante de un material que describe la velocidad de la luz en él, es el **índice de refracción n**:

$$n = \frac{c}{v} \quad (12)$$

Para obtener la velocidad de la luz en un medio distinto del aire:

$$v = \frac{\Delta S}{\Delta t}$$

Donde ΔS es la longitud del medio, y Δt el tiempo que tarda en recorrer dicho medio. Podemos sacar Δt con la siguiente expresión:

$$\Delta t_{total} = \Delta t_{aire} + \Delta t_{medio}$$

Conocida la velocidad de la luz en el aire y la distancia recorrida se puede saber Δt_{aire} . Y de esta manera la velocidad será:

$$v_{medio} = \frac{2\Delta L}{\Delta t_{medio}} \quad (13)$$

$$v_{medio} = \frac{2\Delta L}{\Delta t_{total} - \frac{(\Delta S - 2\Delta x - 2\Delta L)}{c}}$$

¿El índice de refracción obtenido depende de la frecuencia de la luz? ¿y de la longitud de onda? Explicar de qué modo podría experimentalmente determinarse la curva de dispersión del índice de refracción.

No depende de la frecuencia pero sí de la longitud de onda, es decir, la longitud de onda cambia cuando la luz pasa de un medio a otro.

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

donde λ_0 es la longitud de onda en el vacío.

Si $n > 1$ entonces $\lambda_0 > \lambda$, la longitud de onda de la luz λ_0 de una determinada frecuencia f , que se propaga en el vacío (o en el aire) es mayor que la longitud de onda λ de la misma radiación que se propaga en un medio de índice de refracción n .

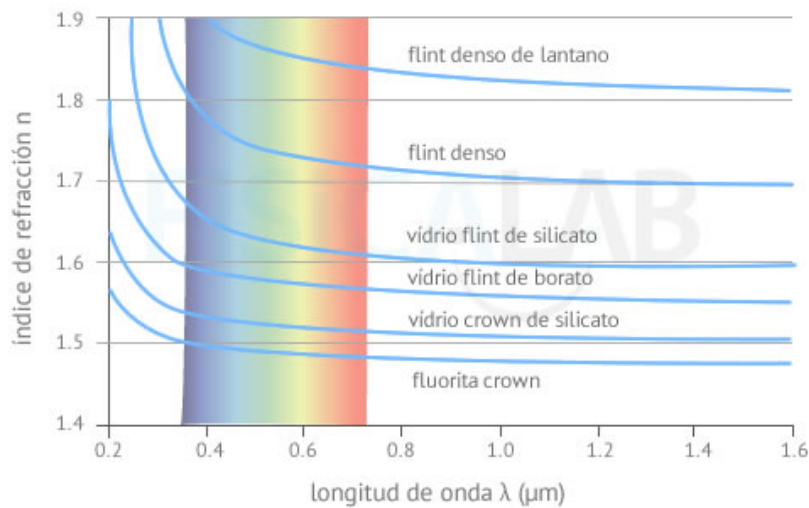


Figura 17: Curva de dispersión del índice de refracción para diferentes materiales.

En la figura 17 tenemos representados diferentes índices de refracción en función de la longitud de onda. Para obtener esta curva experimentalmente se pueden utilizar diferentes métodos de espectroscopía. Por ejemplo, mediante un espectrogoniómetro con un prisma y distintas lámparas (de H, He, etc). El prisma descompone la luz emitida en diferentes longitudes de onda, con el anteojo del espectrogoniómetro observamos el espectro visible del componente utilizado. Mediante la siguiente fórmula que relaciona el índice de refracción y el ángulo de desviación mínima, obtenemos los diferentes valores de n :

$$n = \frac{\text{sen}\left(\frac{\delta_m + \alpha}{2}\right)}{\text{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right)}$$

Conocidas las longitudes de onda que componen el espectro atómico que estemos observando, se pueden representar los índices obtenidos en función de dichas longitudes de onda.

