

Diseño y estudio de celdas de faraday para su aplicación en mediciones de polarimetría y sacarimetría

Víctor Fajer Ávila, Rolando A. Díaz Delgado, Andrés Combarro Romero, José L. Díaz Morera y Justo Ravelo Triana. BECICPA, Academia de Ciencias de Cuba

RESUMEN

En el presente trabajo se estudian experimentalmente las celdas de Faraday diseñadas por los autores. Se señalan las características de las celdas y los criterios que se han tenido en cuenta para su diseño. Dentro del trabajo experimental se determinó la linealidad (ángulo de giro-corriente) y la dispersión rotatoria del vidrio flint pesado soviético TF-1, que se utiliza como núcleo de las celdas. Se comparan los resultados de la dispersión rotatoria del cuarzo, la sacarosa y el vidrio TF-1 entre sí y se analiza la posibilidad de emplear luz blanca en sacarímetros fotoeléctricos que empleen como compensador una celda de Faraday con el vidrio estudiado.

El valor que se obtuvo para la linealidad de la celda fue de $0,017^\circ$. Se comprobó que la dispersión rotatoria óptica del vidrio flint pesado TF-1 se asemeja en gran medida a la de la sacarosa y el cuarzo en la región de las longitudes de ondas largas a partir de 514 nm. Se concluyó que es posible emplear este tipo de vidrio como núcleo de las celdas de Faraday que se empleen en los sacarímetros con fuente de luz blanca, si se utiliza un filtro que absorba las bajas longitudes de onda o un fotosensor cuya respuesta espectral manifieste poca sensibilidad para la región de las longitudes de ondas cortas.

ABSTRACT

The Faraday cells designed by the authors were studied in this paper. Its characteristics and the criteria taken into account for its design were described. The linearity (rotated angle vs. current intensity) and the optical rotatory dispersion of a heavy flint glass of the soviet type TF-1 employed as a Faraday cell core were experimentally determined. The results of the optical rotatory dispersion of quartz, sucrose and TF-1 glass were compared among them, and the possibility of employing white light in the photoelectric sacharimeters using a Faraday cell with the studied glass as a compensator were discussed.

The value of the cell linearity obtained was $0,017^\circ$. The similarity among the TF-1 heavy flint glass, sucrose and quartz optical rotatory dispersion in the long wavelength range from 514 nm was observed. It was concluded that it is possible to use a heavy flint glass as a Faraday cell core in the photoelectric sacharimeters employing white light, if it is used a short wavelength absorbing filter or a low sensitive photosensor for the short wavelength range.

INTRODUCCIÓN

La polarimetría es una técnica que se ha utilizado con éxito en la industria azucarera desde fines de siglo pasado, con los primeros sacarámetros manuales y visuales /1/. Los sacarámetros de uso más difundido en Cuba se basan en el empleo de dos polarizadores y una cuña de cuarzo para la determinación del ángulo de giro de la luz linealmente polarizada, producido por la presencia de sacarosa en la solución sometida a medición, con lo cual se puede evaluar la concentración de esta sustancia en dicha solución.

A mediados de los años 60 se comenzó el desarrollo de los sacarámetros fotoeléctricos con los requerimientos necesarios para su aplicación en los laboratorios de las fábricas de azúcar de caña /2/. Los sacarámetros fotoeléctricos presentan entre otras las siguientes ventajas: eliminar errores de apreciación visual, permiten la automatización de algunas fases de la producción industrial de azúcar y aumentan considerablemente la velocidad y confiabilidad de las mediciones.

Entre los elementos fundamentales de los sacarámetros fotoeléctricos se encuentran los dispositivos de modulación y compensación. El empleo de celdas de Faraday con estos fines ha constituido una solución eficaz en el

diseño de los mencionados sacarámetros /3/.

En el trabajo que se presenta se han estudiado experimentalmente las celdas de Faraday diseñadas por los autores. Dentro de este estudio se determinó la linealidad (ángulo girado-corriente) y la dispersión rotatoria del vidrio flint pesado soviético que se utiliza en el interior de las celdas.

El estudio experimental de la linealidad se realizó empleando como fuente de luz un láser de He-Ne y la medición del ángulo se llevó a cabo utilizando en un caso una cuña de cuarzo y en el otro un goniómetro.

El otro aspecto importante del trabajo desarrollado consistió en el estudio de la dispersión rotatoria del vidrio flint pesado TF-1 (soviético), en el intervalo espectral comprendido entre 400 y 633 nm. Se compararon los resultados con los valores de la dispersión rotatoria del cuarzo y de la sacarosa.

Finalmente, se analizó la posibilidad de emplear luz blanca en sacarámetros fotoeléctricos que empleen como compensador una celda de Faraday con vidrios flint pesados de acuerdo con los resultados experimentales obtenidos.

