
EL ESTROBOSCOPIO A RANURAS Y SU VALOR DIDACTICO¹

Elisa Colombo
Miguel A. Cabrera
César Medina
Instituto de Física
Universidade Nacional de Tucumán
San Miguel de Tucumán –Argentina

El propósito del trabajo es rescatar el valor del “estroboscopio a ranuras” por su importancia didáctica, tanto en relación a los fenómenos involucrados como al proceso de medición.

Se muestra que el sistema medidor incluye, además del disco estroboscópico y el cronómetro, al sujeto que realiza la medición, en relación al cual se explicita el rol de la persistencia retiniana y la influencia del tiempo de reacción en el proceso de medición.

Se propone un camino para estimar la apreciación del método, se analizan las fuentes de errores, se evalúan los supuestos y se proponen algunas cuestiones para discutir con los estudiantes.

I. Introducción

Es permanente la discusión en los laboratorios de física básica, sobre la conveniencia de mantener experiencias con instrumentos que prácticamente se han dejado de usar. Puede tomarse como ejemplo la balanza analítica y el estroboscopio de disco ranurado². En ambos casos los argumentos a favor se basan en la riqueza conceptual y simplicidad que encierran los mismos y en el hecho fundamental de

¹ Artigo revisado por Vera Regina de Aquino Vieira (Depto de Língua e Literatura Estrangeiras - UFSC).

² Ambos instrumentos se integran en las prácticas introductorias [C. de Cudmani, F. de Lewin, P. de Danón, Matthews, Van Brook, 1983] de la Cátedra de Laboratorio de Física Experimental I y II del Instituto de Física de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la UNT, que dirige la Lic. Leonor Colombo de Cudmani y en la cual desempeñan los autores del trabajo.

que los instrumentos que los sustituyen funcionan con los mismos principios, sólo que a veces aparecen apantallados.

El acelerado ritmo del progreso científico plantea el desafío de instrumentar al estudiante para que sea capaz de enfrentar con éxito futuras situaciones de aprendizaje [C. de Cudmani, F. de Lewin, 1979].

Desde hace muchos años, en la Cátedra de “Laboratorio de Física Experimental I y II” del Instituto de Física de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la Universidad Nacional de Tucumán se introdujo el estroboscopio a ranuras como elemento didáctico valioso. Inicialmente tenía el objetivo de presentar un modelo simple del principio de funcionamiento del estroboscopio con lámpara de flash de modo que los estudiantes no usaran este equipo como “una caja negra”. Más adelante se fue reelaborando su rol en el aprendizaje debido a que permitía fundamentalmente profundizar concepciones referidas a los instrumentos de medición. En efecto, en el marco de una propuesta integral de mediciones de frecuencias de distintos ordenes de magnitud, se recurre al mismo para analizar, en una situación compleja, características esenciales de un instrumento de medición: sensibilidad, alcance, y exactitud.

Es en este sentido que el presente trabajo propone rescatar el valor del estroboscopio con disco ranurado por su alto contenido didáctico, al entrelazar las estructuras conceptuales del fenómeno estroboscópico con las estructuras sintácticas vinculadas al proceso de medición. Sumado a esta el amplio y variado uso del estroboscopio a flash en la industria en el análisis de movimiento de máquinas herramientas, diseño aeronáutico, telares automáticos, máquinas balanceadoras de ruedas de automóviles, balanceo de turbinas, etc. [Ciencia y Técnica, 1986].

Se ha incluido una propuesta de discusión con los estudiantes de forma tal de extender el presente análisis al caso del estroboscopio a flash, el cual sería análogo al estroboscopio de disco de una sola ranura.

Cabe destacar que hemos recogido una experiencia docente de muchos años, sistematizándola para su difusión.

II. El fenómeno estroboscópico

II.1 El rol de la visión

La visión consiste en la percepción de formas, colores, dimensiones, distancias y movimientos de objetos a partir de las ondas luminosas que éstos emiten o reflejan, y que nos permiten distinguirlos. En nuestros ojos, dichas ondas alcanzan unas estructuras especializadas, los fotorreceptores de la retina, los cuales, mediante una serie de reacciones químicas, envían impulsos eléctricos al cerebro, el cual los interpreta como imágenes [E. Lamla, 1947].

