

Rotación de Faraday

Sol Fernández Arancibia, Agustina Pose
Departamento de Física, UBA

17 de septiembre de 2013

1. Introducción

La rotación de Faraday, o efecto Faraday, es la rotación del plano de polarización de la luz debido a la interacción de la misma con un campo magnético, dentro de un medio material. El campo magnético induce una birrefringencia circular en el medio, es decir, diferentes índices de refracción para la polarización circular derecha e izquierda. Es sabido que toda polarización lineal puede describirse como una superposición de dos circulares: una horaria y otra antihoraria. Luego de atravesar el medio, estas dos polarizaciones presentan un desfase entre sí dado que como tienen distinto índice de refracción, los caminos ópticos recorridos son distintos. En consecuencia, las dos componentes superpuestas resultan en una nueva polarización lineal en un plano distinto al inicial (ver figura 1). El fenómeno puede observarse haciendo incidir un láser linealmente polarizado en un medio sobre el cual se debe aplicar un campo magnético externo cuya dirección sea paralela a la de propagación de la luz. A la salida del medio debe colocarse un polarizador, y luego medir la intensidad del haz con un fotodetector.

La variación angular que experimenta el plano de polarización de la luz puede expresarse como :

$$\theta = VBL \quad (1)$$

donde θ es el ángulo que rota del plano de polarización, B la componente del campo magnético paralela a la dirección de propagación de la luz, L es el largo del medio atravesado, y V es la constante de Verdet. Esta constante depende tanto del material, como de la longitud de onda de la luz incidente y la temperatura. El objetivo de esta práctica es determinar esta constante, a partir de la medición de θ , B y L .

El ángulo de rotación también puede expresarse como:

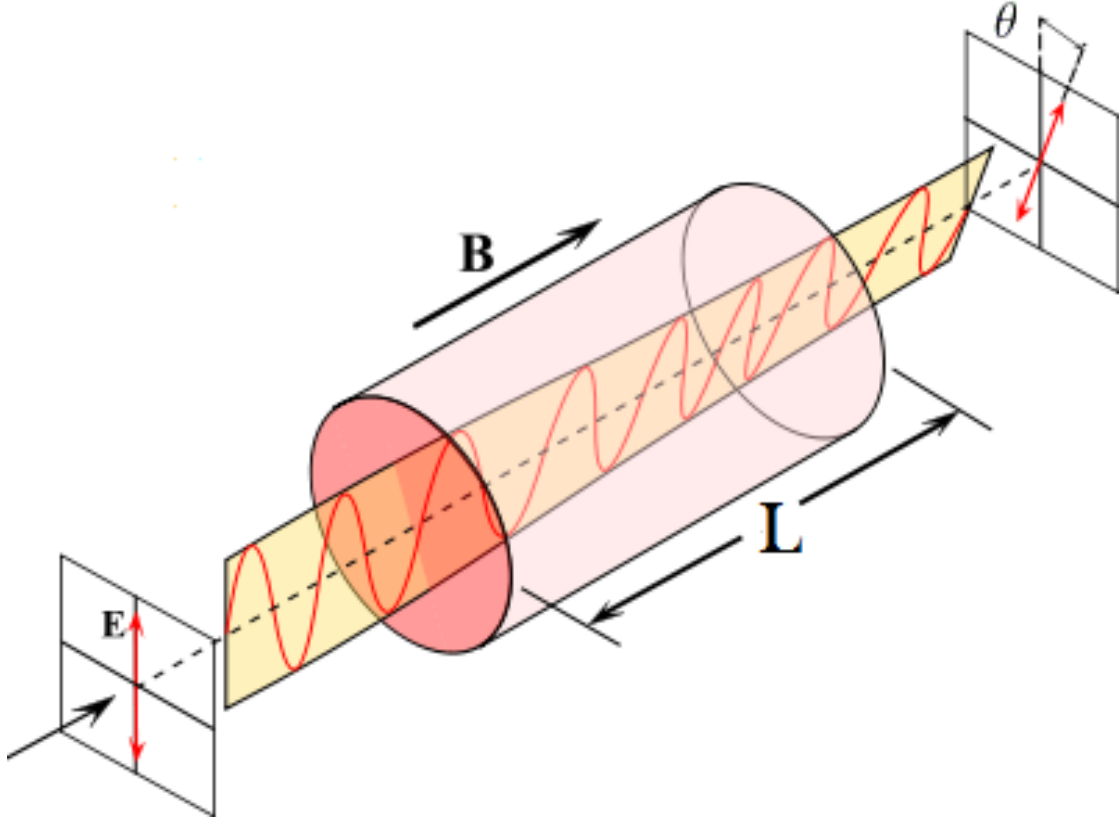


Figura 1: Rotación de Faraday

$$\theta = \pi \Delta n / \lambda \quad (2)$$

donde Δn es la magnitud de la birrefringencia circular, L es la longitud del medio en el que ocurre el fenómeno y λ es la longitud de onda del haz incidente.

Asumiendo que el haz se propaga en la dirección z y que se encuentra linealmente polarizado en el eje x , el campo eléctrico puede escribirse como:

$$E_0 = A_0 e^{-i\omega t + ikz} \hat{x} \quad (3)$$

donde A_0 es la amplitud del campo.