¿Qué figuras de Lissajous se forman cuando la frecuencia de las ondas es la misma, para distintos valores de desfase?

¿Cómo afecta la amplitud de las ondas en la figura formada? Las figuras de Lissajous se obtienen con la superposición de dos movimientos armónicos perpendiculares. La trayectoria resultante dependerá de la relación de las frecuencias y de la diferencia de fase. Algunas de las posibles figuras que podremos obtener son:

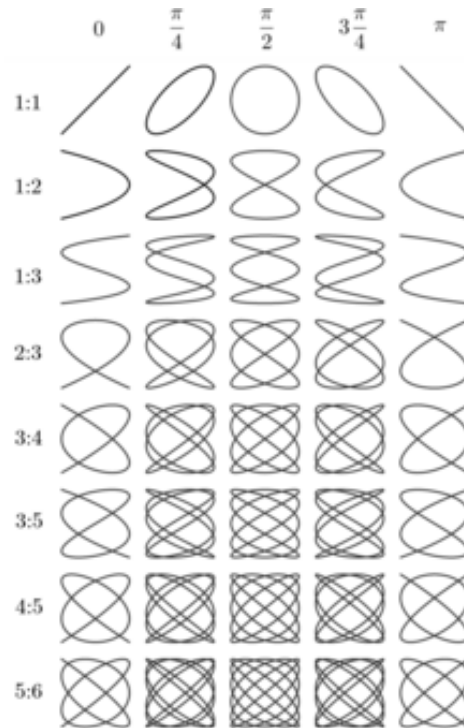


Figura 18: Figuras de Lissajous.

4.3. Material

- Unidad emisora-receptora de luz láser modulada con una frecuencia $f_{\text{emmit}} = 50 \text{ MHz}$.
- Banco óptico.
- Reflector sujetado en soporte que puede deslizar por el banco.
- Tubo cilíndrico con agua y soportes.
- Bloque de resina sintética y soportes
- Osciloscopio y cables blindados.
- 2 generadores de onda para generar figuras de Lissajous.

4.4. Realización de la práctica

4.4.1. Velocidad de la luz en el aire

Seleccionamos el modo $\Delta\varphi$ en la unidad emisora-receptora, y vamos moviendo el receptor por el banco óptico. Anotamos las distintas posiciones (de 5 cm en 5cm) hasta llegar a un desfase de 180° . Representamos la distancia multiplicada por la frecuencia frente al desfase, y la pendiente nos dará el valor de la velocidad de la luz en el aire.

$$2\pi f \Delta S = \Delta\varphi \cdot c$$

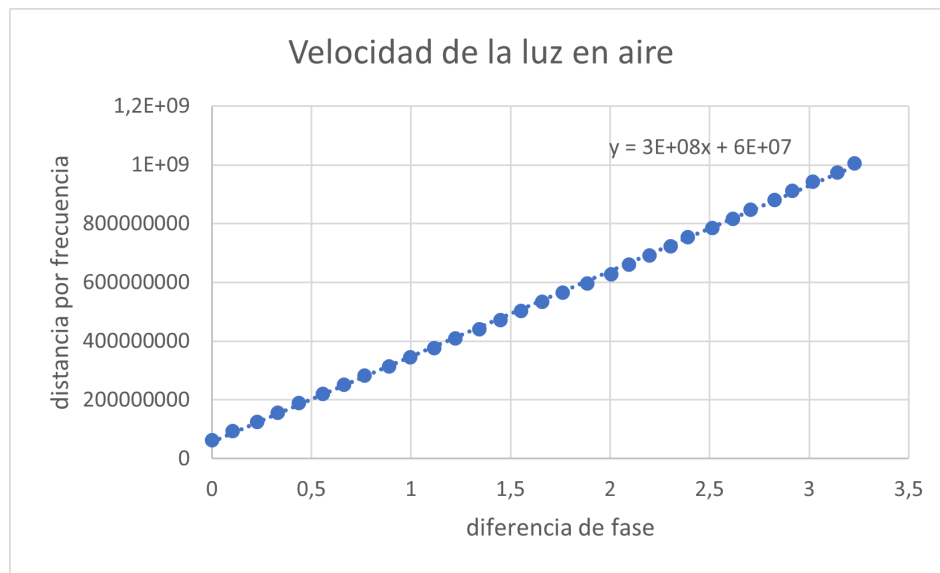


Figura 19: Ajuste lineal para obtener velocidad de la luz en aire.