La impresión lumínica en los fotorreceptores no desaparece instantáneamente, por el contrario, persiste un tiempo del orden de $1/20$ s. Así las imágenes que se suceden con gran rapidez no se ven separadas, sino que se superponen. Esta característica útil para el cinematógrafo es una limitación cuando se quiere estudiar un movimiento [P.S.S.C., 1960].

Surge así la idea de diseñar un sistema que impida esta superposición de imágenes en la retina.

II.2 El estroboscopio

El método estroboscópico permite ver en forma periódica un fenómeno. En particular el disco estroboscópico consiste en N ranuras equidistantes separadas por zonas opacas (Fig. 1). Si éste se interpone entre el fenómeno de interés y nuestros ojos y se lo hace girar con velocidad constante, veremos el sistema durante intervalos de tiempo Δt , que corresponden al paso de una ranura frente a nuestros ojos, separados en el tiempo por intervalos, T , correspondientes al paso de una zona opaca que obstruye la visión.

El estroboscopio puede ser movido por medio de un motor eléctrico con control de velocidad, cuyo movimiento es transmitido mediante una correa, convenientemente ajustada para evitar deslizamientos. El motor usado puede ser del tipo universal (como los empleados en máquinas de coser eléctricas) de 220 o 110 V.

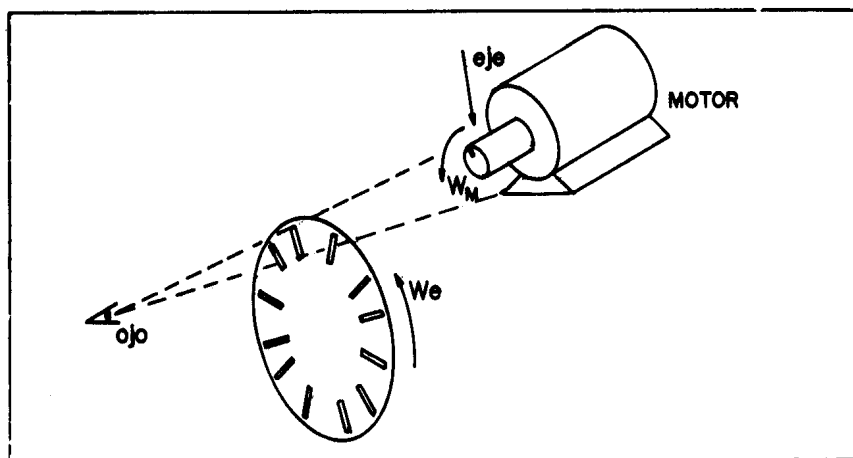


Fig. 1

Para medir, por ejemplo, las revoluciones de un motor (W_m)³ [C. de Cudmani y otros, 1983], se realiza una marca en su eje de giro y se hace girar el

³ La determinación de las revoluciones de un motor es una práctica que se plantea al estudiante, en el Laboratorio antes citado, en la cual debe seleccionar un método apropiado para medir distintas frecuencias.

disco estroboscópico, modificando su velocidad angular W_0 hasta que la marca aparece siempre en el mismo lugar. Esto ocurre para una relación de igualdad o submúltiplo de la velocidad del estroboscopio respecto de la del motor.

Consideremos el caso más simple, de un disco estroboscópico con una sola ranura. Sean W_m la velocidad angular de giro del eje del motor y W_e la del estroboscopio. Para poder ver una imagen estacionaria se tiene que:

$$W_n = K W_e \quad (1)$$

o sea el disco estroboscópico debe girar a la misma velocidad que el eje del motor ($K=1$), o cuando el disco estroboscópico completa una vuelta, el eje pudo haber dado $2\pi K$ vueltas completas. Si el estroboscopio tuviera N ranuras la (1) queda:

$$W_n = N K W_e \quad (2)$$

A partir de esta ecuación puede aumentarse sensiblemente el alcance del método (ver Apéndice).