Luego de atravesar el medio, el plano de polarización rota un ángulo θ , por lo que la expresión del campo resulta:

$$E = A_0 (\cos(\theta) \hat{x} + \sin(\theta) \hat{y}) e^{-i\omega t + ikz} \quad (4)$$

Como se describe en la sección experimental, tras haber atravesado el medio se propone hacer pasar el haz por un polarizador lineal colocado a un ángulo ϕ con

respecto a la polarización inicial (eje $\hat{x}$). El campo resultante se expresará como:

$$E = A_0(\cos(\phi - \theta)\cos(\theta)\hat{x} + (\phi - \theta)\sin(\theta)\hat{y})e^{-i\omega t + ikz} \quad (5)$$

La intensidad luego del polarizador está dada por:

$$I = \cos^2(\phi - \theta)A_0^2 \quad (6)$$

Para poder ver el fenómeno, sería ideal obtener una variación de la intensidad (debida a la variación de θ) lo mayor posible. Para esto, derivamos I respecto de θ obteniendo:

$$\frac{\partial I}{\partial \theta} = \sin 2(\phi - \theta)A_0^2 \quad (7)$$

Como el ángulo θ es muy pequeño (para los campos que se pueden generar en el laboratorio $\theta \ll 1^\circ$), se ve claramente que el máximo de (7) se alcanza cuando $\phi = 45^\circ$. Fijando el ángulo ϕ en ese valor la intensidad que mide el detector puede escribirse como:

$$I = \frac{1}{2}(1 + 2\theta)A_0^2 \quad (8)$$

donde se aproximó el $\sin(\theta) \sim \theta$ y $\cos(\theta) \sim 1$ ya que $\theta \ll 1^\circ$.

Suponiendo que el campo magnético es sinusoidal $B = B_0 \sin(\omega t)$ y que θ y B son proporcionales, el ángulo de rotación puede escribirse como $\theta = \theta_0 \sin(\omega t)$. La ecuación (8) puede reescribirse como:

$$I = \frac{1}{2}(1 + 2\theta_0 \sin(\omega t))A_0^2 = I_0 + \Delta I \sin(\omega t) \quad (9)$$

Es fácil ver que θ_0 puede escribirse como:

$$\theta_0 = \frac{1}{2} \frac{2\theta_0 A_0^2}{A_0^2} = \frac{1}{2} \frac{\Delta I}{I_0} \quad (10)$$

Como se puede observar, basta medir la intensidad a la salida del fotodiodo (ΔI) y compararla con la intensidad del haz luego del polarizador, pero sin campo magnético (I_0) para poder calcular θ .

El campo magnético se generará con una bobina por la que circulará corriente. Despreciando los efectos de borde, el campo dentro del solenoide puede calcularse como:

$$B = \frac{\mu N i}{l} \quad (11)$$

con μ la permeabilidad magnética del medio, N el número de vueltas de la bobina, i la corriente que circula por la misma y l el largo de la bobina. Con

esta expresión es posible calcular la intensidad del campo magnético a partir de la corriente.

Para hacer estos cálculos se asumió que la corriente que genera el campo magnético es sinusoidal, ¿Cómo cambian estas cuentas si se alimenta a la bobina con pulsos cuadrados? ¿Se obtiene el mismo resultado? (ayuda: piense en la descomposición de Fourier en la base de ondas planas)

2. Arreglo Experimental

El objetivo de esta práctica es determinar la constante de Verdet de diversos materiales para distintas longitudes de onda. Como indica la ecuación (1), es posible determinar esta constante si se conocen el ángulo θ , la intensidad del campo magnético y el largo del medio donde ocurre el fenómeno.

Como fuente de luz se propone usar láseres linealmente polarizados (para las fuentes que no se encuentren linealmente polarizadas se utiliza un polarizador lineal). Para detectar la señal lumínica una vez atravesado el medio se puede utilizar un fotodiodo. De acuerdo a lo explicado previamente (ver ec. (7)) se recomienda colocar un polarizador lineal a 45° antes del fotodiodo para maximizar la variación de la intensidad del haz. Para generar el campo magnético, en el laboratorio se cuenta con una bobina de alambre esmaltado de cobre de 550 vueltas y $(1,075 \pm 0,001)m$ de largo. Con respecto al medio, se cuenta con un tubo de vidrio de $(100 \pm 2)cm$ de largo que puede contener agua o distintas soluciones. Este debe introducirse dentro de la bobina, de forma tal que quede lo más centrado posible (para esto, puede apoyarse sobre cubos de goma espuma). Si se utilizaran medios sólidos éstos deberán fijarse dentro de la bobina de forma tal que el alumno conozca el largo en la dirección de propagación de la luz, ya que éste es un dato necesario para el análisis.

Como se puede ver en la figura 2 los elementos deben estar alineados de forma tal que el láser atraviese la muestra, pase por el polarizador y finalmente incida en el fotodiodo. Puede resultar conveniente colocar un filtro óptico a la salida del láser para evitar que se sature el fotodiodo.