La pendiente es $c = (2,91 \pm 0,01) \times 10^8 \text{ m/s}$.

4.4.2. Velocidad de la luz en agua y resina

A continuación, colocamos primero el tubo con agua y luego la resina. Movemos el reflector hasta que el desfase vuelva a ser 180° , por lo que el reflector se mueve una distancia Δx respecto de la posición para el aire.

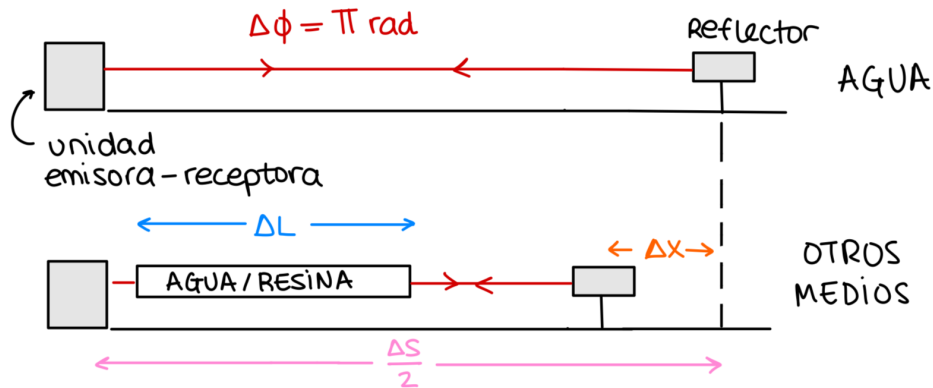


Figura 20: Esquema

Medimos los datos que nos faltan para utilizar la fórmula 13. En esta expresión utilizamos tiempos, pero nosotros mediremos desfases, no podemos medir tiempos tan pequeños. Usamos la siguiente relación con el desfase:

$$\Delta x = \frac{\Delta\varphi}{\omega} = \frac{\Delta\varphi}{2\pi f}$$

| AGUA | | | |
|----------------|---------------------|----------------|--------------------------|
| ΔL (m) | $\Delta\varphi$ (°) | Δx (m) | $\frac{\Delta S}{2}$ (m) |
| 0,5 | 180 | 0,22 | 1,57 |

Tabla 13: Datos para calcular velocidad de la luz en agua

Sustituimos estos valores en 13 y obtenemos:

$$v_{agua} = 2,411 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$n_{agua} = 1,25$$

Siguiendo el mismo procedimiento con la resina, obtenemos:

| AGUA | | | |
|----------------|---------------------|----------------|--------------------------|
| ΔL (m) | $\Delta\varphi$ (°) | Δx (m) | $\frac{\Delta S}{2}$ (m) |
| 0,49 | 180 | 0,3 | 1,57 |

Tabla 14: Datos para calcular velocidad de la luz en agua

$$v_{resina} = 2,11 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$n_{resina} = 1,419$$

| VALORES TABULADOS | |
|-------------------|--------|
| n_{agua} | 1,333 |
| n_{resina} | 1,5646 |

Tabla 15: Valores teóricos de los índice de refracción.