En esta situación, durante el intervalo τ el eje del motor realiza un número K de giros, por lo tanto, cada vez que lo vemos la marca ocupa el mismo sitio.

Si $\tau < \frac{1}{2} s$, las imágenes sucesivas de la marca se superpondrán en nuestra retina y veremos una sola marca detenida.

Para que veamos la imagen quieta es necesario que el tiempo Δt durante el cual la ranura pasa frente a nuestros ojos sea pequeño comparado con el tiempo en que la marca avanza una distancia igual a su propio espesor, pues de lo contrario veríamos franjas difusas [A. Drigo, G. Alocco, 1945]. Por lo tanto el ancho de las ranuras debe cumplir con el doble compromiso de ser lo suficientemente pequeño para que esta condición se cumpla a las velocidades del rango deseado ($1/N$ de la que se quiere medir); y al mismo tiempo lo suficientemente grande como para que a una distancia cómoda de nuestros ojos (aprox. 20 cm.), el ángulo que éstos subtenden a través de la ranura abarque todo el sistema. Por su parte, la zona opaca debe tener el ancho necesario para taparlo completamente. Debido a que el tiempo de excitación que requiere la retina es mucho menor que el de persistencia en ella [E. Lamla, 1947], las ranuras pueden ser mucho más angostas que las zonas opacas.

III. El sistema medidor

De lo explicado en el párrafo anterior queda claro que el proceso de medición involucra un sujeto que cuando ve la imagen estacionaria mantiene constante la velocidad angular del disco y procede a su medición. Para ello mide el

tiempo (t) de giro de un número determinado de vueltas (n) [C. de Cudmani, F. de Lewin, 1981], de donde resulta:

$$w_e = \frac{n}{t} 2\pi \quad (3)$$

En síntesis podemos decir que el sistema medidor incluye no sólo al disco estroboscópico, sino también al cronómetro y al observador y debe analizarse como interviene cada uno en el proceso de medición.

III.1 Apreciación del método y del instrumento

Una vez que el estudiante conoce y comprende los principios de funcionamiento del instrumento es necesario que pueda definir correctamente sus características, apreciación, exactitud y alcance [C. de Cudmani, 1984; C. de Cudmani, F. de Lewin, 1979].

La primera dificultad que enfrenta es la de establecer la apreciación del instrumento. Se encuentra que ésta no está definida como en una regla milimetrada, por ejemplo, donde la apreciación es de 1 mm. En este caso la apreciación depende de la velocidad de giro del disco que no puede ser regulada para cualquier valor, debido al efecto de persistencia retiniana; el observador tiene que poder contar las vueltas del disco estroboscópico.

Tenemos así que el proceso de calibración no es previo al proceso de medición, sino que ambos se fusionan. Se está en presencia de una situación en la que es necesario tomar a la apreciación en relación con la magnitud a medir.

La máxima frecuencia de giro del disco ranurado es la que el observador puede determinar a ojo (Fe_{\max}). Este valor corresponde al período mínimo que se puede determinar. Teniendo en cuenta el número de ranuras, la apreciación en términos de período es:

$$Ap_T = \frac{1}{N Fe_{\max}} \quad (4)$$

Para valores característicos de $N = 12$ y $Fe_{\max} = 2$ vuelta/s, la apreciación del método es de aproximadamente 0,04 s. En términos de frecuencia se trata en realidad del alcance del método:

$$\text{Alcance} = Fe_{\max} \cdot N \quad (5)$$

que en el caso del ejemplo numérico es de Alcance = 24 vuelta/s.

III.2 Determinación del error de la medición

En este párrafo analizaremos los errores que se cometen en el proceso de medición.

