

TEORIA DE LOS MAGNETOFOSFENOS

por MÁXIMO VALENTINUZZI (*), Buenos Aires (Argentina)

Tiu ĉi verko estas bazita en la eksperimentaj esploroj komencitaj de D'Arsonval (1896), Beer (1902), k. c., kaj perfektigitaj de Barlow, Kohn kaj Walsh (1947), celante biofizikan kaj matematikan interpretadon de la magnetofosfenoj.

La uzado de la fizikaj propecoj rezumitaj en unu el la ekvacioj de Maxwell kaj la aplikado de la teorio de la elektrofiziologia ekscito kreita de Blair permesas trovi unu sistemon de du ekvacioj kun iuj kontur-kondicoj, de kiuj derivas funkcio kiu komprenigas kelkajn eksperimentajn faktojn.

La agado de la magnetofosfenoj kiam la eksperimentata subjekto movas la kapon aŭ la okulojn, dum la magneta kampo uzata kiel stimulo restas konstanta aŭ sangas, estas interpretebla pere de la vektoraj ekvacioj de la movebla cirkvito.

La aplikado de nombroj en la travitaj formuloj en la analizo de tiu ĉi verko, firmigos, sangigos aŭ anstataŭos la jam proponitaj hipotezoj.

La interpretado de la elektrofosfenoj povas konsistigi korolarion de la kompreno de la mekanismo kaŭzanta de la magnetofosfenoj.

§. 1. *Introducción*

Vamos a ocuparnos de una cuestión que pertenece al dominio de la biofísica. Primeramente daremos una descripción abreviada de los hechos experimentales y, luego, ensayaremos una interpretación de los mismos.

(*) En varios pasajes de este trabajo (cálculo de la suma de cosenos, planteamiento de las condiciones de contorno, etc.) ha colaborado M. EUGENIO VALENTINUZZI, quien también ha realizado los dibujos (figs. 1, 6, 7, 9), juntamente con A. S. Frumento (figs. 3, 4, 5).

Savigny definió, en 1838, como *fosfeno* (de φως, luz; φαίνειν, brillar) toda sensación luminosa que se provoca por compresión de un punto del globo ocular (Garnier y Delamare, 1923). Cabe ampliar el significado de este término haciéndole abarcar también las sensaciones luminosas obtenidas por otros estímulos. Diremos, pues, que *se entiende por fosfeno toda sensación visual luminosa desencadenada por estímulos diferentes a la luz*. Así, pues, un golpe sobre el ojo, la presión de éste y la aplicación de una corriente eléctrica en el globo ocular o cerca del mismo generan fosfenos. Este comportamiento del órgano de la visión corresponde al hecho general conocido en psicofisiología como *ley de especificidad* de los órganos sensoriales. Sin que el estímulo sea específico el órgano sensorial siempre responde específicamente, es decir, con sensaciones propias. Dentro de este orden de hechos, el oído da sensación de sonido aunque no lo exciten las ondas acústicas y la lengua acusa sensaciones gustativas cuando se la somete a la acción de la electricidad. Los fosfenos se encuentran comprendidos dentro de un tipo más general de fenómenos, los *fenómenos entópticos* (sensaciones luminosas nacidas en la retina) (de έντος, dentro; ὤψ, ὀπτος, ojo) (Garnier y Delamare, 1923).

La aplicación de un campo magnético en ciertas condiciones experimentales también determina fosfenos. Los llamaremos *magnetofosfenos*.

§ 2. Obtención de los magnetofosfenos

Según Beer (1902), L. Hermann se ocupó, en 1888, de los magnetofosfenos y llegó a la conclusión de que no se lograba tal hecho magnetofisiológico.

Ante la *Sociedad de Biología de París* consignó D'Arsonval (1896) que si un sujeto coloca la cabeza en un campo magnético (por ejemplo, un campo producido mediante una bobina a la cual se le aplica una tensión de 110 voltios y una corriente de 30 amperios y 42 ciclos por segundo) percibe fosfenos y se siente afectado por un vértigo que puede llegar al síncope.

Los magnetofosfenos pueden ser obtenidos por aplicación de campos magnéticos alternativos o campos magnéticos de un solo sentido.

a.) *Campos magnéticos alternativos*. Guilleminot (1922) se refiere así a esta clase de fenómenos: "Si l'on regarde une source lumineuse assez puissante et que l'on passe la tête à travers un champ magnétique oscillant, on perçoit une vibration spéciale dans le champ visuel (Frankenhauser, Berthold Beer)".

Un ingeniero electrotécnico, E. K. Müller, realizó experiencias en este sentido, las cuales fueron verificadas por Beer (1902). Para las mismas se valía de un electroimán potente que generaba un campo magnético oscilante. Al aproximar al electroimán los ojos abiertos o la región ocular, se percibía

un fenómeno luminoso subjetivo consistente en un centelleo; logr base un reforzamiento de éste moviendo los ojos o la cabeza. Con una corriente eléctrica de 15 amperios en el devanado y puesta la región de los ojos a una distancia de 2 centímetros del electroimán, aparecía, según dice Müller, un fulgor oscilante en el campo visual como cuando se ilumina una superficie con una luz que varía periódicamente. En los bordes netos del campo visual se observaba grupos de ondas titilantes que se intensificaban al mover los ojos y eran más evidentes en el contorno de los objetos próximos a éstos, de tal manera que se tenía como un efecto de difracción incolora. Con 30 amperios y mayor proximidad al electroimán los fosfenos acusaban un reforzamiento. Dice Müller que, en la obscuridad y con los ojos cerrados, también ha percibido a veces efectos parecidos.

Thompson, en 1910, independientemente, comprob  la producción de fosfenos por campos magnéticos de 1.000 gaus y 50 ciclos por segundo. Los caracteriza como una luminosidad incolora oscilante, más brillante en la periferia del campo visual. Knight Dunlap, de la Universidad Johns Hopkins, confirmó, en 1911, estos hechos (Magnuson y Stevens, 1911-1912; Barlow, Kohn y Walsh, 1947).

Magnuson y Stevens (1911-1912) estudiaron sistemática y detalladamente este fenómeno magnetofisiol gico. Estos investigadores empleaban una bobina con un devanado de 205 vueltas, de manera tal que, aplicando 28 amperios (corriente de 60 ciclos por segundo), con 5740 amperios-vueltas disponían de campos cuyo valor era aproximadamente la intensidad de campo utilizada por Thompson.