2. CARACTERÍSTICAS DE LAS CELDAS

Las celdas diseñadas trabajan bajo el principio del efecto Faraday descubierto en el año 1846, como resultados de laboriosos intentos de Faraday, para descubrir la relación existente entre los fenómenos luminosos y magnéticos. Dicho efecto consiste en que las sustancias ópticamente inactivas se convierten en activas cuando se someten a un campo magnético paralelo a la dirección de propagación de la onda luminosa.

El giro del plano de polarización de la luz linealmente pola-

rizada $\Delta\phi$ viene dado por la expresión:

$$\Delta\phi = K\lambda H, \quad (1)$$

donde λ es la longitud de la sustancia que atraviesa la luz, K es la constante de Verdet que es característica de la mencionada sustancia y H el valor de la intensidad del campo magnético. Para algunas clases de vidrio (especialmente los flint pesados) K alcanza valores entre 0,04 y 0,1 /4/, si el ángulo se mide en minutos, H en oersteds y λ en centímetros.

Las celdas construidas están

constituidas por un solenoide enrollado sobre un soporte tubular de fibra, se seleccionó este material con vistas a garantizar que no se provocaran afectaciones al campo magnético en el centro del solenoide, donde se coloca una barra de vidrio flint pesado soviético.

Para el diseño del enrollado de la celda se utilizó un sencillo programa de cálculo al cual se le suministran como datos de entrada la constante de Verdet, la longitud de la barra de vidrio, la corriente de la bobina y el ángulo que se desea girar y se obtiene como resultado el diámetro del alambre, el número de vueltas por cm y el diámetro del solenoide.

A partir de los valores de la constante de Verdet de los vidrios flint pesados soviéticos TF-1 y TF-3 objetos de estudio, se planteó la construcción de celdas que girarán alrededor de 25°S, lo cual equivale para la longitud de onda del láser de He-Ne a 7,4378°. Después de un análisis de tablas de

resultados obtenidos a través del programa, realizando distintas combinaciones de los datos de entrada, se construyeron 2 celdas.

Una con corriente de 2 A y 580 vueltas por cm y otra con corriente máxima de 6 A y 192 vueltas por cm, ambas celdas utilizan barras de vidrio de 100 mm de longitud y 10 mm de diámetro.

Las celdas construidas con los parámetros antes mencionados fueron probadas en la instalación experimental, en la figura 1 se muestra su esquema simplificado, donde se pudo alcanzar un giro de 25°S para una barra de vidrio TF-1.

El análisis realizado con el programa indica que cada milímetro innecesario en el espesor del soporte implicaría un gasto inútil de 2 vatios. El enrollado del solenoide se recubre con una lamina de μ - metal para evitar las afectaciones del campo magnético. En la figura 2 se muestra una fotografía de una celda con el láser de He-Ne utilizado.

3. DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

El estudio de la linealidad de las celdas de Faraday, diseñadas por los autores, y la dispersión rotatoria de los vidrios flint pesados, se realizó básicamente con una misma estructura de la instalación experimental, cuyo esquema simplificado se muestra en la figura 1.

La instalación experimental está constituida por una fuente de luz (1), un prisma polarizador (2), una celda de Faraday (3) trabajando como modulador, es decir, realizando la oscilación del plano de polarización a una frecuencia igual a la de la señal de corriente que se aplique al solenoide, una celda de estudio (4) conectada a una fuente de corriente directa (9) con un amperímetro (8) de alta precisión en serie, un prisma analizador (5) montado en un goniómetro de una precisión de 0,003°, un fotosensor (6) y por último un osciloscopio (7).

El principio de medición del ángulo de giro del plano de polarización, efectuado por la celda de estudio, que se empleó en este

trabajo es el que se basa en el método de compensación. El prisma polarizador y el analizador se colocan de modo tal que sus planos de transmisión máxima se encuentren en un ángulo relativo de 90°. Luego, al aplicar una cantidad de corriente continua al solenoide que constituye la celda de Faraday de estudio, se produce un giro del plano de polarización de la luz según se explicó con anterioridad. Finalmente se hace girar al prisma analizador en el sentido conveniente, hasta obtener la compensación. El valor de la rotación del analizador entre la posición inicial y la de compensación es una medida del ángulo de giro introducido por la celda de estudio.

Esta determinación se podría realizar midiendo la intensidad de luz, ya que tanto en la posición inicial como en la de compensación, ésta es mínima debido a la selección inicial de la posición relativa de los prismas polarizadores. Sin embargo, el método de detección de la intensidad de luz presenta algunas dificultades con la inmunidad al ruido y la preci-

sión en la determinación del mínimo de la intensidad de la luz. Estas dificultades se evitan empleando la modulación de la intensidad de luz mediante la oscilación del plano de polarización de ésta.