Si en la ecuación (2) hacemos $k = 1$ y tenemos en cuenta la ecuación (3) se obtiene:

$$W_n = N \frac{n}{t} 2\pi \quad (6)$$

Haciendo la propagación de errores se tiene:

$$\frac{\Delta W_m}{W_m} = \frac{\Delta N}{N} + \frac{\Delta \pi}{\pi} + \frac{\Delta n}{n} + \frac{\Delta t}{t}. \quad (7)$$

a- Respecto a $\Delta N/N$ podemos decir que es igual a cero, pues no hay error al medir el número de ranuras del disco;

b- $\Delta \pi/\pi$ se puede hacer despreciable frente a los otros términos, tomando n con la cantidad de decimales que sea necesario;

c- el error cometido en la determinación del tiempo, Δt , es el error de reacción del operador (Δt_r) más el error de apreciación (Δt_{ap}) y exactitud del cronómetro (Δt_{ex}).

$$\Delta t = \Delta t_r + \Delta t_{ap} + \Delta t_{ex} \quad (8)$$

En los seres humanos el error de reacción es del orden de 1/10 segundos y en general los errores de apreciación y exactitud de un cronómetro son despreciables frente a este error. Por lo tanto:

$$\Delta t = \Delta t_r \quad (9)$$

d- En cuanto al error en el conteo del número de vueltas, se trata de una fracción de vuelta que se debe a dos fuentes. Por un lado una componente correspondiente al ancho mismo, a , de la marca realizada en el disco estroboscópico, similar- a un error de apreciación. La otra componente se debe al tiempo de reacción del sujeto en detectar la coincidencia, que se manifiesta en una fracción de vuelta del disco estroboscópico. Por lo tanto:

$$\Delta n = \Delta n_{ap} + \Delta n_{reacción}. \quad (10)$$

El error Δn_{ap} puede estimarse de la siguiente relación:

$$\frac{\Delta n_{ap}[\text{vueltas}]}{a} = \frac{1 \text{ vuelta}}{2\pi R} \quad (11)$$

donde R es el radio del disco estroboscópico. Por lo tanto:

$$\Delta n_{ap}[\text{vueltas}] = \frac{a}{2\pi R} [\text{vueltas}] \quad (12)$$

El error de reacción ($\Delta n_{reacción}$) puede estimarse de la siguiente relación:

$$\frac{\Delta n_{reac}[vueltas]}{1} = \frac{1 \text{ vuelta}}{2\pi R} \quad (13)$$

donde 1 es el arco barrido durante el tiempo de reacción. Por lo tanto:

$$\Delta n_{reacción}[vueltas] = \frac{1}{2\pi R} [vueltas] \quad (14)$$

Como:

$$1 = W_e R \Delta_{tr} \quad (15)$$

finalmente y teniendo en cuenta que:

$$\frac{W_e}{2\pi} = \frac{1}{T_e} \quad (16)$$

se obtiene:

$$\Delta n_{reacción}[vueltas] = \frac{W_e R \Delta_{tr}}{2\pi R} = \frac{\Delta_{tr}}{t_e} [vueltas] \quad (17)$$

Teniendo en cuenta órdenes de magnitud típicos, $\Delta_{tr} = 0,1 \text{ s}$, $T_e = 1\text{s}$, $R = 10 \text{ cm}$, $a = 0,5 \text{ cm}$, y en base las ecuaciones (12; y (17) podemos considerar que:

$$\Delta n_{ap} < \Delta n_{reacción}$$

Retomando la ecuación (7) de propagación original, tenemos:

$$\frac{\Delta W_m}{W_m} = \frac{\Delta n}{n} + \frac{\Delta t}{t} + \frac{\Delta_{tr}}{nT_e} + \frac{\Delta_{tr}}{nT_e} = 2 \frac{\Delta_{tr}}{nT_e}$$

Con lo que tenemos que la precisión del método depende del período del estroboscopio (T_e), del número de vueltas durante las cuales se mide el tiempo (t) y del error de reacción (Δ_{tr}).