4.4.3. Figuras de Lissajous

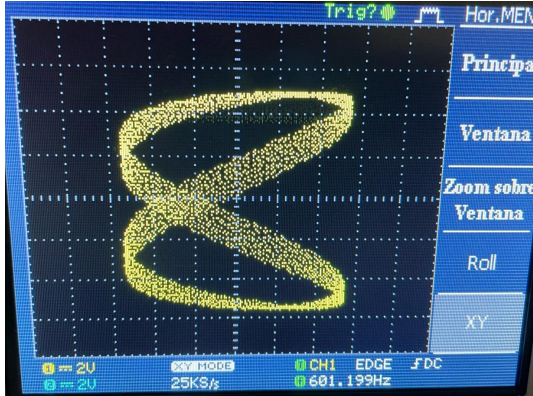


Figura 21: Relación de frecuencia=1 : 2,
relación de fase = $3\pi/4$

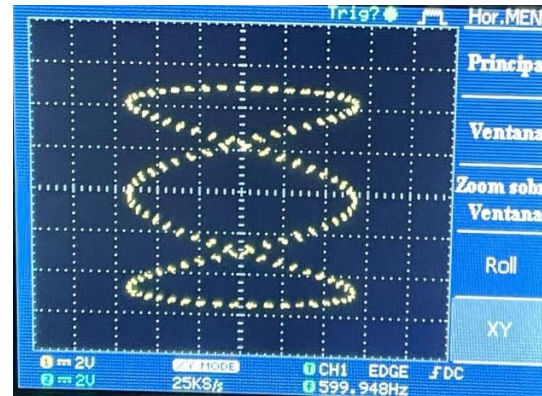


Figura 22: relación de frecuencia=1 : 3,
relación de fase= $\pi/2$

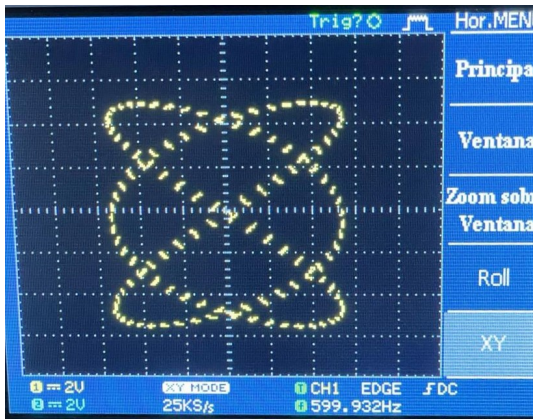


Figura 23: Relación de frecuencia=2 : 3,
relación de fase: $\pi/2$

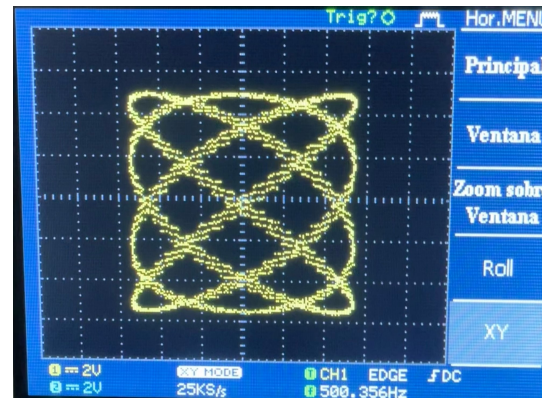


Figura 24: Relación de frecuencia=4 : 5,
relación de fase= $3\pi/4$

5. P8: Análogo clásico de la distribución de Fermi-Dirac

5.1. Fundamentos físicos básicos

- **Principio de expulsión de Pauli:** dos partículas no pueden estar en el mismo estado. Los fermiones cumplen este principio.
- **Distribución Fermi-Dirac:**

$$\bar{n}(\epsilon) = \frac{1}{e^{(\epsilon-\mu)/kT} + 1} \quad (14)$$

donde $\bar{n}(\epsilon)$ es el número medio de fermiones (o probabilidad de encontrar un fermión) en un estado de energía ϵ , para una temperatura T y potencial químico μ , y k representa la constante de Boltzmann.