La bobina era suficientemente amplia y estaba situada sobre la cabeza del individuo sentado en una silla, así que, al descenderla, la cabeza quedaba introducida en la misma. El máximo efecto se obtenía cuando el plano horizontal correspondiente al punto medio de la bobina estaba a la altura del borde superior de los ojos; si el plano de la base inferior de la bobina correspondía al bregma o a los hombros se anulaban los fosfenos. La intensidad de éstos variaba al desplazar la cabeza o al inclinar la bobina.

Las sesiones duraban de 10 a 15 minutos.

Los fosfenos eran percibidos en la obscuridad en caso de aplicar campos magnéticos débiles, pero, si la intensidad del campo era alta, los fosfenos resultaban evidentes a plena luz y con los ojos abiertos.

Estos autores han empleado campos de 2.340, 3.744, 3.651, etc., amperios-vueltas.

La intensidad de estos fosfenos depende estrechamente de la frecuencia de la corriente alternativa: *la máxima intensidad se produce entre 20 y 30 ciclos por segundo*. Se nota que las variaciones de la intensidad del fosfeno presentan la frecuencia de la corriente eléctrica que alimenta al electroimán, pudiéndose contarlas cuando no se supera los 20 ciclos por segundo, pues, para frecuencias superiores, la sensación se compone de una confusa mezcla de efectos luminosos ondulantes.

Se observa que el efecto es siempre más intenso en las regiones temporales de la retina, lo que se explicaría por la mayor sensibilidad de dicha membrana en esas zonas ya señalada por Sch n en 1876 y 1878.

Durante las pruebas suelen producirse contracciones musculares, por ejemplo, de los párpados. Es conveniente evitar la aplicación de campos muy intensos (superiores a 14.000 amperios-vueltas), en razón de posibles acciones contraproducentes.

Barlow, Kohn y Walsh (1947) retomaron el estudio de esta cuestión. Aplicaban campos magnéticos alternativos de frecuencia variable y comparaban las propiedades de las sensaciones así producidas con las sensaciones obtenidas por el pasaje de corrientes eléctricas sinusoidales a través de la cabeza (*electrofosfenos*). Los polos del electroimán estaban situados a la altura de las sienes.

También estos autores han verificado que los magnetofosfenos se perciben aun con los ojos abiertos, salvo en caso de que la iluminación sea intensa, y que su intensidad depende de la magnitud del estímulo. El efecto luminoso abarca, según estos investigadores, una gran parte del campo visual, acusando un desplazamiento desde la periferia hacia la parte central del mismo.

Barlow y sus colaboradores han analizado asimismo el comportamiento experimental de la duración del fosfeno respecto a la frecuencia y a la intensidad del campo magnético: *la persistencia del efecto es mayor a bajas frecuencias y se prolonga al intensificarse el estímulo*. En la fig. 8 se tiene una gráfica en que se compara la duración de los magnetofosfenos y los electrofosfenos respecto a la intensidad del estímulo, habiendo sido la frecuencia de 30 ciclos por segundo en ambas experiencias.

b) *Campos magnéticos de un solo sentido*. Magnuson y Stevens (1911-1912) también han efectuado experiencias aplicando campos de un solo sentido, es decir, haciendo corriente continua por el devanado. Han empleado intensidades de 9.360, 10.296, 11.934, 19.188, 21.060, 21.464, etc. amperios-vueltas. Con el polo norte de la bobina hacia arriba o hacia abajo han logrado los mismos resultados: *los fosfenos aparecen cuando se cierra o se abre el circuito, más intensos en el cierre que en la apertura, se debilitan por la fatiga del individuo y se caracterizan por un resplandor ondulante que se desplaza en el campo visual*.

La intensidad del fosfeno no depende únicamente del campo \vec{H} , sino también de su variación respecto al tiempo, es decir, de la derivada $d\vec{H}/dt$.

Estos autores han determinado el umbral de los magnetofosfenos. Para la corriente alternativa de 60 ciclos por segundo el umbral está entre 3.000 y 4.000 amperios vueltas. Se sobreentiende que estos valores son válidos para el individuo que no está ópticamente fatigado por las pruebas.

§ 3: *Explicación de los magnetofosfenos*

Para lograr una explicación, si no definitiva, por lo menos provisoria, de la producción de los magnetofosfenos, es menester separar dos cuestiones: a) ¿En qué parte del aparato de la

visión actúa el campo magnético?; b) ¿Cuál es el mecanismo biofísico de la génesis de los fosfenos?

a) *¿Obra el campo magnético sobre la retina o sobre el nervio óptico?* Parece que no es en el nervio óptico (Beer, 1902), sino en la retina (Barlow y col., 1947) donde se debe buscar el proceso generativo del fosfeno. En efecto, se conoce varios detalles experimentales que imponen esta idea: la compresión del globo ocular lo insensibiliza tanto a los estímulos luminosos como a los estímulos eléctricos y magnéticos, así que cabe pensar que el tejido estimulable está dentro del mismo globo ocular; no hay fosfenos si la estimulación se aplica en la región occipital (*), aunque sea intensa; si los polos magnéticos están situados a ambos lados de la cabeza, el fosfeno se manifiesta en la parte mediana del campo visual y, si los polos actúan hacia la parte inferior de la cabeza, el efecto aparece en la parte alta del campo visual, o sea, *siempre el fenómeno entóptico se ubica en el cuadrante opuesto al cuadrante estimulado.*

b) *Berthold Beer (1902) ha sugerido que se busque la explicación del mecanismo íntimo de la generación de estos fosfenos en las propiedades diamagnéticas de los tejidos orgánicos.* Ya Faraday y Kohlrausch se ocuparon de las propiedades magnéticas del cuerpo humano y sus tejidos y líquidos. Beer inclinábase a admitir que ciertas partes anatómicas del globo ocular o quizás la sangre presente en el mismo, en virtud de su diamagnetismo, entran en estado vibratorio al recibir la influencia del campo magnético.

Opinamos que estos conceptos de Beer son imprecisos y tal como están enunciados no sirven para abordar una interpretación de los magnetofosfenos.

A nuestro juicio el mecanismo biofísico de los magnetofosfenos debe ser investigado teniendo en cuenta este hecho elemental del electromagnetismo: *todo conductor es asiento de una corriente eléctrica cuando es cortado por líneas de fuerza magnética o él mismo corta a dichas líneas o se halla sometido a la acción de variaciones de un campo magnético.* Los tejidos vivos son conductores de segunda especie a causa de su predominante naturaleza electrolítica, de modo que cabe sentar la hipótesis de trabajo de que *los tejidos vivos (en nuestro caso particular, la retina) son estimulables por los campos magnéticos en virtud de las corrientes eléctricas creadas por éstos en aquéllos.*

Parece, por consiguiente, que puede ser útil conocer las condiciones experimentales de desarrollo de los fosfenos producidos por corrientes eléctricas, o sea, de los *electrofosfenos*. Estos fueron estudiados por L. J. Pollock y L. L.