III.3 Control de supuestos

Una cuestión fundamental en el trabajo experimental es el control de la adecuación del modelo a la realidad dentro de los órdenes de error permitidos. Esto implica el análisis de los supuestos, muchas veces no explicitados. Por lo tanto debe verificares que:

- el disco sea homogéneo, pues si la densidad no es uniforme se produce un desbalanceo que afecta su velocidad.
- sus ranuras estén igualmente espaciadas pues de lo contrario se pierde isocronismo entre dos sucesivas, no pudiéndose obtener una imagen estacionaria.

-el motor que lo impulsa mantenga la velocidad constante durante la observación del fenómeno.

Es interesante destacar que si la marca del eje del motor, cuya velocidad se desea determinar permanece inmóvil, los tres supuestos antes mencionados se cumplen, por lo menos en el orden de magnitud que somos capaces de apreciar. A veces se observa que la marca se mueve muy lentamente. En este caso su velocidad puede ser- una medida del error introducido por uno de estos factores.

IV. Cuestiones a discutir con los estudiantes

Una vez que el estudiante ha realizado la medición es interesante plantearle algunas cuestiones donde podrá analizar su nivel de comprensión. A modo de ejemplo se extraen de las preguntas de examen de la Cátedra [C. de Cudmani, F. de Lewin] las siguientes:

- Realice un análisis comparativo del estroboscopio a ranuras con el de flash.
- En el caso de la determinación de la frecuencia de giro de un motor, analice la conveniencia de realizar dos o más marcas en su eje de giro.
- Considere la utilidad del estroboscopio para estudiar movimientos no analizables a simple vista como goteo.
- Es necesario que el disco y el eje del motor giren en el mismo sentido?

V. Conclusiones

Creemos que el presente trabajo rescata el uso del estroboscopio a ranuras en los laboratorios de física básica, pues permite instrumentar al estudiante en diferentes aspectos que pueden extenderse a otras situaciones, destacando especialmente al observador como parte integrante del sistema medidor.

Aparece así el tiempo de persistencia retiniana como condición necesaria para ver imágenes detenidas.

Por otro lado se muestra que el tiempo de reacción del observador, al accionar el cronómetro, es la fuente de error mas importante de la medición.

Referências

1. DRIGO, Angelo, ALOCCO, Giulia. Física practica. Padua: Zannoni, 1945.

2. COLOMBO DE CUDMANI, LEWIN, Ana F. de. Organización e instrumentación de un laboratorio de física en base a un modelo de aprendizaje operativo. San Miguel de Tucumán: Instituto de Física, UNT, 1979.
3. COLOMBO DE CUDMANI. Cálculo de errores experimentales. San Miguel de Tucumán: Instituto de Física, UNT, 1984.
4. COLOMBO DE CUDMANI, L., FIGUEROA DE LEWIN, A.M., PESA DE DANON, M., MATHEWS, C., VAN BROOKE, G. Problemas introductorias para un laboratorio de física experimental. San Miguel de Tucumán: Instituto de Física -FCEyT, UNT, 1983. [Serie Educación y Aprendizaje. Num: EA2-52/83.]
5. COLOMBO DE CUDMANI, L., FIGUEROA DE LEWIN, A.M.. Fichas de apoyo docente. San Miguel de Tucumán: Instituto de Física -FCEyT, UNT, 1981. [Serie Educación y Aprendizaje. Num: EA 1-44/81.]
6. LAMLA, E. Compendio de física. Barcelona: Labor, 1947.
7. PHYSICAL SCIENCE STUDY COMMITTEE (PSSC). Barcelona: Reverté, 1960.

APENDICE

En general se trata de buscar la situación en la que $K = 1$, lo que se logra aumentando progresivamente la velocidad del estroboscopio hasta dejar de ver una única imagen estacionaria. Caso contrario se determina el valor fundamental de W_m haciendo la medición de dos imágenes estacionarias y sucesivas, con lo cual se tendrá un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas, esta es:

$$W_n = K N W_{e1}$$

$$W_n = (K - 1) N W_{e2}$$

donde $W_{e1} < W_{e2}$. Entonces se puede calcular W_n como:

$$W_n = \frac{N W_{e1} W_{e2}}{W_{e2} - W_{e1}}$$