

Estudio cuantitativo de la inducción electromagnética entre dos bobinas en función del número de espiras de una de ellas

José Manuel Villalba Montoya, Francisco Javier Manjón Herrera, Alberto Nájera López, Enrique Arribas Garde y Augusto Beléndez Vázquez

Mediante el uso de diversas bobinas, tres polímetros, un generador de funciones, núcleos de hierro y cables, se pretende ilustrar de forma sencilla el fenómeno de la inducción electromagnética. Para ello se mide la diferencia de potencial en el primario y en el secundario, variando el número de espiras del secundario y manteniendo fijo el número de espiras del primario. Se comprobará que hay una relación lineal entre estas dos variables y se calculará la pendiente de la recta de ajuste por mínimos cuadrados. Se compararán los resultados obtenidos con lo predicho por la teoría, para un transformador ideal, y se verá que hay que introducir un factor corrector que llamaremos rendimiento del transformador.

Queremos enfatizar que estas medidas se pueden realizar en la mayor parte de los laboratorios de Física de los Centros de Bachillerato y de los laboratorios de Física de casi todas las carreras de Ciencias o e Ingeniería.

1. Introducción

El conjunto de experiencias que hemos elaborado está orientado al estudio cuantitativo de la inducción electromagnética y están concebidas para un laboratorio de Bachillerato de la asignatura de Física o de un laboratorio universitario de Física de primer curso o para un curso de Electricidad y Magnetismo. El principal objetivo que nos proponemos es consolidar e ilustrar conceptos como el de inducción electromagnética y la ley de Faraday.

El montaje experimental propuesto, se fundamenta en la utilización de bobinas de diferente número de espiras (figura 1), un generador de funciones, tres polímetros, una barra de hierro y un núcleo de hierro en forma de U, cerrado



Fig.1. Diferentes bobinas que han sido utilizadas en este trabajo. Los números que llevan impresos nos indican las espiras que tiene cada una.

por una pieza móvil en el extremo abierto (figuras 2 y 3), material que se puede encontrar en cualquier laboratorio de Bachillerato, debido también a la aparición en las Pruebas de Acceso a la Universidad de preguntas sobre prácticas que cubren los objetivos experimentales de la asignatura, entre ellas, la inducción electromagnética [1].

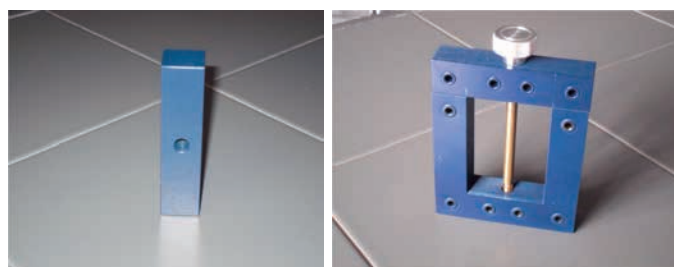


Fig.2. Núcleos de hierro utilizados. A la izquierda podemos ver la barra de material ferromagnético y a la derecha el núcleo de forma rectangular, para que las líneas del campo magnético queden “atrapadas” en su interior. Los agujeros que tienen son para intentar reducir al máximo las corrientes de Foucault.

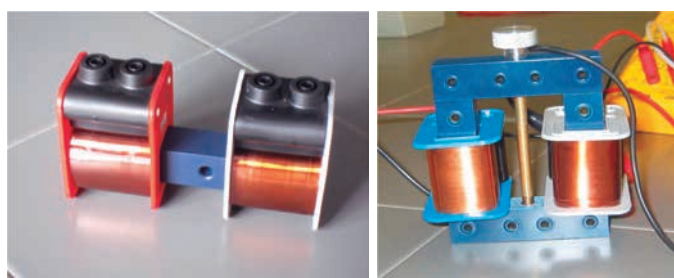


Fig.3. Bobinas con ambos núcleos en su interior.

Las experiencias concretas que se proponen se basan en la medida del voltaje que se genera en una bobina (secundario) cuando aplicamos una diferencia de potencial o fuerza electromotriz (fem) a otra bobina (primario) cuando ambas bobinas están colocadas una al lado de la otra. Utilizando como secundario bobinas con distinto número de espiras (en nuestro caso cinco bobinas de 200, 400, 800, 1600 y 3200 espiras) ajustaremos las medidas a las expresiones relacionadas con la teoría de los transformadores mediante las técnicas habituales.