- Si ϵ es muy alta, \bar{n} tiende a 0.
- El valor máximo de \bar{n} es 1.
- La energía del último estado ocupado corresponde con el **potencial químico**.
- Al aumentar T , los fermiones en el último estado ocupado pasan a ocupar estados de energía más alta y la función será como en la imagen 25.

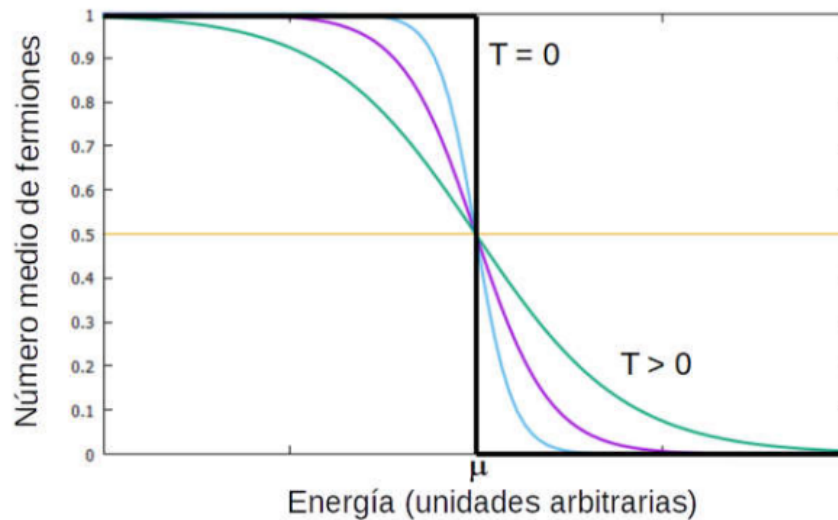


Figura 25: Distribución Fermi-Dirac.

- Energía de Fermi: $\mu(T = 0) = E_F$

5.2. Material

- Vibrador mecánico y pistón: hace vibrar las esferas que se colocan en una capa.
- Esferas metálicas.
- Dispositivo que cuenta las esferas, es una horquilla con un emisor y receptor de luz, cuenta cuando una esfera interrumpe el haz de luz.
- Fuente de alimentación: aplicamos un cierto voltaje a un generador de funciones de onda, con el variamos la frecuencia.

5.3. Realización de la práctica

Conectamos el motor, una vez se ha situado la horquilla a una altura tal que el haz atraviese el recipiente en una zona sin bolas. Ajustamos la frecuencia y la amplitud de vibración de manera que las bolas de la superficie estén saltando y algunas lleguen a atravesar el haz de luz.

1. **Determina el valor de la variable que correspondería al potencial químico en tu análogo clásico.**

Esquema del experimento:

| Caso cuántico | Caso clásico |
|--|--|
| Energía | Altura |
| Temperatura | Frecuencia y Amplitud |
| Potencial químico | Altura con \bar{n} máximo |
| \bar{n} número medio fermiones en un estado de energía | tasa de cambio bolas cruzan una altura determinada |

Tabla 16: Esquema del experimento.

En nuestro análogo clásico, μ es la altura para la cual el número de bolitas es máximo. Cuando las bolas dejan de vibrar.

Lo que vemos experimentalmente es cómo cambia el número de bolas que pasan una determinada altura. Por ello, derivamos la ecuación 14:

$$\frac{d\bar{n}}{d\epsilon} = -1 \cdot (e^{(\epsilon-\mu)/kT} + 1)^{-2} \frac{d}{d\epsilon} (e^{(\epsilon-\mu)/kT} + 1)^{-2} = \frac{\frac{-1}{kT} e^{(\epsilon-\mu)/kT}}{(e^{(\epsilon-\mu)/kT} + 1)^{-2}}$$

Representamos (cualitativamente) esta función para comparar con los resultados obtenidos experimentalmente:

