

# Laboratorio de Física Contemporánea I:

## Efecto Faraday

Aldo Javier Gamboa Castillo\*, Víctor Knapp Pérez, Jesús Alberto Aguirre Caro

Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Av. Universidad 3000,  
Circuito Exterior S/N, Coyoacán, Cd. Universitaria, 04510, Ciudad de México

25 de febrero de 2019

### Resumen

En este trabajo se estudió el efecto Faraday y se obtuvo la constante de Verdet para los cristales ópticos SF-5 y F-2. El arreglo experimental consistió de un haz láser que pasaba a través de un cristal donde había un campo magnético producido por un electroimán. El haz pasaba por dos polarizadores al inicio y al final del arreglo que permitieron medir el ángulo de rotación del plano de polarización. Se utilizaron siete cristales de diferente longitud. Se obtuvo que la constante de Verdet para los cristales SF-5 es de  $(18 \pm 3) \text{ rad/T m}$  y para los F-2 es de  $(15 \pm 2) \text{ rad/T m}$ , con un error porcentual respecto al valor aceptado del 6.5 % y 9.5 %, respectivamente.

## 1. Introducción

Una de las contribuciones más importantes para el desarrollo de la teoría electromagnética fue el descubrimiento de Faraday en 1845 de una conexión entre la óptica y el magnetismo. Al sostener un bloque de vidrio en presencia de un campo magnético intenso, Faraday encontró que el plano de vibración de un haz de luz polarizada era rotado. Este fenómeno es conocido como el *efecto Faraday* y desde su descubrimiento se ha observado en otros sólidos, líquidos y gases. [1][2]

Consideramos un material transparente, isotrópico y no-conductor. Este material está asociado con un campo óptico, compuesto por un campo eléctrico y uno magnético, que interactúan con los electrones del material. Al aplicar un campo magnético externo  $B$  alineado con la dirección de propagación de ondas electromagnéticas en el material, se encuentra que el plano de vibración de una onda linealmente polarizada (que puede ser descompuesta en dos ondas con polarización circular izquierda y derecha) sufre una

rotación debido a una diferencia entre los índices de refracción asociados a las dos ondas circularmente polarizadas. Estos índices están dados por: [1]

$$n_{\pm}^2 = 1 + \frac{Ne^2/m\epsilon_0}{\omega_0^2 \mp \frac{e}{m}B\omega - \omega^2}, \quad (1)$$

con el signo  $+$  asociado a la polarización circular derecha, el signo  $-$  a la izquierda,  $e$  y  $m$  son la carga y masa del electrón,  $\epsilon_0$  la permitividad del vacío,  $\omega_0$  es una frecuencia característica del material,  $\omega$  es la frecuencia de la onda y  $N$  es el número de electrones por unidad de volumen del material que oscilan debido a la radiación.

De este modo, si la onda viaja una distancia  $l$  dentro del material, se formará una diferencia de fase en las componentes del campo óptico, dando lugar a una rotación por un ángulo  $\theta$ , dada por:

$$\theta = \nu Bl, \quad (2)$$

con  $\nu$  una constante llamada *constante de Verdet*, diferente para cada medio. [2] Esta constante es fun-

---

\* aldojavier@ciencias.unam.mx

ción de la temperatura del medio y de la frecuencia de la onda. [3] Una expresión para la constante de Verdet es: [1]

$$\nu = \frac{Ne^3\mu\omega^2}{2nm^2c\epsilon_0(\omega_0^2 - \omega^2)^2}, \quad (3)$$

donde  $\mu$  es la permeabilidad magnética del material,  $c$  es la rapidez de la luz y  $n = (n_+ + n_-)/2$ , que está en términos de la ecuación (1).

En este trabajo se estudiará la dependencia del ángulo de rotación del plano de oscilación con la intensidad del campo magnético aplicado para distintos cristales de varias longitudes, con una sola frecuencia de onda. Para ello utilizaremos la ecuación (2). Además, obtendremos la constante de Verdet para los cristales ópticos SF-5 y F-2.

La organización de este trabajo se presenta a continuación: en la sección 2 se menciona el arreglo experimental utilizado, así como los detalles técnicos; en la sección 3 se presentan los resultados y discusiones; y por último, en la sección 4 se desarrollan las conclusiones.