Se tomarán las medidas en tres casos diferentes:

- 1) Estando las bobinas en vacío (en realidad es el aire el medio material que hay dentro de ellas) pero una al lado de la otra,
- 2) Insertando en su interior una barra de material ferromagnético,
- 3) Colocando dentro de ellas un núcleo de hierro, es decir, un material ferromagnético en forma de rectángulo.

Un aspecto muy interesante para el desarrollo de las experiencias propuestas es el hecho de que las medidas se realizan en “tiempo real”, lo que implica que los estudiantes pueden observar directamente los efectos de conectar o desconectar un determinado cable, cambiar una bobina de un determinado número de espiras por otra, etc.

Abordaremos el planteamiento teórico y la discusión de los resultados suponiendo un nivel de formación, como mínimo, de los estudiantes de la asignatura de Física de 2º curso de Bachillerato.

2. Fundamento Teórico

Para el desarrollo de la experiencia propuesta un primer aspecto teórico que los estudiantes deben comprender es que al conectar a un generador dos cables y éstos a una bobina se va producir una diferencia de potencial (ddp) entre los extremos de ésta. En 1820 **Oersted** descubrió que las cargas eléctricas en movimiento interactúan con los imanes (el famoso experimento del cable por el que circula una corriente eléctrica y una brújula cercana a él cambia su orientación, llegando a ponerse casi perpendicular al cable). Posteriormente **Ampère** descubrió que los campos magnéticos ejercen fuerzas sobre las corrientes eléctricas, y esto produjo una enorme revolución científica, al mostrar la relación entre dos fenómenos físicos hasta entonces independientes, además de abrir el camino para generar corrientes eléctricas a través de imanes de un modo más barato que con la pila de Volta inventada en 1800 [2].

En 1831 **Faraday**, generó corrientes eléctricas mediante **campos magnéticos variables**. Un año antes **Henry** obtenía resultados similares; pero es a Faraday a quien se le reconoce como el autor del descubrimiento del fenómeno de inducción electromagnética, no sólo porque sus publicaciones fueron anteriores a las de Henry, sino también por hacer una investigación exhaustiva en todos los aspectos del tema.

Faraday observó que la intensidad de la corriente inducida es mayor cuanto más rápidamente cambie el número de líneas de fuerza que atraviesan el circuito (se consigue,

al acercar imanes y bobinas, cambiando de velocidad el imán o la bobina), hecho experimental reflejado en su ley que se enuncia así: “**La fuerza electromotriz inducida, en un circuito es directamente proporcional a la velocidad instantánea con la que varía el flujo magnético que atraviesa el circuito**”, ley cuya expresión matemática es [3]:

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

donde N el número de espiras de la bobina y el flujo magnético que atraviesa una de las espiras de esta bobina.

Usando estos principios físicos, se construyeron los transformadores, dispositivos utilizados para cambiar la diferencia de potencial en los circuitos de corriente alterna. Los transformadores constan de dos circuitos físicamente separados, denominados primario y secundario. Entre ambos circuitos se suele intercalar un núcleo de hierro debido a su alta permeabilidad magnética que permite que prácticamente todas las líneas del campo magnético del primario atraviesen el secundario.

En el circuito primario se introduce una corriente alterna que crea un campo magnético variable y se genera en el primario una tensión V_1 proporcional al número de espiras N_1 . Si suponemos que todo el flujo magnético que pasa por el primario lo hace por el secundario, se crea en éste una tensión inducida V_2 proporcional al número de espiras del circuito secundario (N_2), tal que:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{-N_1 \frac{d\phi}{dt}}{-N_2 \frac{d\phi}{dt}} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (2)$$

donde “ a ” se conoce como la **relación de espiras** del transformador.