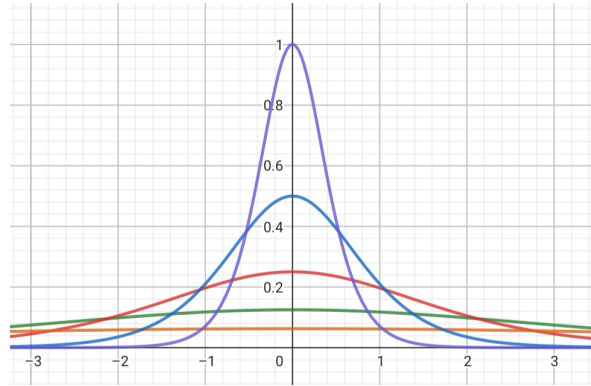


Figura 26: Representación derivada.

Vemos que al aumentar el producto $k \cdot T$ la función se va haciendo cero.

2. Una vez seleccionadas la frecuencia y la amplitud adecuadas, toma nota del número de registros para diferentes alturas fijando un tiempo de medición. Con una frecuencia de 0,6 y fijando un tiempo de 30 segundos.

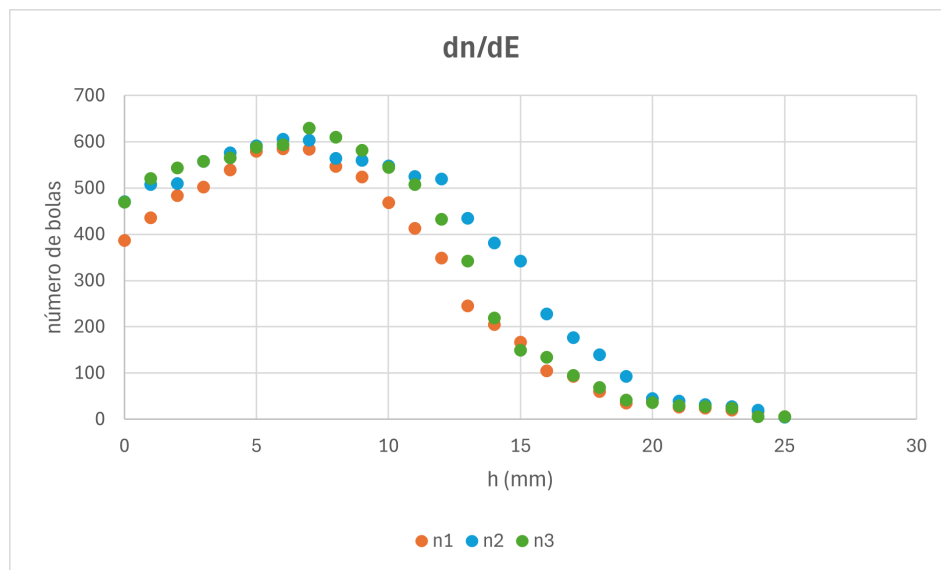


Figura 27: Resultados

| h(mm) | n1 | n2 | n3 |
|--------------|-----------|-----------|-----------|
| 25 | 6 | 4 | 6 |
| 24 | 17 | 20 | 6 |
| 23 | 20 | 27 | 24 |
| 22 | 24 | 32 | 27 |
| 21 | 26 | 39 | 29 |
| 20 | 38 | 45 | 36 |
| 19 | 35 | 93 | 41 |
| 18 | 60 | 140 | 69 |
| 17 | 93 | 177 | 95 |
| 16 | 105 | 228 | 134 |
| 15 | 167 | 342 | 149 |
| 14 | 205 | 381 | 219 |
| 13 | 245 | 435 | 342 |
| 12 | 349 | 519 | 432 |
| 11 | 413 | 525 | 508 |
| 10 | 468 | 548 | 545 |
| 9 | 524 | 560 | 582 |
| 8 | 547 | 564 | 610 |
| 7 | 584 | 603 | 629 |
| 6 | 585 | 606 | 594 |
| 5 | 579 | 591 | 588 |
| 4 | 539 | 576 | 565 |
| 3 | 502 | 558 | 558 |
| 2 | 483 | 510 | 543 |
| 1 | 436 | 507 | 521 |
| 0 | 387 | 470 | 469 |