La expresión de la intensidad de luz que llega al fotosensor empleando el método de modulación se puede obtener de la siguiente forma. De acuerdo con la ley de Malus la intensidad de luz viene dada por la expresión.

$$I = I_0 \cos^2 (\Delta\phi + \phi), \quad (2)$$

donde ϕ es el ángulo formado entre los planos de transmisión máxima de de ambos prismas (el polarizador y el analizador), I es la intensidad luminosa e I_0 su valor máximo.

Sustituyendo el valor de H en (1) según su expresión en un solenoide tenemos:

$$\Delta\phi = K l n i = K' i, \quad (3)$$

donde agrupamos K, l y el número de vueltas por cm, en una sola constante K' y donde i corresponde a la corriente que circula por el enrollado del solenoide.

Sustituyendo (3) en (2) obtenemos:

$$I = I_0 \cos^2 (K' i + \phi), \quad (4)$$

El valor de la corriente alterna i viene dado por:

$$i = i_0 \sin \omega t,$$

por lo cual la expresión (4) tomará la forma:

$$I = I_0 \cos^2 (K' i_0 \sin \omega t + \phi),$$

La curva correspondiente a esta expresión se muestra en la figura 3 donde se observa que en una zona cercana a la compensación existe una señal con frecuencia 2ω , y otra con frecuencia ω (figura 3a), mientras que en la compensación (figura 3b), la señal de frecuencia ω desaparece quedando solamente la frecuencia 2ω .

En este hecho se basa el empleo del osciloscopio para la determinación de la compensación en la instalación experimental descrita en el presente trabajo.

3.2. Determinación de la linealidad de las celdas.

Teniendo en cuenta la linealidad existente entre la concentración de sacarosa C en una solución de azúcar y el giro ϕ del plano de polarización de la luz, tenemos de acuerdo con la ecuación (1) que se obtendría una relación lineal entre la concentración de sacarosa y la corriente que se aplica a la bobina. Podemos hacer uso de esta relación para la medición de la pol de azúcar, siempre y cuando la celda de Faraday presente una alta linealidad (ángulo-girado-corriente). Esta característica de la celda resulta también de importancia para otras aplicaciones instrumentales, tales como la medición de corriente en líneas de alto voltaje /5/.

La medición de la linealidad se realizó en la instalación experimental descrita anteriormente, la cual se muestra en la figura 1. Para la medición del ángulo de giro se empleó en un caso una cuña de cuarzo y en el otro un goniómetro, como fuente de luz se utilizó un láser de He-Ne de 2 mw de potencia con una longitud de onda de 632.8 nm. Se empleó un foto-transistor de silicio SP 201D como fotosensor, y la medición de la corriente se realizó con un amperímetro de 0,07 % de precisión. Dentro de la celda compensadora se colocó una barra de vidrio flint pesado TF-1.

Los valores de los ángulos medidos se ajustaron a una recta mediante un programa de cuadrados mínimos, cuyos resultados se muestran en la tabla I y en la figura 4. En esta tabla, en la primera columna, se presentan valores de intensidad de corriente aplicada a la celda, en la segunda columna, los ángulos medidos experimentalmente, y en la tercera columna, los valores ajustados. El error del ajuste de cada valor, considerado constante para todos los puntos fue de $\pm 0,017^\circ$.

3.3. Determinación de la dispersión rotatoria de los vidrios flint pesados.

Para la medición de la dispersión rotatoria en la instalación experimental (figura 1) se utilizó como fuente de luz un monocromador

cuya escala se verificó con cinco líneas de una fuente espectral de sodio y con 11 líneas de una fuente espectral de mercurio-helio y la línea de 632,8 nm del láser de He-Ne.

La celda compensadora donde se colocó la barra de vidrio objeto de estudio fue alimentada con una corriente constante de 1,050 A, la cual fue medida con un voltímetro digital de 0,07 % de precisión. Como fotosensor se utilizó un fotomultiplicador electrónico tipo FEU-26 debido a los niveles relativamente bajos de la intensidad luminosa.

Con el objeto de mejorar la ubicación del centro de gravedad de la longitud de onda de la luz emitida por el monocromador empleado, cada longitud de onda seleccionada para realizar las mediciones, fue ajustada mediante el empleo de una placa de cuarzo de control de la que se conocen los valores de giro con una alta precisión para un conjunto de longitudes de onda en el vacío. El procedimiento empleado fue el de colocar la placa de cuarzo de control en la instalación experi-

Para realizar una comparación entre la dispersión rotatoria del cuarzo, de la sacarosa y del vidrio flint pesado TF-1, se ajustaron también los datos de la sacarosa y los valores experimentales obtenidos del vidrio TF-1 a la misma función descrita anteriormente.