En los transformadores ideales unidos por un núcleo de hierro, no hay pérdidas de energía por lo que la potencia eléctrica en el primario coincide con la del secundario y por tanto se cumple la relación sencilla:

$$V_1 I_1 = V_2 I_2 \quad (3)$$

de donde, usando la Ec. (2), se llega a la expresión:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} \quad (4)$$

Volvemos a destacar que la Ec. (4) corresponde a un transformador ideal, para el que todas las líneas de flujo magnético quedan encerradas dentro del núcleo del transformador, de tal manera que no hay pérdidas de flujo y no hay disipación de energía. Sin embargo, en un transformador real parte de las líneas del campo magnético del primario escapan del núcleo de hierro por lo que no pasarán a través de las espiras de la bobina del secundario, de modo que el flujo magnético y la tensión inducida en la bobina del secundario, V_2 , serán menores que en el caso ideal. Además aparecen corrientes parásitas que calientan el entrehierro y que darán lugar a pérdidas de potencia

Si designamos por “ f ” a la fracción de las líneas de campo magnético (flujo magnético) encerradas dentro del núcleo del transformador, se tendrá, usando la Ec. (4):

$$V_2 = f \frac{N_2}{N_1} V_1 \tag{5}$$

La cantidad $100f$ es lo que denominaremos **rendimiento del transformador** y cuyo valor será igual a 100 para el caso del transformador ideal. Como se verá más adelante, en este trabajo obtendremos valores, para el rendimiento de los montajes realizados, comprendidos entre 3.79 y 65.1.

3. Procedimiento

La experiencia consiste en medir la diferencia de potencial en varias bobinas secundarias en función de su número de espiras. La señal sinusoidal producida por el generador de funciones da lugar a una corriente que crea un campo magnético variable en la bobina primaria, induciendo una fem en la bobina secundaria. En la figura 4 se puede ver una fotografía del montaje experimental empleado y en la figura 5 un esquema de dicho montaje.



Fig.4. Fotografía del montaje experimental.

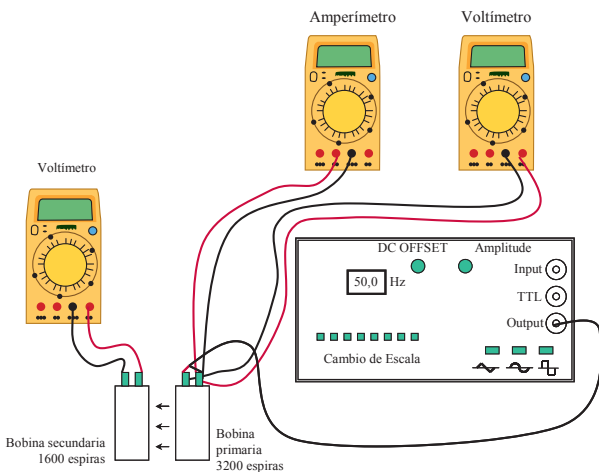


Fig.5. Esquema del montaje experimental empleado.

Para toda la experiencia se utilizará la misma bobina primaria con $N_1=3200$ espiras y se mantiene fija la frecuencia del generador a 50.0 Hz con una señal de onda sinusoidal. La señal introducida será, por tanto, alterna y por ello la tecla DC OFFSET del generador de funciones debe estar trincada a la izquierda, para no introducir ninguna componente de continua. El valor eficaz del voltaje se controla con el mando “Amplitud” del generador de funciones. Fijamos la ddp que se genera en el primario con dicha mando a 3.00 ± 0.03 V y cambiamos las bobinas secundarias para variar su número de espiras. Se observa como cuando el número de espiras aumenta, la ddp inducida también lo hace. Se toman los siguientes datos: la ddp que se genera en la bobina secundaria, la ddp que hay en la bobina primaria y la corriente que pasa por esta bobina primaria.

Representamos los datos de la ddp inducida frente al número de espiras de la bobina secundaria. Ajustamos estos datos mediante el método de los mínimos cuadrados con lo que se obtendrá una línea recta (figura 6), lo que viene a indicar que cuando el número de vueltas del secundario se incrementa en un factor determinado, la ddp del secundario aumenta en ese mismo factor. La recta representada debe pasar por el origen de coordenadas (si V_1 es nula en el primario no habrá V_2 en el secundario) y su pendiente, m , corresponde al coeficiente de proporcionalidad entre la ddp V_2 y el número de espiras N_2 en el secundario, es decir, $V_2 = m N_2$.