Tabla 17: Resultados

3. Haz lo mismo para diferentes valores de la amplitud y frecuencias. Misma amplitud y aumentamos la frecuencia:

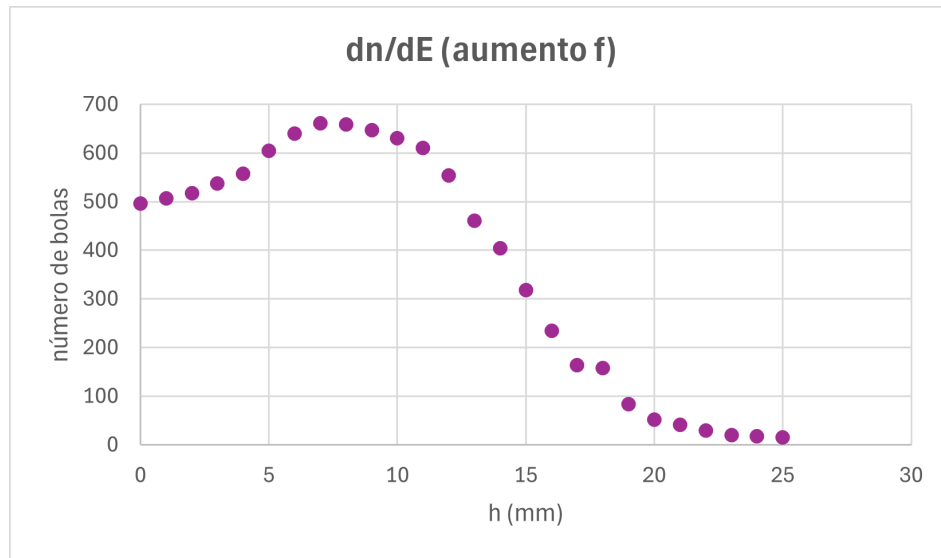


Figura 28: Aumento frecuencia

Misma amplitud y disminuimos la frecuencia:

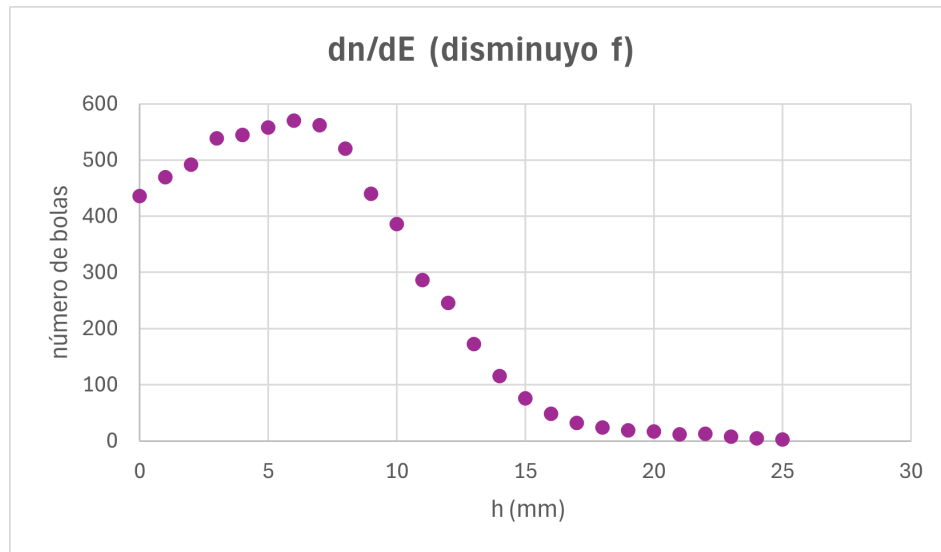


Figura 29: Disminuyo frecuencia

El número de bolas a altas alturas es mayor al aumentar la frecuencia. En cambio al disminuir la frecuencia el número máximo de bolas aumenta. Sin embargo, en los dos casos se obtiene el máximo en la misma altura.