Los valores de la dispersión rotatoria de la sacarosa fueron obtenidos de la expresión siguiente /7/.

$$\frac{\alpha_{\lambda}}{\alpha_{0,546}} = a + b/\lambda^2 + c/\lambda^4 + d/\lambda^8, \quad (6)$$

donde:

$$\begin{aligned} a &= - 0,0017982 \\ b &= + 0,2765318 \\ c &= + 0,00655736 \\ d &= + 0,0000103825 \end{aligned}$$

En esta función λ representa la longitud de onda expresada en μm .

Para la obtención de $R_s = \frac{\alpha_{\lambda}}{\alpha_{0,6329914}}$

(dispersión rotatoria de la sacarosa normalizada al giro correspondiente a la longitud de onda del láser de He-Ne) se realizó la siguiente conversión:

$$R_s = \frac{\alpha_{\lambda}}{\alpha_{0,546}} \cdot \frac{\alpha_{0,546}}{\alpha_{0,633}} = \frac{\alpha_{\lambda}}{\alpha_{0,546}} \cdot 1,370597$$

mental entre ambas celdas y ajustar la longitud de onda en el monocromador hasta obtener el giro del plano de polarización de la luz que corresponda..

De acuerdo con trabajos recientes realizados sobre la dispersión rotatoria del cuarzo /6/, se utilizó con éxito para la descripción de la misma, la siguiente ecuación:

$$R = R_0 + A(\lambda - \lambda_0)B \quad (5)$$

donde R_0 , A , λ_0 y B son cuatro parámetros que se determinaron por un ajuste de la curva. El parámetro R representa la relación entre el ángulo α_{λ} que gira el cuarzo para la longitud de onda λ dada en micrones y el ángulo $\alpha_{0,6329914}$ que gira el cuarzo para la longitud de onda del láser He-Ne en el vacío ($\lambda = 0,6329914 \mu\text{m}$).

En la figura 5 aparece la curva de la dispersión rotatoria del cuarzo junto con los valores de la dispersión rotatoria de la sacarosa obtenidos de la ecuación (6) y los valores de la dispersión rotatoria del vidrio flint pesado TF-1 obtenidos experimentalmente en el presente trabajo.

Los valores de los parámetros de la ecuación (5) para la descripción de las curvas del cuarzo, la sacarosa y el vidrio flint pesado TF-1 se muestran en la tabla II, los cuales fueron obtenidos mediante un programa de ajuste por cuadrados mínimos.

En la tabla III se presenta una comparación de la rotación óptica relativa R como función de la longitud de onda para el cuarzo, la sacarosa y el vidrio TF-1. Los valores reportados para el

cuarzo y la sacarosa se calcularon mediante las ecuaciones (5) y (6) respectivamente, mientras que

los referidos en la columna correspondiente al vidrio TF-1 fueron determinados experimentalmente.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En las mediciones de la linealidad de la celda en la que se empleó como fuente de luz un láser de He-Ne y en la determinación del ángulo de giro un goniómetro de una precisión de $0,003^\circ$ ($0,010^\circ\text{S}$) se obtuvo una linealidad de $0,017^\circ$ ($0,057^\circ\text{S}$) considerando constante el error de los valores medidos en el programa de ajuste por cuadrados mínimos. Los resultados del ajuste se muestran en la tabla I y en la figura 4.

Con anterioridad al experimento mencionado se determinó la linealidad de la celda, utilizando una cuña de cuarzo, cuya escala presentaba una precisión de $0,015^\circ$ ($0,05^\circ\text{S}$) con la cual se obtuvo una linealidad de $0,016^\circ$ ($0,053^\circ\text{S}$). Ambos resultados garantizan el empleo de las celdas de Faraday construidas para mediciones polarimétricas con un error menor de $\tau = 0,018^\circ\text{C}$ ($0,06^\circ\text{S}$) el cual resulta suficiente para las mediciones de polarización del azúcar que se realizan en los laboratorios azucareros.

Estas mediciones de linealidad deben arrojar mejores resultados si se tiene en cuenta que las mediciones fueron afectadas por un nivel de ruido cuya magnitud era comparable con el error obtenido en la medición. Una de las posibles mejoras en la instalación experimental consistiría en el empleo de una frecuencia entre 400 y 1000 Hz en la celda moduladora con el fin de eliminar los ruidos de 60 Hz.