Por otro lado, de la Ec. (2) podemos encontrar la relación para el caso ideal:

$$V_2 = \frac{V_1}{N_1} N_2 \tag{6}$$

Los valores de V_1 y N_1 son conocidos, por lo que obtenemos:

$$V_2 = \frac{V_1}{N_1} N_2 = (9.38 \pm 0.09) \cdot 10^{-4} N_2 \tag{7}$$

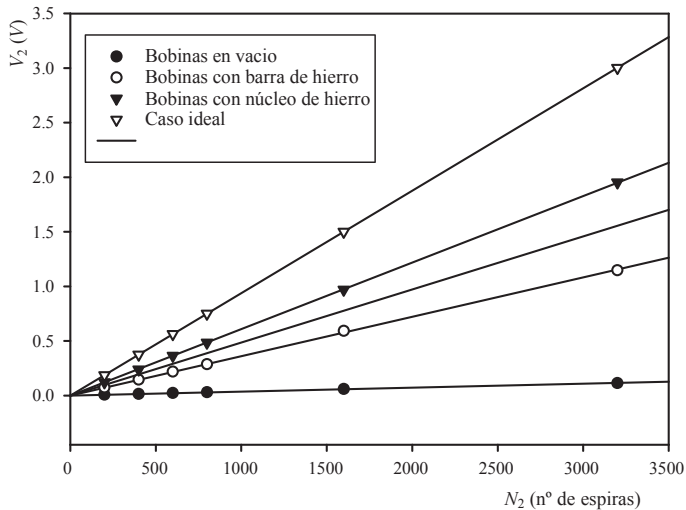
En la Ec. (7) hemos tenido en cuenta que V_1 viene afectada de un error absoluto, como comentamos antes, por lo que el cociente V_1/N_1 tiene su correspondiente error absoluto. Este valor de la pendiente se obtendría en el caso ideal. Según la ecuación (5), el cociente entre el valor de la pendiente obtenida experimentalmente y el valor la pendiente obtenida en el caso ideal nos da el rendimiento del transformador (relacionado con el factor f).

Se han realizado tres montajes diferentes:

- 1) Estando las bobinas en vacío (en realidad es el aire el medio material que hay dentro de ellas) pero una al lado de la otra, para que el flujo magnético creado por el primario atraviese, lo máximo posible, el secundario, como se ve en la figura 5.
- 2) Insertando en el interior de las dos bobinas una barra de material ferromagnético para confinar el flujo magnético, como se muestra en la parte izquierda de la figura 3.
- 3) Colocando dentro de las bobinas un núcleo de hierro, es decir, un material ferromagnético, tal como se muestra en la parte derecha de la figura 3.

Tabla 1. Valores experimentales obtenidos de las pendientes, de las correlaciones y de los diferentes rendimientos.

	Valor Teórico	Bobinas en vacío	Bobinas con barra de hierro	Bobinas con núcleo de hierro
Pendiente	$(9.38 \pm 0.09) \cdot 10^{-4}$	$(3.55 \pm 0.06) \cdot 10^{-5}$	$(3.59 \pm 0.03) \cdot 10^{-4}$	$(6.11 \pm 0.10) \cdot 10^{-4}$
Correlación	-	$r = 0.999494$	$r = 0.999855$	$r = 0.999995$
Rendimiento	100 %	$(3.79 \pm 0.07) \%$	$(38.3 \pm 0.5) \%$	$(65.1 \pm 1.2) \%$

**Fig. 6.** Gráfica comparativa de los valores obtenidos experimentalmente en cuatro casos diferentes: bobinas sin núcleo de hierro, bobinas con la barra, bobinas con el núcleo de hierro y el caso ideal.

En la figura 6 se han representado las gráficas de los valores obtenidos, mientras que en la Tabla 1 se indican los valores de las pendientes de las rectas de ajuste, así como los rendimientos calculados en cada uno de los casos analizados.

4. Discusión y conclusiones

De la Tabla 1 y de la figura 6 se pueden observar los siguientes resultados:

- 1) El valor teórico de la pendiente $9.38 \cdot 10^{-4}$ es mucho mayor que el obtenido para las bobinas en vacío, $3.55 \cdot 10^{-5}$. Ambas pendientes se miden en V. Esta discrepancia tan grande se debe, en nuestra opinión, a que no podemos suponer que no haya pérdida de flujo en el caso de las bobinas en vacío, de hecho se trata del caso más desfavorable pues es lógico pensar que en vacío la pérdida de flujo magnético (y por tanto de energía) será mayor.
- 2) El valor de la pendiente aumenta en un factor ligeramente superior a 10 al introducir la barra de hierro entre las dos bobinas, comparado con las bobinas en vacío. Es decir, el rendimiento del transformador formado por las dos bobinas acopladas aumenta un orden de magnitud.