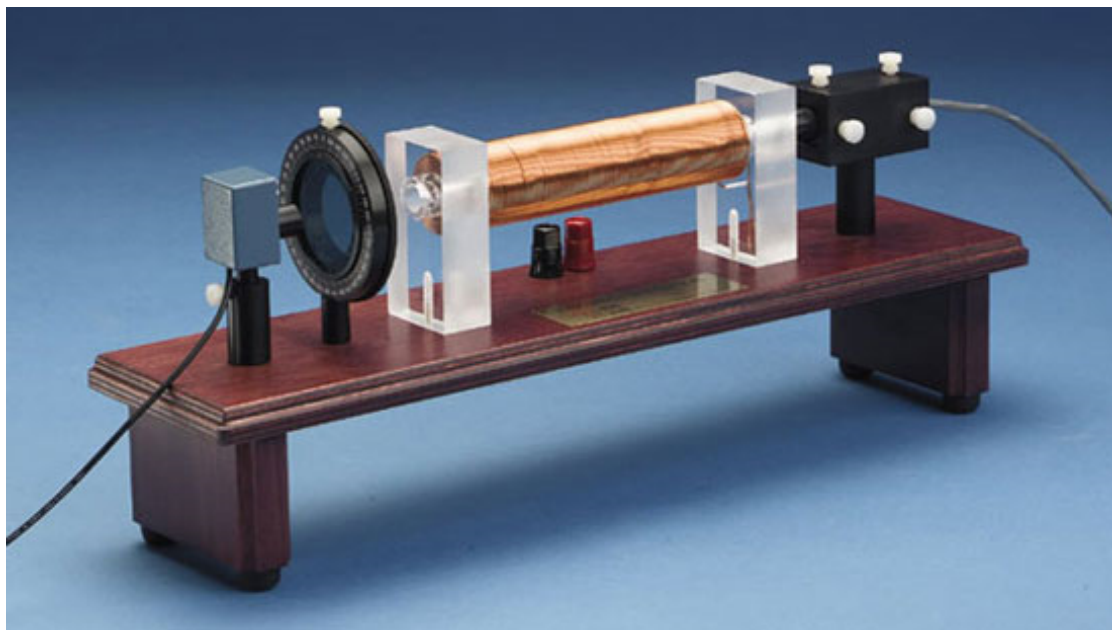


Figura 2: Setup óptico

Para poder ver y medir el fenómeno, en el laboratorio se encuentran disponibles los siguientes elementos:

- Generador de funciones Tektronik modelo TDS 1002B
- Generador de pulsos Agilent modelo B2901A: Máximo output (si se manda una señal pulsada) 10,5A y 6V. Si se desea mandar más voltaje se debe enviar menos corriente (ésto es lo que dice el manual, en la práctica se logró que el aparato mande como máximo 3A). Mínimo intervalo entre pulsos de $20\mu s$.
- Osciloscopio Tektronik modelo 1002B
- Lock-in amplifier Stanford Research Systems modelo SR510.
(Tensión de cortocircuito: $100\text{ M}\Omega + 25\text{ pF}$, ac acoplado. Corriente: $1\text{ k}\Omega$ to virtual ground. Máximo voltaje: 100 VDC, 10 VAC umbral de daño. Inputs: 2 VAC saturación pico-pico. Corriente: $10\text{ }\mu\text{A}$ umbral de daño, $1\text{ }\mu\text{A}$ ac saturación pico-pico. Impedancia del input (del canal de referencia): $1\text{ M}\Omega$, ac acoplado.)
- Lock-in amplifier Stanford Research Systems modelo SR830.
(Canal de la señal: Input de corriente 106 o 108 Volts/Amp. Tensión de la impedancia del input: $10\text{ MW} + 25\text{ pF}$, AC o DC acoplado. Corriente: 1 kW . Ruido del input $6\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ a 1 kHz (típicamente). Filtros: 60 (50) Hz y

120(100) Hz filtros de suspensión ($Q=4$). Reserva dinámica mayor a 100 dB (sin filtros).

Canal de Referencia: Rango de frecuencias de 1 mHz a 102 kHz. Input de referencia TTL o Sinusoidal. Onda de señal de entrada 1 MW, AC acoplado (>1 Hz). 400 mV pk-pk mínima señal.

- Amplificador de corriente
- Láseres de longitudes de onda de $532\mu\text{m}$, $632,8\mu\text{m}$ y $670\mu\text{m}$

Con estos elementos se proponen dos posibles montajes:

2.1. Setup con osciloscopio

En esta sección se propone un armado experimental que consta de un generador de pulsos y un osciloscopio, además del dispositivo óptico previamente detallado.

Como se ve en la ecuación (1), la constante de Verdet puede obtenerse realizando un ajuste lineal de un gráfico de B vs. θ , es decir que con este experimento se busca obtener pares de valores (B, θ) a tiempo fijo. Una posible forma de obtener B es a partir de la corriente, de acuerdo a la ecuación (11) (¿de qué otras formas podría medir B ?), y θ se obtiene a partir de la variación de intensidad lumínica medida con y sin campo magnético, como indica la ecuación (10).

Como fuente de alimentación del circuito se utiliza el generador de pulsos Agilent B2901A, el cual se conecta a la bobina. Para medir la corriente que pasa por ésta se coloca una resistencia en serie, sobre la cual se mide la caída de tensión en el osciloscopio (¿de qué magnitud es conveniente que sea R ? analice qué potencia debe resistir). El segundo canal del osciloscopio se conecta al fotodiodo, midiendo la intensidad del láser en función del tiempo tras haber atravesado el medio y el polarizador. De esta forma, en los dos canales del osciloscopio se pueden ver la corriente que alimenta a la bobina y la intensidad del fotodiodo en función del tiempo. La figura 3 muestra el montaje descripto.