## 2. Desarrollo Experimental

### 2.1. Arreglo experimental

El arreglo, mostrado en la Figura 1, consistió de un láser de longitud de onda de  $532\text{ nm}$  cuyo haz se hizo pasar a través de un electroimán que generaba un campo magnético uniforme en una región donde se colocaba un cristal. En los extremos del electroimán estaban colocados dos polarizadores, girados de tal manera que la intensidad de luz fuera mínima cuando no había un campo magnético aplicado. Para determinar este mínimo de intensidad, se utilizó un electrómetro junto con una fotocelda. Al electroimán estaba conectado su fuente de poder junto con un multímetro para la medición de la corriente.

Con un gaussímetro se midió el campo magnético en la región de interés para distintos valores de la corriente en el electroimán. Con un vernier se midieron las longitudes de siete distintos cristales.

En cada medición, antes de aplicar el campo magnético, se marcaba en un polarizador el ángulo que correspondía al mínimo de intensidad luminosa. Después de aplicar el campo, se giraba el polarizador

para volver a obtener un mínimo y posteriormente se medía la desviación angular.

Las mediciones se realizaron en intervalos de  $1\text{ A}$ , en un rango de  $0$  a  $5\text{ A}$  de corriente. Se repitieron las mediciones en este rango 5 veces por cada cristal.

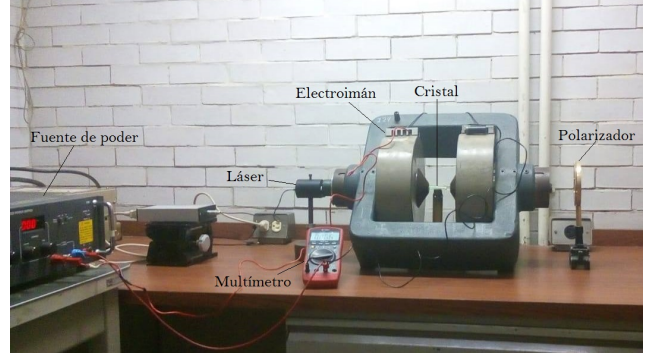


Figura 1: Arreglo experimental.

### 2.2. Especificaciones técnicas

Las mediciones de corriente se efectuaron con un multímetro Steren MUL-600. En el rango trabajado, la incertidumbre es de  $(\pm 1.5\% + 5)$ , pero debido a las fluctuaciones en la última cifra de las mediciones se decidió tomar solamente  $\pm 1.5\%$  como incertidumbre. [4]

Se utilizó un electroimán CENCO, modelo J, no. 079637; un electrómetro digital Keithley mod. 616; una fuente de poder BK Precision, mod. 1781; y una fuente luminosa (láser) RainBow Photonics de  $532\text{ nm}$ .

Las mediciones del campo magnético se realizaron con un gaussímetro FW Bell, mod. 5180. Se trabajó en el rango alto del aparato, con una incertidumbre de  $\pm 0.5\%$  de la medida. [5]

Para medir las desviaciones angulares se utilizó el polarizador que, por ser una medición mecánica, tenía una incertidumbre de  $\pm 0.5^\circ$ .

El análisis de los datos se realizó con el programa Microsoft Excel 2010 [6] y el programa SciDAVis [7].

## 3. Resultados y Análisis

Los resultados de la calibración del electroimán se muestran en la Figura 2 y en la Tabla 3 del Apéndice

A. El ajuste lineal se realizó con el programa SciDA-Vis, obteniendo:

$$B = a I, \quad (4)$$

con  $B$  el campo magnético,  $I$  la corriente y  $a = (0.04 \pm 0.01) T/A$ . Los valores explícitos que otorgó el programa se encuentran en el Apéndice C. Solamente se usaron dos cifras significativas debido a la resolución del multímetro. Se omitió el valor de la ordenada al origen porque era demasiado pequeño para tomarlo en cuenta.

Notamos en la Figura 2 que el valor del campo correspondiente a  $4.80 A$  tuvo una desviación de la tendencia lineal. Esta desviación puede deberse a un error sistemático en la medición del campo, aunque también puede justificarse con la gráfica de la relación entre corriente y campo que trae incluida el manual del electroimán CENCO (Figura 3, Apéndice A), pues en ella se observa que aproximadamente a los  $5 A$  la relación entre campo y corriente deja de ser lineal.