La determinación de la dispersión rotatoria del vidrio TF-1 se realizó con la instalación y el procedimiento experimental explicado anteriormente. La medición del ángulo de rotación del plano de polarización se hizo con un error promedio $\tau = 0,009^\circ$ en el intervalo de 435,96 a 632,99 nm (longitud de onda en el vacío) y cada uno de los valores se obtuvo como resultado del promedio de 5 a 8 mediciones.

La longitud de onda empleada en cada una de las determinaciones se fijó según el método descrito anteriormente, con lo cual se logró establecer su centro de gravedad con un error de $\pm 0,044$ nm. Este valor resultó ser superior en un orden, al que se emplea /6/ como posible, debido fundamentalmente al error en la determinación del ángulo de rotación óptica de la placa de cuarzo.

La comparación de la rotación óptica relativa R como función de la longitud de onda para el cuarzo, la sacarosa y el vidrio TF-1 se presenta en la tabla III. Los valores de R para la sacarosa y el cuarzo se obtuvieron como resultado del cálculo según las ecuaciones mencionadas anteriormente, mientras que los valores del vidrio TF-1 fueron determinados experimentalmente.

En la figura 5 se muestran gráficamente los valores de la dispersión rotatoria presentados en la tabla III. Puede observarse que las curvas correspondientes a la sacarosa y el cuarzo tienen gran semejanza, mientras que la curva de la dispersión rotatoria del vidrio TF-1 comienza a diferenciarse significativamente de las anteriores desde los 514 nm hacia las longitudes de onda menores. Esto concuerda con los resultados del ajuste realizado con cada conjunto de valores a la función R representada por la ecuación (5), como se muestra en la tabla II al comparar los valores de los parámetros ajustados para la función R obtenidos para el cuarzo, la sacarosa y el vidrio TF-1. Los valores de estos parámetros para la sacarosa y el cuarzo son muy parecidos, mientras que para el vidrio TF-1 se observa una diferencia significativa respecto a los primeros, en especial para el parámetro A que tiene una importante influencia en los valores de la pendiente de la curva para distintas longitudes de onda.

Calculando los valores de las pendientes de las curvas en los puntos medidos se observa una concordancia aceptable de los mencionados valores a partir de los 514 nm en el sentido de aumento de la longitud de onda. De los resultados obtenidos se puede concluir que la dispersión rotatoria óptica del vidrio TF-1 es muy semejante a la de la sacarosa y el cuarzo, para la zona de longitudes de onda mayores que 514 nm. Esto indica que es posible emplear el vidrio TF-1 como núcleo de la celda de Faraday para su utilización en la sacarimetría con la luz blanca si se emplea un filtro que absorba

las longitudes de onda menores que 514 nm. Una confirmación de esto, lo constituye el hecho de que en una medición de la linealidad de las celdas de Faraday empleando luz blanca y un fototransistor de silicio, cuya longitud de onda de máxima sensibilidad se encuentra en los 780 nm, se obtuvo un valor equivalente a $0,50^{\circ}\text{S}$, empleando una cuña de cuarzo como compensador. En este caso, la curva de respuesta espectral del fototransistor, realiza una función similar al filtro mencionado pues presenta muy baja sensibilidad para la región de longitudes de onda corta.

RECONOCIMIENTOS

Los autores desean expresar su reconocimiento a la compañera Aida Rosales por su valiosa cooperación en el desarrollo del

presente trabajo y a la compañera Giselda Vidal por su eficiente trabajo mecanográfico.

BIBLIOGRAFÍA

1. Nolting, M.F. (1976) Polarimetry for sugar analysis. En *Proc. Mett. West Indies Sugar Technol.* pp. 281-291.
2. Wilson, R. AM (1970) Specification and evaluation of automatic sugar polarimeters. En *Proc. Queensland Soc. Sugar Cane Technol* p.p. 89-97.
3. Fager, V.L.; R.A. Díaz; J. Rodríguez y A. Combarro (en prensa): *La polarimetría sacarimétrica contemporánea*. Edit. Ciencia y Técnica.
4. Landsberg, G.S. (1976): Óptica (en ruso). Nauka, Moscú, 928 pp.
5. Jaecklin, A.A. (1970): Measuring current at extra-high voltage. *Laser Focus*, (6):35-38.
6. Zander, K. (1982): Quartz Control plates. En *Proc. 18 Sess. ICUMSA, Dublin, Subject 6*.
7. Scheneider, F. (1974): 100°S Point of the sugar scale. En *Proc. 16 Sess. ICUMSA, Ankara, Subject 5*.

Tabla I.