El empleo del generador de pulsos cuenta con diversas ventajas. En primer lugar, es capaz de emitir más corriente y voltaje que un generador de funciones (empíricamente se corroboró que emite corriente de hasta 3A). Este hecho es útil en este experimento, pues se sabe a priori que como la señal a medir es muy baja, se precisa contar con una fuente de corriente potente. Otro de los factores a favor de usar este aparato es que puede generar un tren de pulsos cuadrados de distintos voltajes, lo que permite obtener varios valores de campo magnético (y por ende distintos valores de θ) en una misma medición.

Como se desea medir de esta forma es importante analizar previamente ciertas cuestiones: Al alimentar el circuito con pulsos cuadrados, si este fuera ideal, se

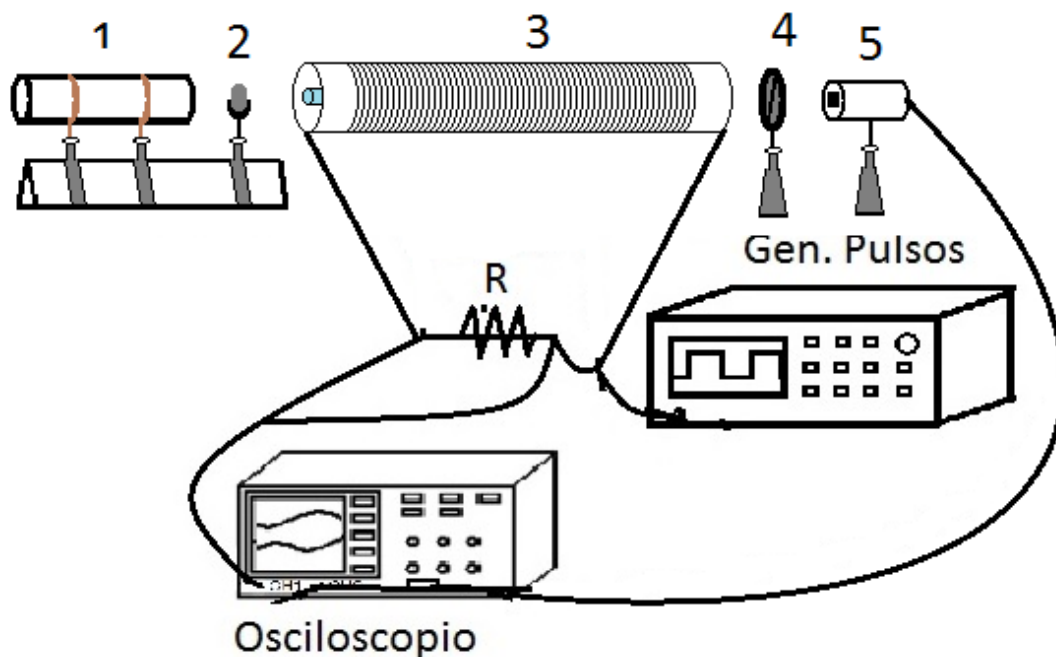


Figura 3: Montaje experimental empleando el osciloscopio. 1 láser linealmente polarizado, 2 filtros, 3 bobina, 4 polarizador, 5 fotodiodo.

esperaría que la corriente ($i(t)$) que alimenta a la bobina fuese proporcional a los pulsos emitidos por el generador. ¿Es esto lo que ocurre realmente? Es decir, ¿es la forma funcional de la caída de tensión medida en la resistencia igual a la emitida por el generador? Si no lo es, ¿A qué se debe? En este caso se propone modelar el circuito real de forma tal que se pueda describir el fenómeno observado.

Por otro lado, es interesante verificar experimentalmente si la intensidad $\Delta I(t)$ es proporcional a $B(t)$ (note que la teoría indica que ésto debería ser así: ec.(1) y (10)) Con el montaje descrito ésto se puede ver en la pantalla del osciloscopio, ya que se tiene en un canal $\Delta I(t)$ y en el otro $i(t)$, la cual es directamente proporcional a B (ec.(11)). ¿Son proporcionales $\Delta I(t)$ e $i(t)$? Si esto no es así, ¿por qué?, ¿Qué componentes parásitas pueden aparecer? Proponga un modelo del circuito que describa lo visto. Si no se encontrara un modelo que explique estas diferencias, se debería abordar otro análisis: la teoría empleada ya no describiría correctamente el experimento. En este caso se podría, por ejemplo, realizar promedios sobre las mediciones para filtrar componentes parásitas. ¿Cómo se puede realizar un promedio para filtrar el ruido? Si se promedian distintas mediciones, ¿tiene sentido enviar un tren de pulsos con distintos voltajes? (Leer Subsección 2.2)

Por el contrario, si se observara que efectivamente $\Delta I(t)$ e $i(t)$ son proporcionales, sería posible independizarse de la forma funcional de la corriente, es decir

que se podrían ignorar las pequeñas "deformaciones" que pueden aparecer debido a que el circuito no es ideal. En este caso, el modelo matemático presentado en esta guía resulta suficiente para estudiar el fenómeno, y sería posible obtener múltiples valores de B y θ en una sola medición.