(*) Probablemente estos autores han estimulado esta región con el propósito de excitar las zonas de la corteza cerebral correspondientes a la visión.

Mayer y los resultados de sus experiencias se encuentran expuestos en un trabajo del año 1938.

La corriente eléctrica continua y la corriente eléctrica alternativa (farádica y sinusoidal), cuando se aplican sobre un ojo o cerca del mismo, determinan efectos luminosos subjetivos, es decir, determinan electrofosfenos.

Los dos autores que acabamos de mencionar ponían un electrodo en la región dorsal del individuo y otro en el párpado inferior o sobre el borde de la órbita.

Los electrofosfenos se producen al cerrar o al abrir el circuito cuando se trata de corriente continua; y, en caso de usar corriente alternativa, la frecuencia crítica está entre 60 y 170 ciclos por segundo. Alrededor de los 25 ciclos por segundo (corriente alternada) o con 50 estímulos por segundo (corriente continua) y una intensidad de 0.1 miliamperio, el sujeto en experiencia percibe una luminosidad oscilante que dura de 20 a 40 segundos; con frecuencia de 55 a 70 ciclos por segundo o con 110 a 140 estímulos por segundo dicho efecto visual aparece en el cierre y dura, a lo más, un segundo. La obtención de fosfenos liminares requiere un incremento progresivo de la intensidad de la corriente eléctrica cuando se aumenta la frecuencia de la misma, es decir, *el umbral del fosfeno crece con la frecuencia*. El crecimiento de la frecuencia también acorta la duración del electrofosfeno.

Como se ve, hay una esencial identidad entre magnetofosfenos y electrofosfenos, de modo que es plausible la explicación de los primeros mediante las corrientes eléctricas tisulares magnéticamente producidas.

Pollock y Mayer (1938) admiten que la corriente eléctrica obra sobre el nervio o las neuronas retinianas, pero no sobre el epitelio retiniano, opinión ésta que no compartimos.

§ 4. *Circuito electromagnético fundamental*

Tomaremos por base de esta teoría un circuito bien conocido por los físicos (Chwolson, 1908; Pohl, 1932; Perucca, 1943; Skilling, 1952). Separaremos dos casos: el de circuito fijo y campo magnético variable; y el de circuito móvil y campo magnético constante.

a) *Circuito fijo en un campo magnético variable*. Sea una espira de alambre (fig. 1) conectada a un instrumento capaz de registrar corriente eléctrica o fuerzas electromotrices. Si la espira se halla en un campo magnético, el aparato registrador indica el pasaje de cargas eléctricas (corriente eléctrica; galvanómetro balístico) o la generación de una diferencia de potencial (electrómetro) cada vez que la intensidad del campo magnético aumenta o disminuye. Este hecho experimental se tra-

duce en la *ley de Faraday* cuya expresión matemática es

$$\oint \vec{E} \cdot ds = - \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad [1].$$

Esta ecuación nos da directamente la fuerza electromotriz generada en la espira por la variación de flujo. Para un análisis más detallado de esta cuestión remitimos a los autores ci-

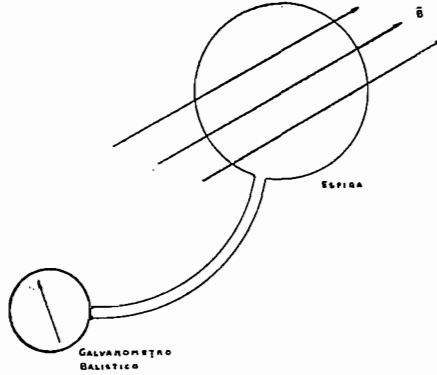


FIG. 1 - Circuito electromagnético fundamental (Skilling, 1952).

tados. De la ecuación [1], por aplicación del teorema de Stokes, se tiene

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad [2].$$

Esta es una de las ecuaciones de Maxwell (Chwolson, 1908; Jäger, 1927; Pohl, 1932; Stoner, 1934; Houston, 1948; Perucca, 1943; Skilling, 1952) escrita, usando la relación $\vec{B} = \mu \vec{H}$, para el espacio ocupado por materia. En los tejidos orgánicos consideramos habitualmente, inspirándonos en las normas de la magnetoquímica (Stoner, 1934; Bhatnagar y Mathur, 1935; Selwood, 1943), la susceptibilidad magnética κ , de la cual se deduce la susceptibilidad específica χ . Si se introduce κ en la ecuación [2] (Jäger, 1927; Perucca, 1943), el segundo miem-

bro se desdobra en dos términos, uno de los cuales se refiere al campo magnético en el vacío y el otro expresa la influencia de la magnetización de la materia (de la materia orgánica en nuestro caso).

b) *Circuito móvil en un campo magnético constante.* Si el campo magnético es constante y la espira representada en la fig. 1 se desplaza en el mismo, hay variación de flujo a través de la superficie cuyo borde es dicha espira conductora y, en consecuencia, el aparato registrador acusará el pasaje de una corriente eléctrica o la existencia de una diferencia de potencial. Tendremos, pues, un campo eléctrico inducido en la espira igual a

$$\vec{E} = (\vec{v} \times \vec{B}) \quad [3]$$

(\vec{v} es la velocidad de movimiento de la espira, que se considera de longitud unitaria).

Naturalmente que se puede escribir una ecuación general la cual abarque ambos casos simultáneamente, el de campo variable con el tiempo y el de circuito móvil. Se tiene, entonces,

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \nabla \times (\vec{v} \times \vec{B}) \quad [4].$$

§ 5. Estructura de la retina

Por cuanto hemos de buscar la representación histofisiológica del circuito esquematizado en la fig. 1, estimamos necesario referirnos rápidamente a la estructura de la retina (Szymonowicz, 1924; Kahn, 1931; Stuhlman, 1943).

La retina está constituida por la expansión de las fibras del nervio óptico. Comprende diez capas (fig. 2). La energía radiante penetra a través de ellas hasta alcanzar los conos y los bastoncitos (elementos optorreceptores), que están unidos en la parte externa por el epitelio pigmentario adyacente a la coroides. *La penúltima capa es, por consiguiente, la capa optorreceptora.* Desde el punto de vista biofísico presentan principal interés las células visuales y el epitelio pigmentario (penúltima y última capas). Estas dos capas de la retina son las que intervienen en la recepción y la absorción de la energía luminosa, de la cual depende el desencadenamiento de los impulsos ner-

viosos que recorren luego las fibras ópticas hasta alcanzar la corteza de la región occipital del cerebro.