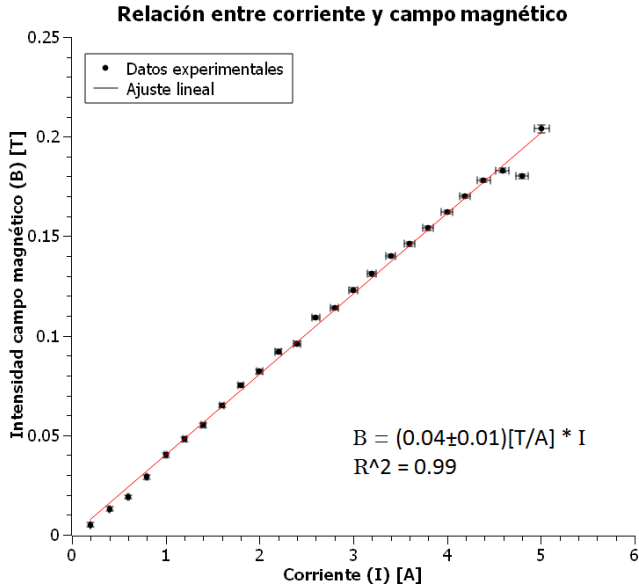


Figura 2: Calibración del electroimán.

Los datos de la rotación del plano de polarización con respecto a la corriente aplicada, para los siete cristales utilizados, se presentan en las Tablas 4-10. Con estos datos se calcularon corrientes y ángulos promedio, mostrados en la Tabla 11. En esta misma tabla, se muestra el campo magnético asociado a cada corriente promedio, calculado con la ecuación (4). Estos valores fueron utilizados en la ecuación (2), en la forma  $\nu = \theta/Bl$ , para calcular la constante

de Verdet en asociada a cada cristal. Posteriormente, se hizo un promedio de las constantes de Verdet asociadas a los cristales SF-5 y a los F-2, y se hizo un cambio de unidades obteniendo los resultados finales de la Tabla 1. Notamos que no existen cifras después del punto decimal en las constantes de Verdet porque la escala que se utilizó para medir ángulos tenía una resolución de  $1^\circ$ , lo que tuvo como consecuencia que se redondearan los valores de las constantes.

Cristal	Constante de Verdet ( $\nu$ ) [ $rad/T m$ ]
SF-5	$18 \pm 3$
F-2	$15 \pm 2$

Tabla 1: Constantes de Verdet para los cristales SF-5 y F-2 para una longitud de onda de  $532 nm$ . Para el valor central de  $\nu$  se usó la ecuación (2) y la incertidumbre es la desviación estándar.

Los valores encontrados en la literatura para las constantes de Verdet se muestran en la Tabla 2.

Cristal	Constante de Verdet ( $\nu$ ) [ $rad/T m$ ]
SF-5	16.9
F-2	13.7

Tabla 2: Constantes de Verdet para los cristales SF-5 y F-2, a una temperatura de  $300 K$  y una longitud de onda de  $546.1 nm$ . [8]

Al comparar los valores obtenidos con los de la literatura, notamos que el valor del cristal SF-5 coincide con el medido, dentro del intervalo de error, con un error porcentual del 6.5 %; también el valor del cristal F-2 cae dentro del intervalo de error, y tiene un error porcentual de 9.5 %.

Para justificar la discrepancia de nuestros resultados con los valores aceptados, hay que notar que estos últimos fueron obtenidos para una longitud de onda diferente de la nuestra ( $532 nm$ ) y, como se mencionó en la sección 1, la constante de Verdet depende de la frecuencia (o longitud) de la onda. De igual modo, hay una dependencia en la temperatura, y el lugar en el que se efectuó el experimento era cerrado, por lo que la temperatura pudo haber variado de  $300 K$  cuando se ventilaba el lugar, provocando una variación en el resultado.

Notamos de la ecuación (3), que si  $\lambda$  es la longitud

de onda, entonces  $\nu \propto \lambda^2$ , puesto que  $\omega = 2\pi c/\lambda$ . Esto nos indica que, teóricamente, debimos obtener constantes de Verdet menores a los valores en la Tabla 2 porque utilizamos un láser con menor longitud de onda, sin embargo, la incertidumbre en nuestras medidas no nos permite apreciar esta diferencia.