Tarea preliminar:

A partir de las ecuaciones (1), (10) y (11) halle la relación entre la amplificación de la intensidad $x = \frac{\Delta I}{I_0}$ y la corriente $i(t)$. Una vez hecho esto, es posible calcular la corriente necesaria para obtener una amplificación determinada. Esto es esencial, ya que en la mayoría de los casos la rotación del plano de polarización es menor a un grado, y por lo tanto es difícil de ver en el osciloscopio. Es importante notar que esta relación depende una serie de parámetros, muchos de los cuales pueden ser controlados en el laboratorio (tales como el medio y la longitud de onda de la luz incidente). Es conveniente elegir estos parámetros de forma tal que se pueda obtener la mayor amplificación posible para una misma corriente (a pesar de lo que dice el manual, no se logró mandar más de 3A con el generador de pulsos).

A continuación presentamos el ejemplo de un caso en el que no se pudo ver el fenómeno con el osciloscopio:

El medio utilizado fue agua, cuya permeabilidad magnética (μ) es $\mu = 4\pi(1 - 0,91 \cdot 10^{-5}) \cdot 10^{-7} Tm/A$. La longitud de onda de la luz incidente fue $\lambda = 632,8\mu m$ (láser He-Ne). El largo del medio fue de $(1,000 \pm 0,001)m$, el de la bobina fue de $(1,075 \pm 0,001)m$ y el número de vueltas de la bobina fue $N = 550$. A partir de los resultados obtenidos en [3] se estimó la constante de Verdet del agua para $\lambda = 632,8\mu m$ como $V_{agua} = (0,012 \pm 0,002) \frac{min}{Gcm}$. Con estos parámetros, la relación entre x e i queda:

$$i = \frac{x}{448,85} 10^5 A \quad (12)$$

Con esto podemos ver que con una corriente de 3A, la amplificación es $x = 0,013$, es decir menor al 2%. Esta experiencia fue realizada con los elementos previamente descritos y no fue posible distinguir ningún cambio en la intensidad a la salida del fotodiodo, midiendo con el osciloscopio. Para llevar a cabo el experimento se debe elegir una combinación de parámetros que resulte en una amplificación medible con el osciloscopio. ¿Cuál es la mínima amplificación que se debe tener para poder medir con este aparato? Note que del experimento con el agua se deduce que ésta debe ser por lo menos mayor al 2%.

En el Cuadro 1 se encuentran condensadas las constantes de Verdet de distintos medios en función de las tres longitudes de onda disponibles en el laboratorio. Antes de armar el experimento, calcule para qué combinaciones de parámetros tiene sentido medir con el osciloscopio. Tenga en cuenta que los primeros cinco elementos de la tabla son líquidos. El laboratorio cuenta con un tubo de vidrio de 1m de largo, el cual puede llenarse con el fluido que sea necesario. En caso

de querer usar los vidrios (SF57, SF58) consulte la disponibilidad de los mismos en el laboratorio. A la hora de hacer la cuenta, percátese de que la permeabilidad magnética de estos medios puede aproximarse por la unidad [7, página 190].

	$\lambda = 532\mu m$	$\lambda = 632,8\mu m$	$\lambda = 670\mu m$
Cloruro de carbono	$0,02 \pm 0,002$	$0,014 \pm 0,002$	$0,012 \pm 0,002$
Nitrobenceno	$0,029 \pm 0,002$	$0,019 \pm 0,002$	$0,017 \pm 0,002$
Tolueno	$0,033 \pm 0,002$	$0,023 \pm 0,002$	$0,020 \pm 0,002$
Benceno	$0,037 \pm 0,002$	$0,025 \pm 0,002$	$0,022 \pm 0,002$
Sulfuro de carbono	$0,046 \pm 0,002$	$0,032 \pm 0,002$	$0,030 \pm 0,002$
Vidrio SF57	$0,100 \pm 0,002$	$0,065 \pm 0,002$	-
Vidrio SF58	$0,114 \pm 0,002$	$0,076 \pm 0,002$	-

Cuadro 1: Constante de Verdet ($\frac{min}{Gcm}$) de distintos medios en función de la longitud de onda. Fuentes: [1], [5]

En la sección 3 se realiza un análisis sobre las posibles combinaciones de medios y longitudes de onda que resultan en señales mensurables por el osciloscopio.

2.2. Setup con amplificador Lock-in

En este apartado se describe otro setup experimental (que complementa al óptico previamente detallado) empleable para medir la constante de Verdet. Como se analiza en la subsección anterior, en caso de que no se encuentren un medio y una longitud de onda que resulten en una amplificación de la señal medible por el osciloscopio, la señal que se obtiene es excesivamente ruidosa y es necesario emplear un amplificador *lock-in*.

Un amplificador *lock-in* es un instrumento capaz de extraer una señal de una frecuencia particular de un ambiente ruidoso. Su funcionamiento se basa en la lectura de una señal de referencia con frecuencia constante, igual a la frecuencia de la que se quiera medir. El aparato filtra las señales parásitas (ruido), devolviendo una amplificación de la señal que se busca medir. El *lock-in* convierte una señal AC en DC mediante un rectificador particular llamado *phase-sensitive detector (PSD)*. Éste multiplica la señal entrante por la señal de referencia, aplicando luego un filtro pasa-banda al resultado obtenido. Para esto, se basa en la teoría de Fourier y la ortogonalidad de las sinusoidales. Desarrollando la señal de entrada en una suma de armónicos, multiplicando por la señal de frecuencia w_{ref} e integrando, se obtiene la amplitud correspondiente al armónico de frecuencia w_{ref} . Tras este proceso, la señal resultante es amplificada. Para obtener la sinusoidal de frecuencia w_{ref} , el *lock-in* cuenta con un generador interno al cual se le puede especificar la frecuencia deseada, o puede tomar una señal de referencia externa. Es recomendable emplear

este segundo método, pues de esta forma la referencia es igual a la señal que se desea medir (cualquier sutil variación en la frecuencia o fase es detectada).