Los conos predominan en la mácula lútea y en su vecindad, participan en la visión de los detalles y su umbral de excitación es mayor que el de los

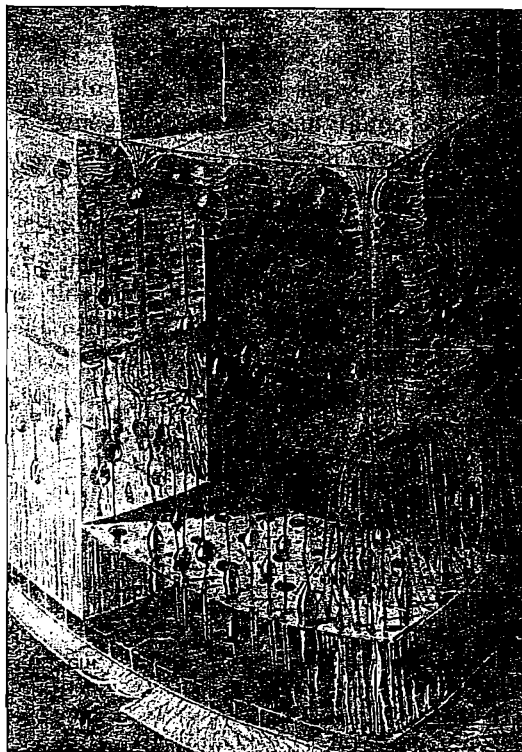


FIG. 2—Estructura de la retina (a fuerte aumento, semiesquemática). De arriba hacia abajo: Gl.; cuerpo vítreo, situado delante de la retina; J. Gr., membrana limitante interna, que separa la retina del cuerpo vítreo; Nf., fibras del nervio óptico; Nz., células nerviosas, en las cuales terminan las fibras ópticas; Sch., células intermedias que vinculan las células nerviosas ópticas con las células visuales; Stü., células de sosten (células de la glia), las cuales ensamblan todo el tejido retiniano; Ho., células horizontales, cuya red nerviosa horizontalmente dispuesta correlaciona los elementos retinianos vecinos; Ä. Gr., membrana limitante externa, en cuyos orificios se encuentran las células visuales; Z., células visuales en forma de conos (*conos*); Stä., células visuales en forma de bastones (*bastoncitos*); Pg., células pigmentarias de la pared posterior de la retina, las cuales mediante sus columnas plasmáticas llevan hacia adentro de la retina gránulos de pigmento para proteger las células visuales; Gl. M., membrana vítreo situada entre la capa pigmentaria y Ad., la coroides (*Richtung der Lichtstrahlen*: dirección de los rayos luminosos) (Kahn, 1931).

bastoncitos. Los bastoncitos privan en las regiones de la retina alejadas de la mácula lútea.

Los conos y los bastoncitos, histogenéticamente idénticos, no son células nerviosas, sino células epiteliales sensorialmente especializadas.

§ 6. *Sistema retiniano de circuitos fundamentales*

Conforme a las nociones sobre estructura de la retina, tenemos el hecho de que, vista ésta perpendicularmente a su superficie, se presenta como un mosaico de conos y bastoncitos. *Suponemos que, en torno de cada uno de estos elementos optorreceptores, se constituye un circuito microscópico similar al de la espira de la fig. 1.* El aparato registrador del experimento físico (galvanómetro o electrómetro) se halla substituido aquí por el mismo cono o bastoncito que es excitable por la fuerza electromotriz generada en el circuito. Con el fin de recubrir totalmente el área de la retina admitimos que los circuitos son poligonales (por ejemplo, exagonales) (fig. 3). Desde el punto

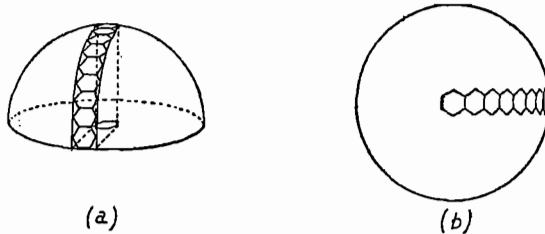


FIG. 3.—Sistema retiniano de circuitos exagonales: (a) esquema espacial y (b) proyección sobre el plano ecuatorial.

de vista biofísico necesitamos pensarlos como eléctricamente independientes unos de otros, pues cada uno excita a un solo elemento optorreceptor. Todos los circuitos son del mismo tamaño y, por consiguiente, cada uno comprende la misma área. Ahora bien, el flujo magnético que concatena cada circuito depende de su orientación respecto a la dirección del campo magnético. De ese problema nos ocupamos a continuación.

§ 7. *Orientación y proyección de los circuitos retinianos*

Apoyándonos en las experiencias efectuadas por algunos investigadores (D'Arsonval, 1896; Barlow, Kohn y Walsh, 1947),

podemos considerar dos casos de orientación: el primero, en el cual el campo magnético se aplica horizontalmente a través de las sienes (fig. 4, a); y el segundo, en el cual el campo está verticalmente dirigido (fig. 4, b), respecto, siempre, al sujeto de pie o sentado. El análisis que haremos del primer caso sirve, *mutatis mutandi*, para el segundo.

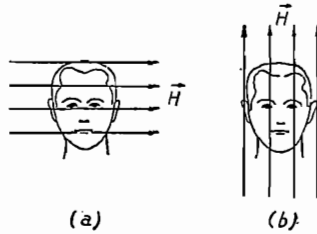


FIG. 4 - Dirección del campo magnético aplicado al sujeto en experiencia: (a) aplicación horizontal y (b) aplicación vertical del campo magnético.

Consideremos una sección horizontal del aparato de la visión, cuyo esquema damos en la fig. 5, y ocupémonos de un solo globo ocular. A éste lo aceptamos como esférico y como totalmente recubierto por la retina en su parte interior, lo que no concuerda, empero, con los hechos anatómicos, pues el ojo no es esférico y dicha túnica no pasa del cuerpo ciliar. Sin embargo, estas aproximaciones facilitarán el procedimiento matemático sin introducir errores de importancia.