Resultados del ajuste a la mejor recta mediante cuadrados mínimos

I (A)	Ángulo (girado)	Valor ajustado (grados)
-1,200	-5,096	-5,104
-1,050	-4,456	-4,460
-0,900	-3,824	-3,830
-0,750	-3,199	-3,193
-0,600	-2,556	-2,556
-0,450	-1,914	-1,919
-0,300	-1,281	-1,282
-0,150	-0,643	-0,645
0,000	0,000	-0,008
0,150	0,621	0,623
0,300	1,254	1,266
0,450	1,882	1,903
0,600	2,506	2,540
0,750	3,154	3,176
0,900	3,800	3,814
1,050	4,475	4,451
1,200	5,119	5,088
1,350	5,740	5,725
1,650	7,018	6,999
1,800	7,621	7,636

Tabla II.

Parámetros de ajuste de las curvas de dispersión rotatoria.

$R = R_0 + A (\lambda - \lambda_0)^B$	R_0	A	λ_0	B
Cuarzo	-0,03957273	0,3673150988	0,07360154	-1,79089579
Sacarosa	-0,073 ±0,006	0,378 ±0,001	0,072946 ±0,000006	-1,79011 ±0,00001
Vidrio soviético TF-1	-0,318 ±0,039	0,452 ±0,008	0,07299 ±0,00004	-1,79002 ±0,00006

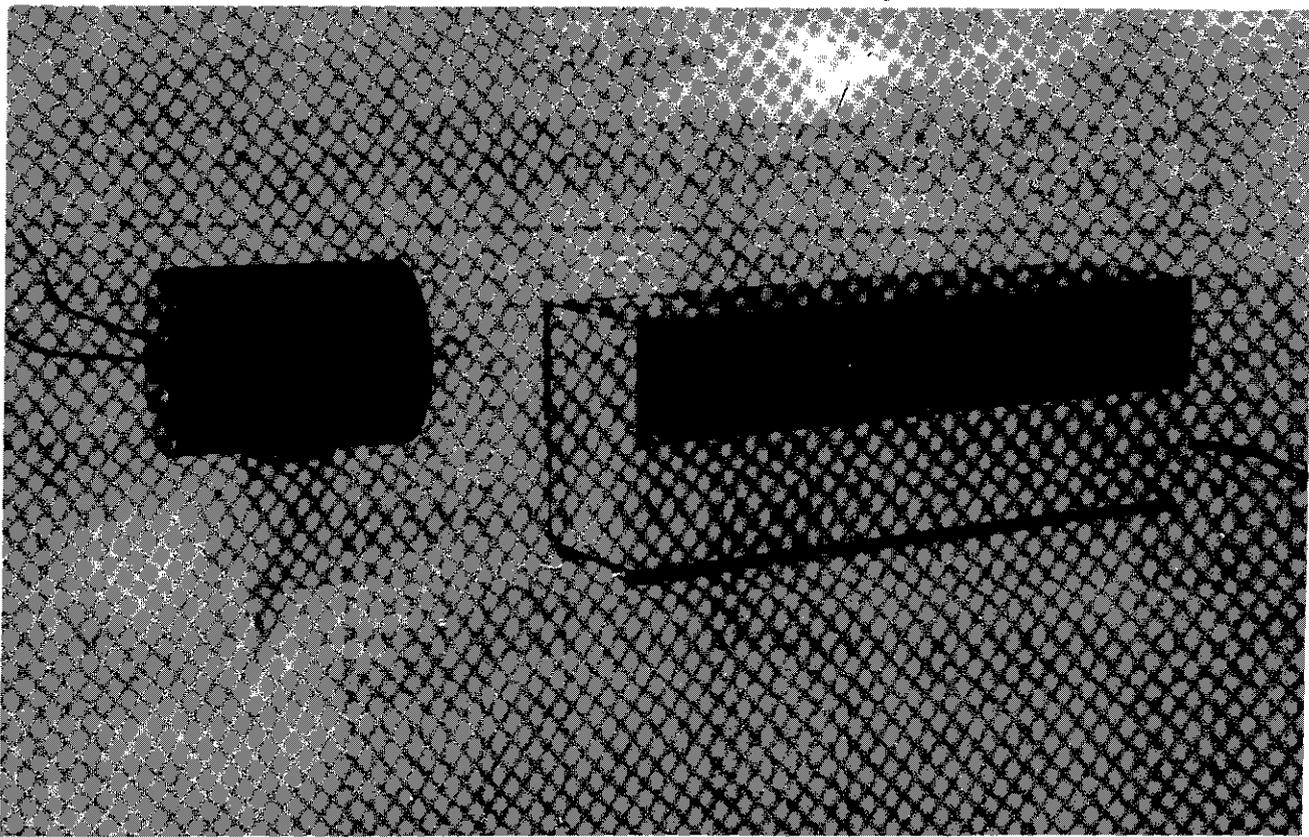


Fig. 2. Fotografía de la celda de Faraday con el láser de He-Ne.