Para el buen uso del instrumento, es necesario ajustar correctamente el tiempo de integración. Cuanto mayor sea éste, más cantidad de períodos de la señal se integran, por lo que el promedio obtenido es más exacto, y por lo tanto el filtrado de ruido es más fino. Es importante notar que este tiempo debe ser mayor al período de la señal de referencia, pues para filtrar el ruido es necesario promediar varios períodos de la señal (durante los cuales la amplitud de la misma debe ser constante). Se recomienda que este tiempo sea por lo menos diez veces mayor que el del período. La desventaja de que este tiempo sea muy largo es que el experimento tarda más en efectuarse.

Por otro lado, es necesario tener en cuenta las formas en las que el *lock-in* mide módulo y fase de la señal. El modelo SR510 mide las componentes X e Y de la misma, las cuales corresponden a su proyección sobre un par de ejes ortogonales. La forma de deducir la amplitud R, a partir de estos valores es mediante la relación

$$R^2 = X^2 + Y^2 \quad (13)$$

Utilizando el modelo SR830 se pueden medir las componentes X e Y o directamente la amplitud R, obteniendo el valor deseado sin necesidad de hacer cuentas.

Para medir la constante de Verdet mediante el empleo de un *lock-in*, se propone comparar dos setups diferentes: uno en el cual se alimente el circuito con un generador de pulsos, y otro en el cual se utiliza para ésto un generador de funciones y un amplificador.

1) Generador de pulsos:

Como el *lock-in* precisa de una señal de referencia con frecuencia fija, es necesario pensar cómo crearla empleando el generador de pulsos. Una buena solución es construir un tren de pulsos lo más largo posible (se pueden enviar hasta 100.000 pulsos), con una frecuencia entre pulsos bien definida. Preguntas: ¿Por qué conviene que el tren sea lo más largo posible? ¿En qué tiempo de integración se debe ajustar el *lock-in*? ¿Se pueden seguir enviando pulsos con distintos voltajes en la misma medición como se sugería en la subsección 2.1? (Ayuda: recuerde que el tiempo de integración debe ser mayor al período de la señal, pero menor que la duración del tren de pulsos).

Se propone enviar un tren de 100.000 pulsos de $500\mu s$ de ancho, período de $1ms$ y voltaje constante. Observe que para este ejemplo la duración del tren es de 100.000 ms, por lo que el período de integración debe encontrarse en el intervalo comprendido entre $1ms$ (período) y 100.000ms (duración total). Con elegir un tiempo de integración de 300 ms, por ejemplo, se promedian 300 períodos de la señal y sin embargo se está muy por debajo de la duración completa del tren. Si se quiere filtrar más aún el ruido se pueden elegir tiempos de integración de 500ms o

incluso hasta 1000ms, estando siempre en el intervalo correcto.

Note que al enviar una señal de amplitud constante, por cada medición realizada se obtiene un sólo punto (B, θ) del cual deducir la constante de Verdet. Para poder ajustar una recta con distintos valores es necesario repetir la medición para distintas amplitudes tantas veces como puntos se desee obtener en la recta.

El dispositivo experimental es el descrito en la figura 4. La bobina es alimentada por el generador de pulsos. En caso de querer medir la corriente que pasa por ésta, se coloca en serie con la misma una resistencia sobre la cual se mide la caída de voltaje empleando un osciloscopio (canal 1). El fotodiodo se conecta al *lock-in* por medio de la entrada *signal*. El output del *lock-in* se conecta al osciloscopio (canal 2). La señal de referencia que llega al *lock-in* (input) es la que sale del generador atenuada mediante un amplificador buffer. Este circuito eléctrico se complementa con el óptico previamente detallado. Es importante destacar que la señal de referencia no puede ir directo del generador al *lock-in*, pues el aparato se puede quemar. Es indispensable atenuarla previamente.

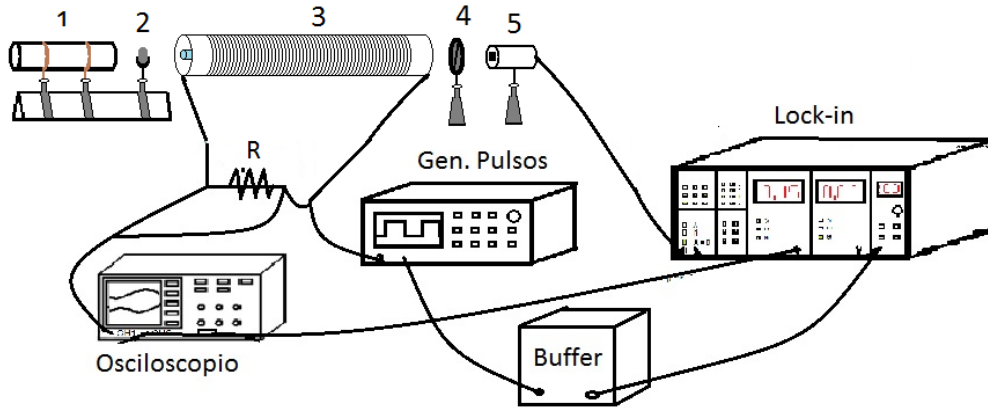


Figura 4: Setup experimental empleando el amplificador lock-in y el generador de pulsos. 1 láser linealmente polarizado, 2 filtros, 3 bobina, 4 polarizador, 5 fotodiodo.