- 3) Comparando con las bobinas con la barra, la pendiente es casi el doble si introducimos el núcleo de hierro. Vemos que se van obteniendo valores que se acercan al cociente del número de espiras (valor "a" de la relación de espiras) con lo que ahora sí que estamos cada vez más cerca de que se cumpla la ecuación (2).
- 4) El rendimiento del transformador es cien veces la inversa del cociente entre la tensión teórica en el secundario (transformador ideal sin pérdidas) y la tensión inducida en el secundario y, por tanto, para el rendimiento de este transformador sin núcleo encontramos un valor de $(3.79 \pm 0.07) \%$. Si el valor fuera próximo al 100% indicaría que nos encontramos con un transformador ideal. Se puede apreciar como mejoran los rendimientos si insertamos un núcleo de hierro entre las bobinas, pasamos del 3.79 ± 0.07 (vacío), al 38.3 ± 0.5 (barra de hierro) y, por último, al 65.1 ± 1.2 (núcleo de hierro).

Los valores experimentales obtenidos al medir la intensidad de corriente en el primario fueron de 19.50 ± 0.20 mA en el caso de las dos bobinas en vacío, de 9.86 ± 0.13 mA en el caso de las dos bobinas unidas por el núcleo de hierro y de 2.57 ± 0.04 mA en el caso de dos bobinas con el núcleo de hierro, con lo cual, la intensidad que circula por el primario se reduce considerablemente al acercarnos al transformador ideal, como cabe esperar debido a la inducción mutua entre ambas bobinas.

Hemos visto que el núcleo de hierro incrementa el rendimiento entre dos bobinas magnéticamente acopladas debido a que sus propiedades magnéticas hacen que casi todo el flujo magnético que circula por el primario pase al secundario.

Sin embargo, en los transformadores reales hay pérdidas de flujo magnético, hay calentamientos debidos a las corrientes de Foucault (o parásitas). La pérdida de potencia debida a estas corrientes no suele ser deseada, por lo que se intentan reducir usando materiales de alta permeabilidad magnética y baja conductividad, como las ferritas. Sin embargo, una forma bastante eficaz y económica de disminuir estas pérdidas consiste en usar núcleos laminados, es decir, construidos con láminas ferromagnéticas apiladas y aisladas eléctricamente, una de la otra, mediante una delgada capa de barniz. Cuanto mayor sea el número de esas láminas mejor se logrará el objetivo de minimizar las corrientes de Foucault.

La disponibilidad de varias bobinas y de un generador de funciones y otros pequeños dispositivos existentes en un laboratorio de Física de Bachillerato o de Universidad per-

mite realizar un conjunto de experiencias sencillas para ilustrar el fenómeno de inducción electromagnética y, al mismo tiempo, promover la reflexión y el pensamiento crítico de los estudiantes sobre la ley de Faraday y sobre el concepto de transformador, tan utilizado en nuestra vida cotidiana.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por un convenio de colaboración con la Fundación de CajaSol.

Parte de este trabajo ha sido financiado por el Vicerrectorado de Tecnología e Innovación Educativa de la Universidad de Alicante (proyecto GITE-09006-UA).

Referencias

- [1] http://www.uclm.es/Preuniversitario/orientadores/pdf/materias/Fisica0910_docIII.pdf
- [2] BELÉNDEZ, A. *La unificación de luz, electricidad y magnetismo: la síntesis electromagnética de Maxwell*. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol 30, nº 2, art. 2601, 2008.
- [3] TIPLER, P. A. Y MOSCA, G., *Física para científicos e ingenieros*, 5ª Edición. Editorial Reverté. 2005.