Otra posible fuente de error fue que cada que se redefinía el cero para la medición angular, se giraban las perillas de la fuente de poder al mínimo valor de voltaje y corriente, sin embargo, se hizo una medición del campo en esta configuración y se encontró que había un campo magnético residual, por lo que en realidad estábamos midiendo un ángulo ligeramente distinto del de la ecuación (2). Este error se puede evitar desconectando completamente la fuente de poder del electroimán.

## 4. Conclusiones

Se comprobó que existía una rotación del plano de polarización de un haz incidente al aplicar un campo magnético a los cristales SF-5 y F-2, verificando así el efecto Faraday. Se calculó mediante la ecuación (2) la constante de Verdet obteniendo los valores de  $(18 \pm 3) \text{ rad/Tm}$  para los cristales SF-5 y  $(15 \pm 2) \text{ rad/Tm}$  para los cristales F-2, con un error porcentual respecto al valor aceptado del 6.5 % y 9.5 %, respectivamente. Concluimos que se obtuvieron medidas que coincidían con los valores de referencia pero que hizo falta precisión en los datos para obtener mejores resultados.

Para una futura repetición del experimento, se sugiere utilizar un láser con una longitud de onda lo más parecida a los valores utilizados en la literatura, así como un cuarto con una temperatura similar a la que se usó para determinar los valores de referencia.

Además, se sugiere que para redefinir el cero angular, se desconecte por completo la fuente de poder para evitar campos residuales. Por último, para obtener una mayor precisión en las medidas se sugiere utilizar la escala del polarizador del electroimán para medir los ángulos puesto que tiene una mayor resolución que la escala del polarizador usado, y además, que el experimento se realice en el rango de 0 a 3.5 A puesto que en ese rango el multímetro otorga una resolución con tres cifras significativas.

## Referencias

- [1] Sommerfeld, A. (1949), *“Optics. Lectures on Theoretical Physics, Vol. IV”*, Academic Press.
- [2] Jenkins, F., White, H. (2001), *“Fundamentals of Optics”*, 4ta edición, McGraw-Hill.
- [3] Hecht, E. (2017), *“Optics”*, 5ta edición, Pearson.
- [4] En línea: Steren, MUL-600, “Manual de instrucciones”.  
Fecha de consulta: 21 de febrero de 2019.
- [5] En línea: Twilight, Gaussímetros portátiles, Serie 5100, “Manual de instrucciones”.  
Fecha de consulta: 21 de febrero de 2019.
- [6] Microsoft Office Professional Plus 2010, *“Microsoft Excel”*, Versión 14.0.4760.1000 (32 bits)
- [7] En línea: Benkert, et al, “SciDAVis”.  
Fecha de consulta: 21 de febrero de 2019.
- [8] Weber, Marvin J. (2003), *“Handbook of Optical Materials”*, CRC Press.
- [9] Manual de prácticas del Laboratorio de Física Contemporánea I, Efecto Faraday, Facultad de Ciencias, UNAM.

## A. Datos experimentales

Corriente ( $I$ ) [A]	$\delta_I$ [A] ( $\pm 1.5\%$ )	Campo Magnético ( $B$ ) [T]	$\delta_B$ [T] ( $\pm 0.75\%$ )
5.01	0.08	0.204	0.002
4.80	0.07	0.180	0.001
4.59	0.07	0.183	0.001
4.39	0.07	0.178	0.001
4.19	0.06	0.170	0.001
4.00	0.06	0.162	0.001
3.800	0.057	0.154	0.001
3.601	0.054	0.146	0.001
3.401	0.051	0.140	0.001
3.199	0.048	0.131	0.001
3.000	0.045	0.123	0.001
2.800	0.042	0.114	0.001
2.601	0.039	0.109	0.001
2.401	0.036	0.096	0.001
2.200	0.033	0.092	0.001
2.000	0.030	0.082	0.001
1.800	0.027	0.075	0.001
1.601	0.024	0.065	0.001
1.400	0.021	0.055	0.001
1.201	0.018	0.048	0.001
1.000	0.015	0.040	0.001
0.798	0.012	0.029	0.001
0.599	0.009	0.019	0.001
0.400	0.006	0.013	0.001
0.198	0.003	0.005	0.001

Tabla 3: Relación entre corriente y campo magnético en el electroimán.