Como se describió en la sección 2.1, es necesario medir valores de (B, θ) para deducir la constante de Verdet. Nuevamente, el campo magnético se puede deducir de la ec.(11) midiendo la corriente que pasa por la bobina (¿Se puede medir el campo magnético de otra forma? ¿Es útil usar una sonda Hall en este caso?). Para ésto se recomienda poner en serie con la bobina una resistencia de cerámica de 1Ω , y medir la caída de tensión sobre ésta con el osciloscopio (¿Por qué la resistencia debe ser de cerámica? ¿Qué potencia espera que soporte esa resistencia?). El ángulo θ se deduce de la señal del fotodiodo luego de ser filtrada por el *lock-in*.

Para pensar: ¿Se puede enviar un tren de 100.000 pulsos con un ancho y período constantes donde haya subgrupos que varíen en amplitud? Por ejemplo, una señal

de 100.000 pulsos con $500\mu s$ de ancho y período de $1ms$ donde los primeros 2000 tengan el mismo voltaje, los 2000 que siguen otro distinto, y así sucesivamente. Puede intentar generar una señal de esta índole creando un programa en LabView. ¿Es posible precesar con el *lock-in* una señal de referencia de este tipo? Observe que la lectura que hace el *lock-in* no depende de la amplitud, sino de la frecuencia de la señal, y a lo largo del tren ésta se mantiene constante (no varía el ancho de los pulsos ni el período entre los mismos).

Note que para poder usar el *lock-in* es necesario que el tiempo de integración sea por lo menos 10 veces mayor que la duración de un período, pero menor que lo que dura el subgrupo de pulsos con igual voltaje. Sin embargo, si el aparato realizara algún promedio sobre pulsos de distinta amplitud, esa medición debería ser desechada (no es coherente con lo que se propone medir aquí). ¿Cómo podría distinguir estas mediciones indeseadas? Una posible solución es elegir las variables de forma que el *lock-in* tome varias mediciones en cada subgrupo, las cuales en teoría deberían valer lo mismo. Al finalizar la medición deberían observarse grupos de muchos valores iguales y algunos pocos valores distintos intercalados entre estos grupos. Estos últimos corresponden a las mediciones que se deben descartar.

Observe que para la señal propuesta se cuenta con 50 subgrupos de distinto voltaje, por lo que un correcto análisis de esta señal proporciona 50 puntos en una sola medición. Si se elige un tiempo de integración de 200ms, el *lock-in* integra la señal cada 200 períodos (filtrando el ruido de manera considerable) y realiza 10 mediciones por subgrupo. Esto quiere decir que para cada voltaje se obtienen 10 mediciones iguales, siendo sencillo ubicar las pocas que difieren del valor medio. Deshechando estas mediciones y efectuando un promedio sobre las remanentes, se obtienen en una sola medición 50 valores distintos de (B, θ) para determinar la constante de Verdet.

2) Generador de funciones:

Empleando el generador de funciones, la señal de referencia que se envía al *lock-in* es una sinusoidal de frecuencia y amplitud constantes (¿qué cambia si se envía una señal cuadrada con la misma frecuencia y voltaje?). Dado que esta fuente no es capaz de generar tanta corriente como se necesita, se debe emplear un amplificador de corriente para alimentar la bobina (Caracterice el amplificador: ¿Cuánto amplifica? ¿Es lineal? ¿En qué rango?).

El dispositivo experimental es el detallado en la figura 5. Note que la señal de referencia que alimenta al *lock-in* va directo desde el generador, sin ser amplificada. La corriente que sale del amplificador puede quemar el aparato de medición, por lo que debe estar muy atento a la hora de conectar los equipos.

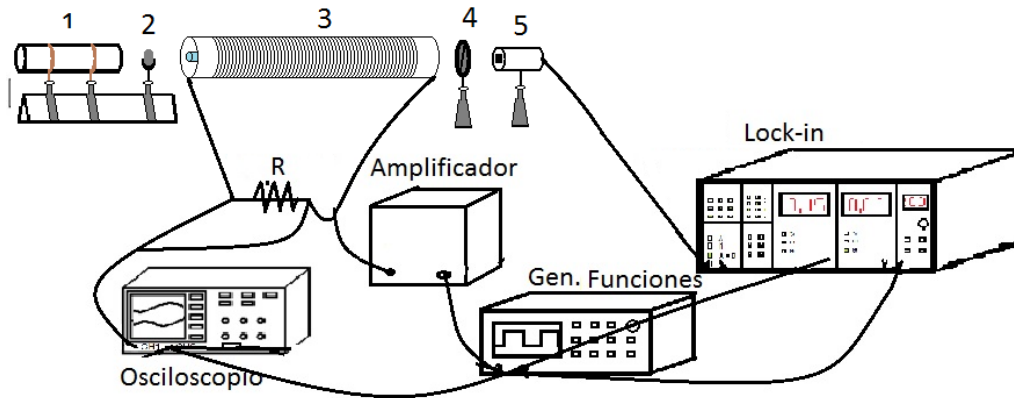


Figura 5: Setup experimental empleando el amplificador lock-in y el generador de funciones. 1 láser linealmente polarizado, 2 filtros, 3 bobina, 4 polarizador, 5 fotodiodo.