En el casquete esférico ABC (fig. 5) se tiene un cierto nú-

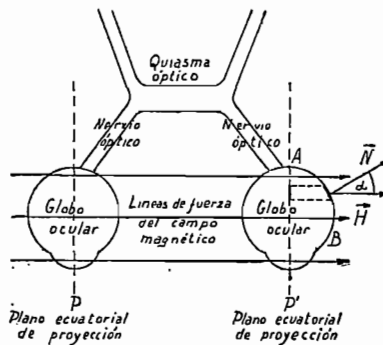


FIG. 5 - Esquema de una sección horizontal del aparato de la visión (corresponde a la fig. 4, a).

mero de circuitos exagonales distintamente orientados respecto al campo magnético \vec{B} . Si los proyectamos sobre el plano ecuatorial P' tendremos un mosaico cuyos componentes presentan un área que es función de la orientación, o sea, si S expresa el área constante de cada circuito, su proyección da, para cada uno,

$$S_n = S \cos \alpha_n \quad [1].$$

El flujo elemental será

$$\phi_n = \vec{B} S \cos \alpha_n \quad [2].$$

De acuerdo con la fórmula [1] del § 4, a, la fuerza electromotriz elemental es

$$\vec{f}_n = \oint \vec{E}_n \cdot ds = - \frac{\partial \phi_n}{\partial t} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} S \cos \alpha_n \quad [3].$$

Esta es la fuerza electromotriz de la cual depende la excitación del optorreceptor (cono o bastoncito).

Todos los circuitos que están contenidos en la franja esférica AB (fig. 3 y fig. 5) integran una fuerza electromotriz

$$\vec{f} = - \left(\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} S \cos \alpha_1 + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} S \cos \alpha_2 + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} S \cos \alpha_3 + \dots + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} S \cos \alpha_l \right) \quad [4].$$

La derivada $\partial \vec{B} / \partial t$ no depende de α ; y S es constante, así que podemos escribir

$$\vec{f} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} S \sum_{n=1}^{n=l} \cos \alpha_n \quad [5].$$

Si se computa todo el casquete esférico correspondiente a

ABC (fig. 5), para lo cual basta multiplicar la expresión [5] por 2π , se tiene la fuerza electromotriz \vec{F}' generada en un hemiglobo ocular, es decir,

$$\vec{F}' = -2\pi \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} S \sum_{n=1}^{n=l} \cos \alpha_n \quad [6].$$

En todo el globo ocular se produce la fuerza electromotriz

$$\vec{F} = -4\pi \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} S \sum_{n=1}^{n=l} \cos \alpha_n \quad [7].$$

Para que \vec{F} resulte en voltios, hay que multiplicar el segundo miembro por 10^{-8} si \vec{B} y S están dados en unidades C. G. S.

Se trata ahora de hallar la suma $\sum \cos \alpha_n$.

§ 8. Cálculo de la suma de cosenos

Dos cosas debemos hacer aquí: una es la de determinar el valor del límite superior l de la misma y, otra, es la de averiguar la ley de variación del argumento α .

a) Para determinar l , que traduce, como ya sabemos, el número de circuitos existentes en la franja esférica AB (fig. 3), procedemos de la siguiente manera:

1) *Calculamos el área interior del globo ocular.* Se sabe que éste es una esfera irregular, en la cual, esquemáticamente (Stuhlman, 1943), cabe considerar tres diámetros: uno, anteroposterior, de 24,15 mm.; otro, transversal, de 24,13 mm.; y un tercer diámetro, vertical, de 23,48 mm. El promedio de los tres diámetros nos da, aproximadamente, 24 mm. = 2,4 cm. Consideramos que el globo ocular es una esfera perfecta de radio $R = 1,2$ cm. Por lo tanto, el área que buscamos es

$$A = 4\pi R^2 = 4 \times 3, 1416 \times (1,2)^2 \text{ cm}^2 \approx 18 \text{ cm}^2 \quad [1].$$

2) *Calculamos el área del circuito elemental.* Según Stuhlman (1943) hay 130 millones de bastoncitos y 7 millones de conos, es decir, el número de optorreceptores es

$$L = 130 \times 10^6 + 7 \times 10^6 = 137 \times 10^6 \quad [2].$$

Hemos atribuido a cada optorreceptor un circuito, de modo que

$$S = \frac{A}{L} = \frac{18 \text{ cm}^2}{137 \times 10^3} = \frac{18}{137} \times 10^{-3} \text{ cm}^2 = 13,13 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \quad [3].$$

3) *Calculamos el diámetro del circuito elemental.* Del valor [3], estimando como circular el circuito, sale su radio

$$r = \sqrt{S/\pi} = \sqrt{\frac{13,13 \times 10^{-3}}{3,1416}} \text{ cm.} = 2 \times 10^{-4} \text{ cm.} \quad [4].$$

El diámetro buscado es, pues,

$$d = 4 \times 10^{-4} \text{ cm.} \quad [5].$$

4) *Calculamos la longitud del meridiano del ojo.* Con el valor del radio R usado en 1) obtenemos

$$C = 2 \pi R = 2 \times 3,1416 \times 1,2 \text{ cm.} \cong 7,54 \text{ cm.} \quad [6].$$

5) *Calculamos el número de circuitos fundamentales que hay en un cuarto de meridiano del globo ocular.* Del valor [6] sacamos el cuarto de meridiano

$$C' = C/4 = (7,54/4) \text{ cm.} = 1,885 \text{ cm.} \quad [7].$$

Con el valor [5] del diámetro del circuito y el que acabamos de hallar se tiene

$$l = \frac{C'}{d} = \frac{1,885 \text{ cm.}}{4 \times 10^{-4} \text{ cm.}} = \frac{1,885}{4} \times 10^4 = 4712 \quad [8].$$

Por cuanto trátase de apreciaciones numéricas aproximadas, es legítimo aceptar el valor

$$l = 5.000. \quad [9].$$

b) Ahora necesitamos conocer los cos α_n ; para ello bastará determinar la ley de variación del argumento α . Si en el cuarto de meridiano existen l circuitos, éste es el número de valores que la dirección de la normal de sus áreas fundamentales adquiere entre 0 y $\pi/2$. A cada circuito elemental corresponde un ángulo también fundamental (fig. 6)

$$\bar{\alpha} = \frac{\pi/2}{l} = \frac{3,1416}{10.000} \text{ radián} \cong 0,0003 \text{ radián} \quad [10].$$

Los argumentos son, por consiguiente,

$$\alpha_1 = 0; \alpha_2 = \bar{\alpha}; \alpha_3 = 2\bar{\alpha}; \alpha_4 = 3\bar{\alpha}; \dots \alpha_{5000} = 5000\bar{\alpha} \quad [11].$$

Se trata, en consecuencia, de encontrar la suma

$$1 + \cos \bar{\alpha} + \cos 2\bar{\alpha} + \cos 3\bar{\alpha} + \dots + \cos 5000\bar{\alpha} = 1 + \sum_{n=2}^{n=5000} \cos n\bar{\alpha} \quad [12].$$

Puesto que el valor de la sumatoria es muy grande comparado con la unidad, ésta puede ser despreciada.