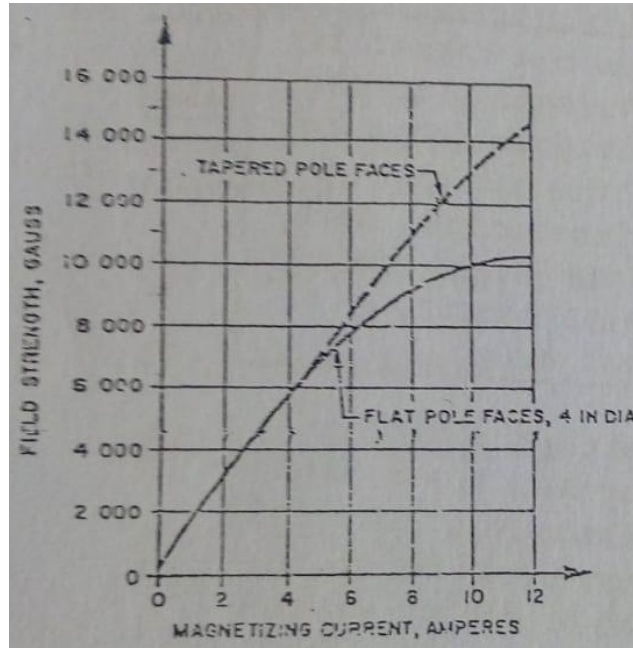


Figura 3: Relación entre corriente y campo magnético para los electroimanes CENCO J y K modelos 079637, 079637-005 y 079637-006. [9]

Cristal 1 SF-5 ( $5.040 \pm 0.0025$ )cm									
Corriente ( $\pm 1.5\%$ )	Ángulo ( $\pm 0.5$ )	Corriente ( $\pm 1.5\%$ )	Ángulo ( $\pm 0.5$ )	Corriente ( $\pm 1.5\%$ )	Ángulo ( $\pm 0.5$ )	Corriente ( $\pm 1.5\%$ )	Ángulo ( $\pm 0.5$ )	Corriente ( $\pm 1.5\%$ )	Ángulo ( $\pm 0.5$ )
4.97	11	4.99	12	5.01	11	4.96	11	5.05	12
3.99	9	4.00	11	4.00	10	4.00	8	3.99	10
2.998	7	3.015	7	2.996	7	3.001	7	2.998	9
2.002	5	2.005	5	2.009	5	2.006	5	2.005	4
1.005	3	1.002	3	1.007	2	1.018	3	0.987	3

Tabla 4: Desviación angular para distintos valores de corriente para el Cristal 1. Los datos de la corriente tienen unidades de A y los de los ángulos de  $^{\circ}$ .

Cristal 2 SF-5 ( $3.940 \pm 0.0025$ )cm									
Corriente ( $\pm 1.5\%$ )	Ángulo ( $\pm 0.5$ )	Corriente ( $\pm 1.5\%$ )	Ángulo ( $\pm 0.5$ )	Corriente ( $\pm 1.5\%$ )	Ángulo ( $\pm 0.5$ )	Corriente ( $\pm 1.5\%$ )	Ángulo ( $\pm 0.5$ )	Corriente ( $\pm 1.5\%$ )	Ángulo ( $\pm 0.5$ )
4.99	10	4.99	8	4.99	9	4.99	8	5.00	8
3.97	6	3.98	7	4.02	6	4.00	5	4.00	7
2.996	5	2.998	5	3.000	6	3.003	5	2.998	6
2.001	4	2.009	3	2.000	3	1.993	3	2.003	3
0.995	3	1.022	1	0.995	2	1.003	2	0.999	1

Tabla 5: Desviación angular para distintos valores de corriente para el Cristal 2. Los datos de la corriente tienen unidades de A y los de los ángulos de  $^{\circ}$ .

Cristal 3 F-2 ( $5.040 \pm 0.0025$ )cm									
Corriente ( $\pm 1.5\%$ )	Ángulo ( $\pm 0.5$ )	Corriente ( $\pm 1.5\%$ )	Ángulo ( $\pm 0.5$ )	Corriente ( $\pm 1.5\%$ )	Ángulo ( $\pm 0.5$ )	Corriente ( $\pm 1.5\%$ )	Ángulo ( $\pm 0.5$ )	Corriente ( $\pm 1.5\%$ )	Ángulo ( $\pm 0.5$ )
5.01	10	5.03	10	5.00	10	5.00	10	5.00	10
4.00	7	4.00	8	4.04	7	3.99	6	3.98	7
2.992	5	2.996	6	3.003	5	2.998	6	2.990	6
2.002	3	2.002	3	2.001	4	2.004	4	1.998	4
1.000	1	0.998	2	0.995	2	1.003	1	0.998	1

Tabla 6: Desviación angular para distintos valores de corriente para el Cristal 3. Los datos de la corriente tienen unidades de  $A$  y los de los ángulos de  $^\circ$ .