José Manuel Villalba Montoya

Departamento de Física y Química. IES Herminio Almendros, Almansa, Albacete

Francisco Javier Manjón Herrera

Departamento de Física Aplicada, Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño, Universidad Politécnica de Valencia

Alberto Nájera López

Departamento de Ciencias Médicas, Facultad de Medicina, Universidad de Castilla-La Mancha, Albacete

Enrique Arribas Garde

Departamento de Física Aplicada, Escuela Superior de Ingeniería Informática, Universidad de Castilla-La Mancha, Albacete

Augusto Beléndez Vázquez

Instituto Universitario de Física Aplicada a las Ciencias y las Tecnologías Universidad de Alicante.

Real Sociedad Española de Física. Junta de Gobierno

PRESIDENTA

María del Rosario Heras Celemín

VICEPRESIDENTES

Antonio Ferrer Soria
José Adolfo de Azcárraga Feliu

SECRETARIA GENERAL

Carmen Pereña Fernández

TESORERO

Gustavo García Gómez-Tejedor

VOCALES

E. Arribas Garde,
A. Beléndez Vázquez,
J. Buceta Fernández,
C. Carreras Bejar,
F. Castejón Magaña,
J.C. Cobos Fernández,
G. De Valcárcel Gonzalvo,
G. Delgado Barrio,
A. Fernández-Rañada,
V. García Baonza,
A. Gil Gil,
I. Guerra Plasencia,
M.I. Hernández Hernández,
E. López Pérez,
B. Méndez Martín,
A. Moro-Martín,
J.A. Tagle González,
A. Tiemblo Ramos,
C. Untiedt Lecuona.

EDITOR GENERAL Y DIRECTOR DE LA REVISTA ESPAÑOLA DE FÍSICA

José Luis Sánchez Gómez

PRESIDENTE C.O.F.

Ramón Román Roldán

DIRECTORA "CIENCIA EN ACCIÓN"

Rosa M.^a Ros Ferré

DIRECTOR PROGRAMA ARFRISOL

Ignacio Guerra Plasencia

PRESIDENTES DE SECCIONES LOCALES

A. Beléndez Vázquez (*Alicante*)
A. Carrión Sanjuán (*Aragón*)
A. Alija Bayón (*Asturias*)
A. Ruiz Jimeno (*Cantabria*)
M.A. López de la Torre (*Castilla La-Mancha*)
J. A. García García (*Extremadura*)
M.I. Paz Andrade (*Galicia*)
M.^a Carmen Carrión Pérez (*Granada*)
T. Albaizar Buisán (*La Rioja*)
V. Madurga Pérez (*Navarra*)
C. Santamaría Salazar (*País Vasco*)
J. Martín Martín (*Salamanca*)
R. Márquez Delgado (*Sevilla*)
M.A. Sanchis Lozano (*Valencia*)
J. Carlos Cobos (*Valladolid*)

PRESIDENTES DE GRUPOS ESPECIALIZADOS

J.J. Garrido Segovia (*Adsorción*)
M.^a V. Fonseca González (*Altas Energías*)
J.M. Rodríguez Espinosa (*Astrofísica*)
E. Hernández Martín (*Atmósfera y Océanos*)
L. Bañares Morcillo (*Atómica y Molecular*)
M.^a V.^a Roux Arrieta (*Calorimetría y A.Térmico*)
L. Vázquez Martínez (*Ciencias de la Vida*)
L. Liz Marzán (*Coloides e Interfases*)
J. Güemez Ledesma (*Comunicación y Divulgación de la Física*)
F. Fraga López (*Cristalografía y Crecimiento Cristalino*)
M. Martín Sánchez (*Didáctica*)
J.M.^a Pastor Benavides (*Enseñanza de la Física*)
L. Viña Liste (*Estado Sólido*)
J.M. Rodríguez Parrondo (*Estadística y No Lineal*)
A. Cabello Quintero (*Información Cuántica*)
F. Langa de la Puente (*Nanociencia y Materiales Moleculares*)
P. López Sancho (*Mujeres en Física*)
J.M. Udías Moineiro (*Nuclear*)
J. San Román del Barrio (*Polímeros*)
C. Hidalgo Vera (*Física de Plasmas*)
P. A. Santamaría Ibarburu (*Reología*)
J. Amorós Arnau (*Termología*)
F. Cornet Sánchez del Águila (*Teórica*)
J. Luis Muñoz Gutiérrez (*Física-Médica*)

ADMINISTRACIÓN

Concepción Zocar e Itziar Serrano