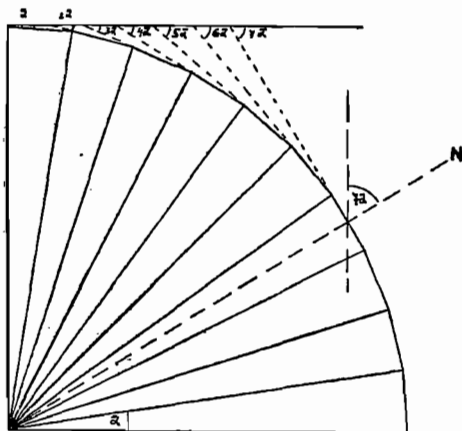


Fig. 6 - Ley de variación de α . Por ser el ángulo fundamental $\bar{\alpha}$ suficientemente pequeño, se toma la normal N coincidente con el radio r . Nótese que, para esta construcción ilustrativa, se ha tomado diez divisiones. Prácticamente, para 5000 divisiones, resultará una variación del ángulo α de 0 a $\pi/2$.

El cálculo numérico aproximado de [12] nos da

$$\sum_{n=2}^{n=5000} \cos n\bar{\alpha} = 3.206,41 \quad [13].$$

El valor [13] ha sido obtenido en la siguiente forma: la sucesión de valores de cosenos, con α variando por centésimos de radián, ha sido dividida en intervalos iguales suficientemente pequeños como para que se pueda admitir en cada uno de ellos el crecimiento lineal de la función trigonométrica y promediar así su valor dentro de cada uno de dichos intervalos.

Podría ser interesante abordar el cálculo de esta suma en base a la teoría de las series de Fourier. En tal caso las condiciones que habría que introducir en los desarrollos serían $a_0 = 1$, $a_n = 1$, $b_n = 0$.

§ 9. *Valor de la fuerza electromotriz generada en el globo ocular*

Si aplicamos los valores numéricos [3] y [13] del párrafo precedente en la fórmula [7] del § 7 resulta

$$F = -10^{-8} \cdot 4 \pi S \frac{\partial B}{\partial t} \sum_{n=1}^{n=5900} \cos \alpha_n [\text{voltios}] = -G \frac{\partial B}{\partial t} \quad [1].$$

Ponemos

$$G = 10^{-8} \cdot 4 \pi S \sum_{n=1}^{n=5900} \cos \alpha_n = 53 \times 10^{-12} [\text{cm}^2] \quad [2].$$

La [1] resulta expresada en voltios dando B en gauss, S en cm^2 y t en seg.

§ 10. *Mecanismo de excitación*

Nos valdremos de una de las teorías sencillas de la excitación tisular, la *teoría de Blair* (Rashevsky, 1948), para interpretar el proceso de estimulación de los conos y los bastoncitos.

El estado de excitación, que se expresa por ε , resulta traducido, en la teoría de Blair, por la siguiente función:

$$\varepsilon = e^{-kt} \left\{ \varepsilon_0 + K \int_0^t F(t) e^{kt} dt \right\} \quad [1]$$

[k, K son constantes características del tejido u órgano que se excita, en nuestro caso, de los optorreceptores (conos y bastoncitos) (§ 5); $F(t)$ es la fuerza electromotriz que provoca la excitación, escrita por nosotros en lugar de la tensión $V(t)$, como aparece originalmente en dicha teoría].

Para penetrar en el significado de ε habría que recurrir al conocimiento de los procesos fotoquímicos de la retina.

Si el campo magnético aplicado se comporta como una función

$$\vec{B} = B_n e^{i\omega t} \quad [2]$$

y de ella tomamos la parte real

$$B = B_n \cos \omega t \quad [3]$$

en la cual B_n es el máximo valor del mismo, la fuerza electromotriz que obra en toda la retina de un globo ocular resulta, de acuerdo con las fórmulas [1] y [2] del § 9,

$$F(t) = -G \frac{\partial B}{\partial t} = G B_n \omega \sin \omega t \quad [4].$$

Sustituyendo esta expresión [4] en la [1] de este párrafo, resulta:

$$\varepsilon = e^{-kt} \left\{ \varepsilon_0 + K G B_n \omega \int_0^t e^{kt} \sin \omega t \right\} \quad [5].$$

Realizada la integración (Rashevsky, 1948), se tiene, finalmente,

$$\varepsilon = \frac{K G B_n \omega}{k^2 + \omega^2} (k \sin \omega t - \omega \cos \omega t) \quad [6].$$

Imaginemos experiencias de excitación magnética en que aplicamos campos $B_1, B_2, B_3, \dots, B_n, \dots$, siempre durante el mismo tiempo t_0 . En tal caso tendremos estados de excitación retiniana $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \dots, \varepsilon_n, \dots$ dados por la expresión

$$\varepsilon_n = \frac{K G B_n \omega}{k^2 + \omega^2} (k \sin \omega t_0 - \omega \cos \omega t_0) \quad [7].$$

Para abreviar la escritura pongamos

$$Q = \frac{K G \omega}{k^2 + \omega^2} (k \sin \omega t_0 - \omega \cos \omega t_0) \quad [8]$$

(que es una constante por ser K, G, ω, k, t_0 también constantes), de modo que

$$\varepsilon_n = Q B_n \quad [9].$$

Esta fórmula significa que, aplicado el campo B_n durante el tiempo t_0 , se tiene determinado el correspondiente estado de excitación ε_n . El proceso de excitación, que denominamos *etapa de generación del magnetofosfeno*, el cual abarca el intervalo $(0, t_0)$, sigue la ley

$$\varepsilon = \varepsilon_n(1 - e^{-\gamma\tau}) \quad [10].$$

La intersección de las tangentes a estas curvas en el origen con las rectas ε_n determinan una abscisa que es $1/\gamma$ (fig. 7).

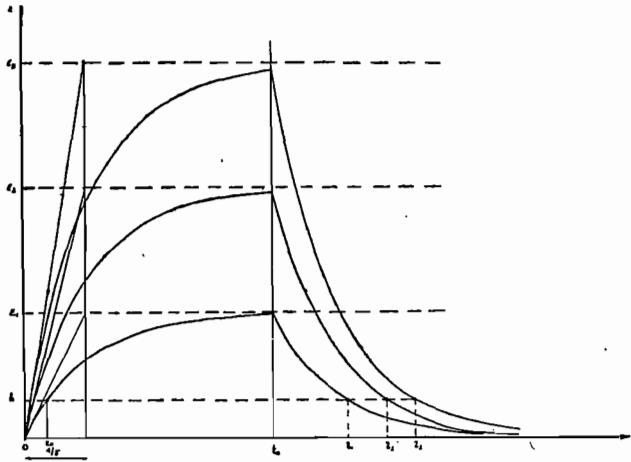


FIG. 7 - Generación y amortiguamiento de los magnetofosfenos. El magnetofosfeno desaparece cuando ε adquiere el valor del umbral h . La persistencia progresivamente amortiguada del magnetofosfeno se cuenta a partir del instante t_0 en que el campo B_n deja de actuar sobre la retina.