Cristal 4 F-2 ( $4.020 \pm 0.0025$ )cm									
Corriente ( $\pm 1.5\%$ )	Ángulo ( $\pm 0.5$ )	Corriente ( $\pm 1.5\%$ )	Ángulo ( $\pm 0.5$ )	Corriente ( $\pm 1.5\%$ )	Ángulo ( $\pm 0.5$ )	Corriente ( $\pm 1.5\%$ )	Ángulo ( $\pm 0.5$ )	Corriente ( $\pm 1.5\%$ )	Ángulo ( $\pm 0.5$ )
5.00	6	4.99	6	5.01	6	4.94	7	4.99	7
4.00	5	4.01	5	3.99	5	3.97	6	4.00	5
2.997	3	2.998	5	2.996	4	2.999	3	3.000	4
2.002	2	2.005	3	2.004	2	2.000	1	1.999	2
1.003	2	0.998	1	1.002	2	0.998	0	0.996	1

Tabla 7: Desviación angular para distintos valores de corriente para el Cristal 4. Los datos de la corriente tienen unidades de  $A$  y los de los ángulos de  $^\circ$ .

Cristal 5 SF-5 ( $3.055 \pm 0.0025$ )cm									
Corriente ( $\pm 1.5\%$ )	Ángulo ( $\pm 0.5$ )	Corriente ( $\pm 1.5\%$ )	Ángulo ( $\pm 0.5$ )	Corriente ( $\pm 1.5\%$ )	Ángulo ( $\pm 0.5$ )	Corriente ( $\pm 1.5\%$ )	Ángulo ( $\pm 0.5$ )	Corriente ( $\pm 1.5\%$ )	Ángulo ( $\pm 0.5$ )
4.99	6	5.00	6	5.01	6	5.00	6	4.94	6
3.99	4	4.00	5	4.00	4	4.01	5	3.99	5
2.997	3	2.999	3	3.008	4	2.990	4	3.009	3
1.999	1	2.001	2	2.003	2	2.001	3	2.007	2
1.003	0	1.006	1	1.000	1	1.011	0	1.003	1

Tabla 8: Desviación angular para distintos valores de corriente para el Cristal 5. Los datos de la corriente tienen unidades de  $A$  y los de los ángulos de  $^\circ$ .

Cristal 6 F-2 ( $3.050 \pm 0.0025$ )cm									
Corriente ( $\pm 1.5\%$ )	Ángulo ( $\pm 0.5$ )	Corriente ( $\pm 1.5\%$ )	Ángulo ( $\pm 0.5$ )	Corriente ( $\pm 1.5\%$ )	Ángulo ( $\pm 0.5$ )	Corriente ( $\pm 1.5\%$ )	Ángulo ( $\pm 0.5$ )	Corriente ( $\pm 1.5\%$ )	Ángulo ( $\pm 0.5$ )
5.00	5	4.99	6	4.99	5	4.99	7	5.02	5
3.99	4	3.99	5	3.99	4	3.99	4	3.99	4
2.997	3	2.998	3	2.997	4	3.002	3	2.997	2
1.997	2	1.995	2	2.003	3	2.001	2	1.997	2
0.999	2	0.998	1	1.002	1	0.996	1	0.998	1

Tabla 9: Desviación angular para distintos valores de corriente para el Cristal 6. Los datos de la corriente tienen unidades de  $A$  y los de los ángulos de  $^\circ$ .