Ahora fijamos la frecuencia y cambiamos la amplitud.

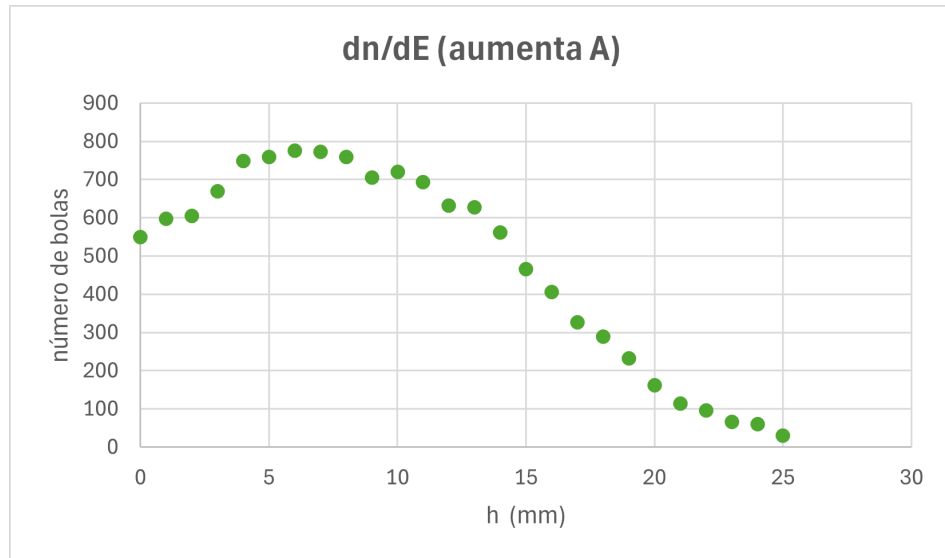


Figura 30: Aumento de la amplitud.

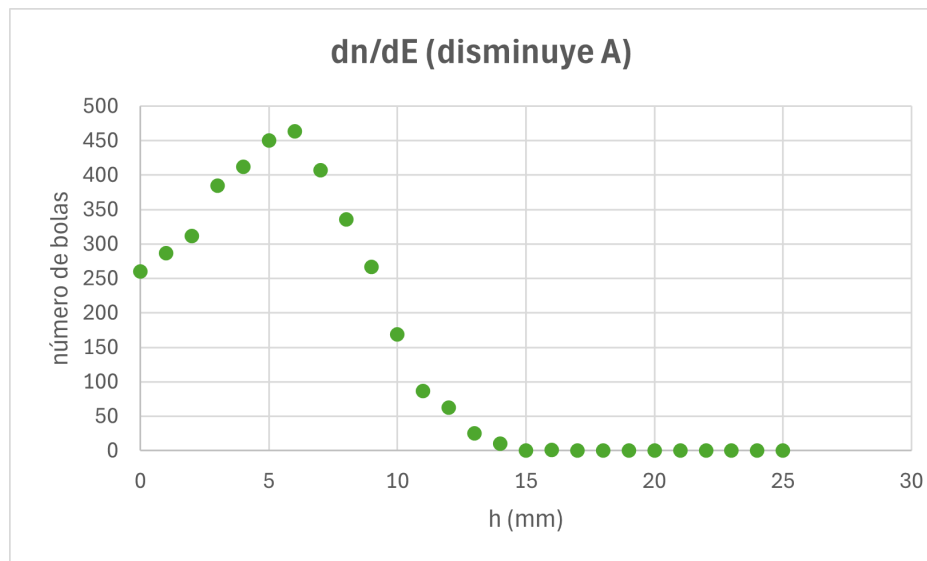


Figura 31: Disminuye la amplitud.

Al aumentar la amplitud, aumenta el número de bolas registradas. Para menor amplitud, se estrecha la función y el máximo se obtiene a menor altura.