De la fórmula [9] sale

$$B_n = \frac{1}{Q} \varepsilon_n \quad [11].$$

Designemos por τ el tiempo que sigue al instante en que se logra el estado ε_n y se suprime la aplicación del campo magnético B_n . El magnetofosfeno tiene la propiedad de persistir durante un cierto tiempo después que ha cesado la estimulación (Barlow, Kohn y Walsh, 1947). El parámetro τ mide el tiem-

po de persistencia del magnetofosfeno. Ahora bien, dicha persistencia acusa un proceso de amortiguamiento el cual responde a la ley exponencial

$$\varepsilon = \varepsilon_n e^{-\gamma \tau} \quad [12]$$

que vale en el intervalo (t_0, ∞) . A este proceso lo llamamos *etapa de persistencia del magnetofosfeno*. Es fácil justificar esta ley planteando la cuestión en términos de una ecuación diferencial, en análoga forma a como se procede cuando se trata de ciertas reacciones químicas, de procesos de desintegración radioactiva, etc.

Para el punto $t = t_0$ tenemos una primera condición de contorno. Yendo de izquierda a derecha (fig. 7) se cumple la ecuación [10], pero yendo de derecha a izquierda es

$$B_n = 0 \quad [13],$$

o sea, la retina no está ya sometida a la acción del campo magnético.

El magnetofosfeno se establece cuando $\varepsilon_n = h$, siendo h el umbral de excitación.

El amortiguamiento finaliza y el magnetofosfeno se anula cuando el estado de excitación ε es igual al valor del umbral h de excitación, vale decir, cuando

$$\varepsilon = h = \varepsilon_n e^{-\gamma \tau_n} \quad [14],$$

teniéndose así otra condición de contorno, a saber,

$$t = \tau_n \quad [15],$$

El comportamiento del sistema retiniano en estas experiencias de excitación magnética podría ser analizado mediante el método de la analogía con circuitos eléctricos. Para la etapa de generación del magnetofosfeno [intervalo $(0, t_0)$] podría considerarse un circuito eléctrico constituido por un electrogenerador, un condensador y una resistencia. El condensador se carga durante el tiempo $(0, t_0)$ hasta un cierto valor que depende del valor $1/\gamma$, al cual hemos aludido líneas arriba, y se llama *constante*

de tiempo, y tal hecho correspondería a una acumulación de energía por los optorreceptores. La constante $1/\gamma$ es una característica de la retina y está ligada, como ya lo vimos, a la pendiente inicial de la curva de excitación. Puesto que el valor $1/\gamma$ es único, existiría un solo valor del producto de la resistencia por la capacidad del circuito equivalente para representarla. La resistencia óhmica del tejido es experimentalmente determinable y el valor γ se obtiene en forma gráfica de la curva [10], con lo cual queda fijada la capacidad. El tiempo t_0 condiciona la cantidad de energía acumulable por los conos y los bastoncitos. La etapa de persistencia del magnetofosfeno es equiparable al comportamiento de un circuito como el precedente, pero sin electrogenerador. En tal caso, la energía acumulada se descarga a través de la resistencia del circuito. La inclinación de la curva depende asimismo de γ y coincide con la inclinación de la curva de la primera etapa por ser ésta una constante intrínseca del sistema.

Con las ecuaciones [11] y [14] formamos el sistema

$$\begin{cases} B_n = \frac{1}{Q} \varepsilon_n \\ h = \varepsilon_n e^{-\gamma \tau n} \end{cases} \quad [16].$$

Para que la segunda ecuación esté expresada en las mismas unidades que la primera (unidades de intensidad de campo magnético) es menester dividir ambos miembros por Q .

De [16], por diferencia, obtenemos

$$B_n = h + \varepsilon_n \left(\frac{1}{Q} - e^{-\gamma \tau n} \right) \quad [17].$$

El valor τ_n de τ mide el tiempo de persistencia de la sensación entóptica (fig. 7).

§ 11. Comparación con los datos experimentales

Barlow, Kohn y Walsh (1941) han medido la persistencia de los magnetofosfenos y los electrofosfenos en función de la intensidad del estímulo, es decir, de la intensidad del campo magnético aplicado o la intensidad de la

corriente eléctrica aplicada (fig. 8). Para ambas clases de fosfenos el comportamiento de la curva es el mismo. Si la gráfica experimental de los magnetofosfenos (de igual manera podemos proceder con la gráfica de los electrofosfenos) se dibuja poniendo los valores del campo magnético en el eje vertical y los valores del tiempo de persistencia en el eje horizontal, resulta la fig. 9. Su curva responde a la función [17] del párrafo precedente. Tenemos así un primer argumento de comprobación experimental, aunque de naturaleza puramente cualitativa, de la plausibilidad de los razonamientos hechos en nuestros desarrollos teóricos. Para un intento de lograr nuevos argumentos a favor de esta interpretación, o de otra que sea más adecuada a la realidad biofísica, es necesario pasar al cálculo k , K y, luego, de Q . El valor de G ya ha sido investigado en el § 9. La teoría contiene también la posibilidad de estudiar la influencia de la frecuencia ν de los estímulos (a partir de la relación bien conocida $\omega = 2\pi / T = 2\pi\nu$), lo que ha sido ya experimentalmente abordado (véase el § 2), así como las relaciones (Rashevsky, 1948) con la cronaxia de la retina.

De la fórmula [17] del § 10 se obtiene la expresión

$$\tau_n = \frac{1}{\gamma} \ln \frac{1}{(h/\epsilon_n) + (1/Q) - (B_n/\epsilon_n)} \quad [1]$$

que describe la curva experimental de la fig. 8.