Cristal 7 F-2 ( $2.020 \pm 0.0025$ )cm									
Corriente ( $\pm 1.5\%$ )	Ángulo ( $\pm 0.5$ )	Corriente ( $\pm 1.5\%$ )	Ángulo ( $\pm 0.5$ )	Corriente ( $\pm 1.5\%$ )	Ángulo ( $\pm 0.5$ )	Corriente ( $\pm 1.5\%$ )	Ángulo ( $\pm 0.5$ )	Corriente ( $\pm 1.5\%$ )	Ángulo ( $\pm 0.5$ )
4.99	4	4.98	4	4.99	4	5.00	5	5.00	4
3.99	4	4.00	4	3.97	3	4.03	3	4.01	3
3.001	2	2.997	2	3.000	2	2.998	2	3.001	2
2.006	2	1.997	2	2.005	2	2.003	2	1.999	2
0.998	1	1.000	1	1.001	1	1.003	1	1.004	1

Tabla 10: Desviación angular para distintos valores de corriente para el Cristal 7. Los datos de la corriente tienen unidades de  $A$  y los de los ángulos de  $^\circ$ .



Cristal	Corriente ( $\bar{I}$ ) [A]	$\delta_{\bar{I}}$ [A] ( $\pm 1.5\%$ )	Ángulo ( $\bar{\theta}$ ) [ $^\circ$ ]	$\delta_{\bar{\theta}}$	Campo Magnético ( $B$ ) [T]	$\delta_B$
1	5.00	0.07	11	0.5	0.200	0.008
	4.00	0.06	10	1.1	0.160	0.006
	3.002	0.045	7	0.9	0.120	0.005
	2.005	0.030	5	0.5	0.080	0.003
	1.004	0.015	3	0.5	0.040	0.002
2	4.99	0.07	9	0.9	0.200	0.008
	3.99	0.06	6	0.8	0.160	0.006
	2.999	0.045	5	0.5	0.120	0.005
	2.001	0.030	3	0.5	0.080	0.003
	1.003	0.015	2	0.8	0.040	0.002
3	5.01	0.08	10	0.5	0.200	0.008
	4.00	0.06	7	0.7	0.160	0.006
	2.996	0.045	6	0.5	0.120	0.005
	2.001	0.030	4	0.5	0.080	0.003
	0.999	0.015	1	0.5	0.040	0.002
4	4.99	0.07	6	0.5	0.199	0.008
	3.99	0.06	5	0.5	0.160	0.006
	2.998	0.045	4	0.8	0.120	0.005
	2.002	0.030	2	0.7	0.080	0.003
	0.999	0.015	1	0.8	0.040	0.002
5	4.99	0.07	6	0.5	0.200	0.008
	4.00	0.06	5	0.5	0.160	0.006
	3.00	0.045	3	0.5	0.120	0.005
	2.00	0.030	2	0.7	0.080	0.003
	1.00	0.015	1	0.5	0.040	0.002
6	5.00	0.07	6	0.9	0.200	0.008
	3.99	0.06	4	0.5	0.160	0.006
	2.998	0.045	3	0.7	0.120	0.005
	1.999	0.030	2	0.5	0.080	0.003
	0.999	0.015	1	0.5	0.040	0.002
7	4.99	0.07	4	0.5	0.200	0.008
	4.00	0.06	3	0.5	0.160	0.006
	2.999	0.045	2	0.5	0.120	0.005
	2.002	0.030	2	0.5	0.080	0.003
	1.001	0.015	1	0.5	0.040	0.002

Tabla 11: Valores promedios para la corriente y desviación angular correspondientes a los datos de las Tablas 4-10, y campo magnético calculado con la relación (4). Para  $\delta_{\bar{I}}$  se utilizó ( $\pm 1.5\%$ ) porque éste valor era más grande que la desv. est. Para  $\delta_{\bar{\theta}}$  se utilizó el mayor valor entre la incertidumbre asociada al instrumento ( $\pm 0.5^\circ$ ) y la desv. est. Por último,  $\delta_B$  se calculó con la ec. (5) del Apéndice B.

## B. Ecuaciones de incertidumbre

La incertidumbre asociada a la ecuación para el campo magnético (4) es:<sup>1</sup>

$$\delta_B = |a| \delta_I + |I| \delta_a. \quad (5)$$

## C. Ajuste de SciDAVis

Ajuste del tipo:  $y = a * x + b$ , para los datos de la Tabla 3.

$$a = 0.0404299820429793 + / - 0.000145094735271197$$

$$b = -0.000490160033790162 + / - 0.000437844516782362$$

$$R^2 = 0.996162993686045$$

---

<sup>1</sup>La ecuación de incertidumbre de una variable  $f = f(x_1, \dots, x_n)$ , está dada por  $\delta_f = \sum_{i=1}^n |\partial f / \partial x_i| \delta_{x_i}$ .