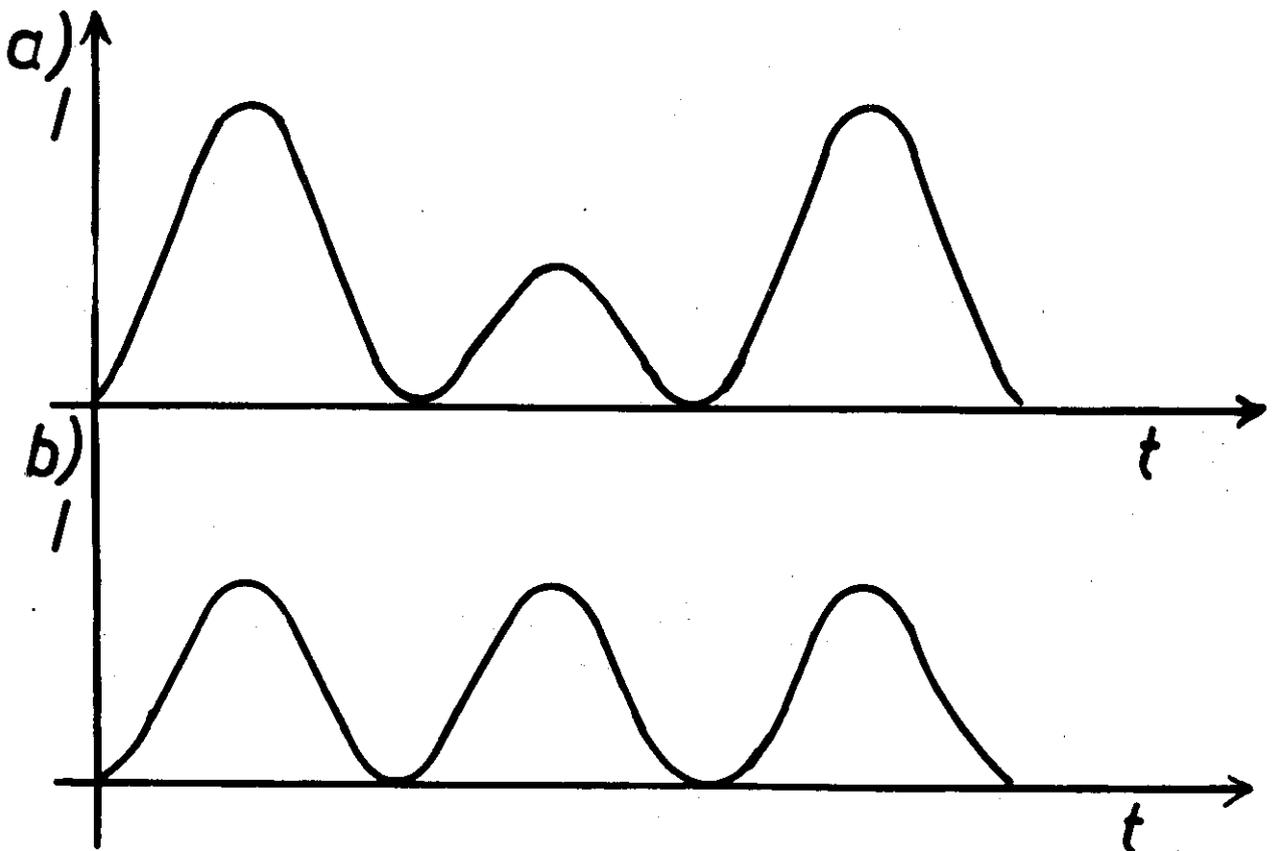


Fig. 3. Señal en el fotosensor

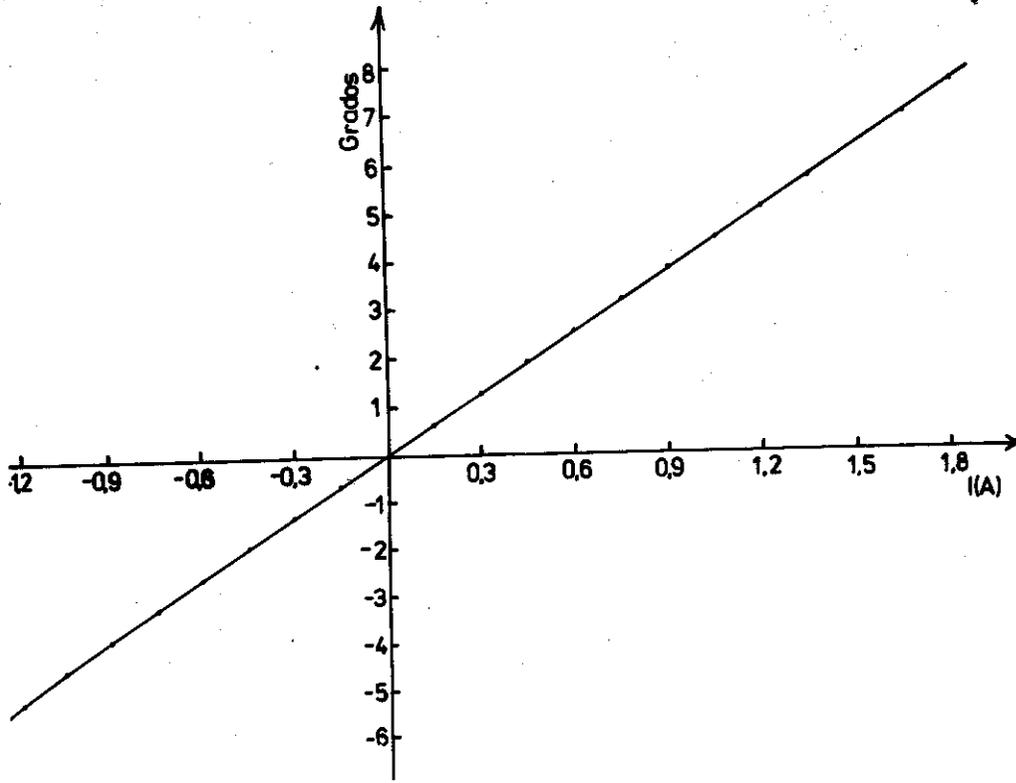


Fig. 4 Relación entre el