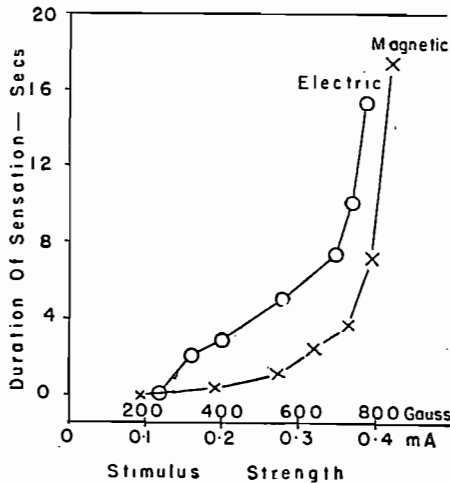


Fig. 8.—Duración (persistencia) del magnetofosfeno en función de la intensidad del estímulo (campo magnético). Frecuencia: 30 ciclos por segundo. Sujetos E. G. W. (magnetofosfenos) y H. B. B. (electrofosfenos) (*Duration of sensation*: duración de la sensación; *Secs*: segundos; *Stimulus Strength*: intensidad del estímulo; *Electric*: eléctrico (curva de los electrofosfenos); *Magnetic*: magnético (curva de los magnetofosfenos) (Barlow, Kohn y Walsh, 1947).

Tomando pares de valores numéricos de los datos experimentales contenidos en la gráfica de la fig. 8, cabe formar sistemas de ecuaciones en base a la expresión [17] del § 10 o la expresión [1] de este párrafo y proceder al cálculo de h, Q . Con este recurso y lo dicho precedentemente se tiene elementos como para mejorar la apreciación cuantitativa del análisis que acabamos de hacer en relación con los magnetofosfenos.

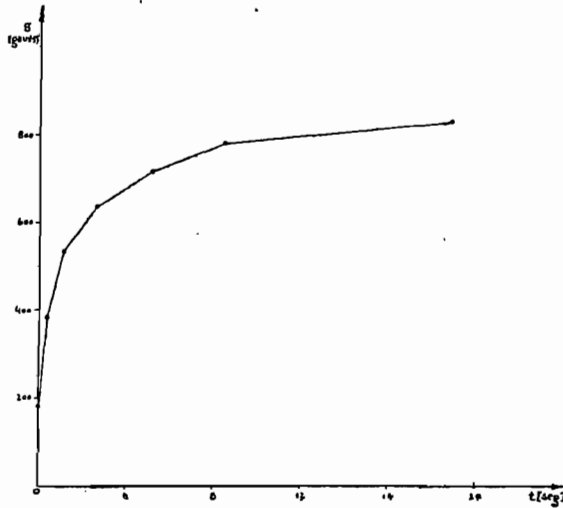


FIG. 9 - Curva experimental de magnetofosfenos tomada de la fig. 8, poniendo B en función de τ .

§ 12. Síntesis

En este trabajo se ha tomado por base las investigaciones experimentales iniciadas por D'Arsonval (1896), Beer (1902), etc., y perfeccionadas por Barlow, Kohn y Walsh (1947), para ensayar una interpretación biofísico-matemática de los magnetofosfenos. La utilización de las propiedades físicas resumidas en una de las ecuaciones de Maxwell y la aplicación de la teoría de la excitación electrofisiológica elaborada por Blair permiten plantear un sistema de dos ecuaciones en ciertas condiciones de contorno del cual deriva una función que traduce aceptable y provisoriamente algunos hechos experimentales. El comportamiento de los magnetofosfenos cuando el sujeto sometido a experiencia mueve la cabeza o los ojos, siendo constante o variable

el campo magnético usado como estímulo, es interpretable por las ecuaciones vectoriales correspondientes al caso del circuito móvil. La investigación numérica de las fórmulas logradas en el análisis desarrollado en este estudio conducirá a afianzar, modificar o substituir las hipótesis propuestas. La interpretación de los electrofosfenos puede constituir un conplario del conocimiento del mecanismo generativo de los magnetofosfenos.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- BARLOW, H. B., KOHN, H. I., y WALSH, E. G., 1947: Sensaciones visuales producidas por campos magnéticos. *The American Journal of Physiology*, 148, nº 2, p. 372.
- BEER, B., 1902: Sobre la producción de una sensación luminosa subjetiva en campos magnéticos. *Wiener Klinische Wochenschrift*, 15, nº 4, p. 108.
- BHATNAGAR, S. S., y MATHUR, K. N., 1935: Physical principles and applications of magnetochemistry. Mac Millan and Company, Limited, London.
- CHWOLSON, O. D., 1908: Lehrbuch der Physik. F. Vieweg und Sohn, Braunschweig.
- D'ARSONVAL, A., 1896: Dispositivo para la medida de las corrientes alternativas de todas las frecuencias. *Comptes Rendus de la Société de Biologie de Paris*, 3, serie 10, p. 450.
- GARNIER, M. y DELAMARE, V., 1923: Dictionnaire des termes techniques de médecine. A. Maloine et fils, Paris.
- GUILLEMINOT, H., 1922: Electrologie et Radiologie. Masson et Cie., Paris.
- HOUSTON, W. V., 1948: Principles of Mathematical Physics. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York-Toronto-London.
- JÄGER, G., 1927: Física Teórica. Editorial Labor, S. A., Barcelona-Buenos Aires.
- KAHN, F., 1931: Das Leben des Menschen. Franck'sche Verlagshandlung, Stuttgart.
- MAGNUSON, C. E., y STEVENS, H. C., 1911-1912: Sensaciones visuales causadas por cambios en la intensidad de un campo magnético. *The American Journal of Physiology*, 29, p. 124.
- PERUGA, E., 1943: Física General y Experimental. Labor, Barcelona.
- POHL, R. W., 1932: Tratado de Física. Gili, Barcelona.
- POLLOCK, L. J., y MAYER, L. L., 1938: Un fenómeno adaptacional de fosfenos eléctricamente producidos. *The American Journal of Physiology*, 122, p. 57.

- RASHEVSKY, N., 1948: *Mathematical Biophysics*. The University of Chicago Press, Chicago, Illinois, U. S. A.
- SELWOOD, P. W., 1943: *Magnetochemistry*. Interscience Publishers, Inc., New York.
- SKILLING, H. H., 1952: *Los fundamentos de las ondas eléctricas*. Librería del Colegio, Buenos Aires.
- STONER, E. D., 1934: *Magnetism and Matter*. Methuen and Company, London.
- STUHLMAN, O., 1943: *An Introduction to Biophysics*. John Wiley and Sons, Inc., New York, Chapman and Hall, Limited, London.
- SZYMONOWICZ, L., 1924: *Trattato di Istologia e Anatomia Microscopica con speciale considerazione del corpo umano, compresa la tecnica microscopica*. Casa Editrice Dottor Francesco Vallardi, Milano.

FACULTAD DE CIENCIAS MÉDICAS DE
ROSARIO e INSTITUTO DE INVESTI-
GACIONES DE LA ACADEMIA DE ME-
DICINA DE BUENOS AIRES