El análisis de la relación entre el período de la señal de referencia y el tiempo de integración del lock-in es análogo al planteado en el apartado previo (setup experimental empleando el generador de pulsos). Asimismo lo es la forma de medir el campo magnético y del ángulo θ .

Para los setups 1) y 2) se propone:

Dado que el *lock-in* filtra el ruido en la medición, no es necesario en estos casos ajustar tan detalladamente las variables del experimento para maximizar la amplificación como en la sección 2.1. Se propone entonces calcular la constante de Verdet de un medio en función de la longitud de onda con la que se incide (en el laboratorio de la facultad se cuentan con láseres de longitud de onda de $\lambda = 532\mu m$, $\lambda = 632,8\mu m$ y $\lambda = 670\mu m$). Repetir estas mediciones para distintos medios.

Preguntas: ¿Cuál es el comportamiento de la constante de Verdet al variar la longitud de onda incidente? ¿Se puede deducir una relación funcional entre ambas? ¿El comportamiento observado es el mismo en todos los medios? En la sección 2.1 se sugirió hacer una cuenta para ver cuál era la amplificación dependiendo del medio, la longitud de onda y la corriente. ¿Notó alguna diferencia en la calidad de la medición al cambiar estas variables? ¿Son consistentes estas diferencias con lo que predice esta cuenta? ¿Cuáles son las diferencias entre medir con el generador de pulsos y el de funciones? Enumere los pros y contras de cada uno. Tras realizar la experiencia, ¿cuál cree que es el setup más recomendable?

3. Apéndice

En esta sección se analiza la incógnita planteada en la subsección 2.1: para qué medios y longitudes de onda se puede llevar a cabo el experimento donde se propone medir con el osciloscopio.

Note que ésto se podría lograr en el caso de que el medio fuera, por ejemplo, Sulfuro de Carbono. Como éste es un líquido, se puede utilizar como recipiente el tubo de vidrio de 1m de largo que se encuentra en el laboratorio. Estimando la constante de Verdet del Cuadro 1, aproximando la permeabilidad magnética por la unidad y empleando una bobina de $(1,075 \pm 0,001)m$ de largo y 550 vueltas, se obtienen las siguientes amplificaciones:

Para $\lambda = 632,8\mu m$ se tiene

$$i = \frac{x}{1196,93} 10^5 A \quad (14)$$

Se ve que para el máximo de corriente (3A) se obtiene una amplificación superior al 3,4%. Es mayor a la obtenida con el agua empleando el mismo láser. Vale la pena ver si el osciloscopio es capaz de medir con esta resolución.

Para $\lambda = 532\mu m$ se tiene

$$i = \frac{x}{1720,6} 10^5 A \quad (15)$$

Empleando el láser verde se obtiene una amplificación superior al 5%. Pese a que todavía no se comprobó experimentalmente, es de esperarse que se pueda medir con el osciloscopio en este caso.

En caso de contar con los vidrios tabulados, se podrían obtener las siguientes amplificaciones máximas (dada una corriente de 3A), suponiendo que éstos miden 1m de largo:

SF57 $\lambda = 532\mu m$: $x_{máx} = 11,2\%$

SFF7 $\lambda = 632,8\mu m$: $x_{máx} = 7,3\%$

SF58 $\lambda = 532\mu m$: $x_{máx} = 12,8\%$

SF58 $\lambda = 632,8\mu m$: $x_{máx} = 8,53\%$

Se espera nuevamente, en todos estos casos, poder medir con el osciloscopio. Sin embargo, no es segura la disponibilidad de estos vidrios en el laboratorio, y por ende no se sabe de qué longitud pueden ser las muestras que se consigan. Dado que la amplificación es directamente proporcional al largo de la muestra, se puede estimar de qué longitud debe ser como mínimo cada vidrio para obtener mediciones claras. Si la longitud de las muestras fuera de 50cm por ejemplo, empleando el láser verde se puede obtener para ambos vidrios una amplificación superior al 5%, la cual se espera poder apreciar con el osciloscopio.

En conclusión, existen combinaciones de parámetros que podrían permitir realizar el experimento de la forma detallada en la subsección 2.1

Referencias

- [1] Frank L. Pedrotti, Peter Bandettini, *Faraday rotation in the undergraduate advanced laboratory* Am. J. Phys., Vol. 58, No. 6, Jun. 1990.
- [2] Yaakov Kraftmakher, *Lock-in detection with DataStudio* Am. J. Phys., Vol. 74, No. 3, March 2006.
- [3] Aloke Jain, Jayant Kumar, Fumin Zhou, Lian Li, *A simple experiment for determining Verdet constants using alternating current magnetic fields* Am. J. Phys., Vol. 67, No. 8, Aug 1999.
- [4] V. K. Valev, J. Wouters, T. Verbiest, *Precise measurements of Faraday rotation using ac magnetic fields* Am. J. Phys., Vol. 76, No. 7, July 2008.
- [5] A. Balbin Villaverde, D. A. Donatti, *Verdet constant of liquids; measurements with a pulsed magnetic field* J. Chern. Phys., Vol. 71, No. 10, Nov. 1979
- [6] A. Balbin Villaverde, *High power laser optical isolator using NaCl* J. Phys. E: Sci. Instrum., Vol. 14, 1981
- [7] Frank S. Crawford Jr., *Ondas, Berkeley physics course* E: Reverté, Vol. 3, June 1968