ángulo girado y la corriente.

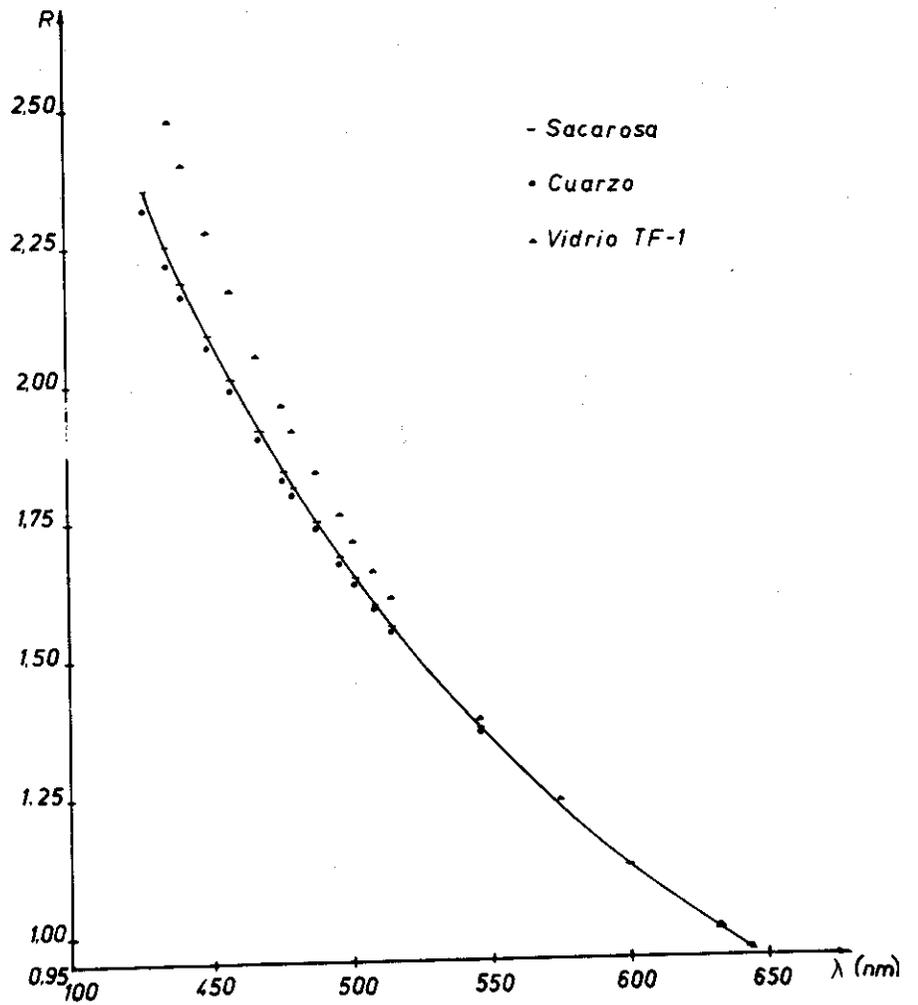


Fig. 5. Dispersión rotatoria relativa.

Fig 5 Dispersión rotatoria relativa