

Aplicaciones terapéuticas de los campos magnéticos

Trabajo resumen de las Becas de Investigación concedidas por Fundación MAPFRE en las Convocatorias de 1980/81 y 1981/82.

A. MADROÑERO DE LA CAL
Doctor en Ciencias Físicas.

1. PANORAMICA DEL PROBLEMA

La naturaleza piezoeléctrica del hueso de los mamíferos, y en particular del hombre, es un hecho muy divulgado desde que hacia 1950 fue descubierto por Fukada, es decir, los esfuerzos mecánicos que las piezas de un esqueleto sufren por efecto de la marcha, cargas, etc., se traducen inmediatamente en tensiones eléctricas generadas en el propio hueso, que no es una pieza mineral estática e invariable, sino un conjunto dinámico que funciona en un espacio recorrido por corrientes eléctricas. Por ello se puede actuar sobre el hueso por medio de campos magnéticos, con la gran ventaja de que, desde fuera de la piel se pueden generar con equipos electrónicos campos magnéticos que actúen en el interior del cuerpo sin que el bisturi tenga que rasgar la piel. Es como si en el interior de una botella de vidrio horizontal, colocásemos una moneda de níquel y desde fuera, moviendo un imán permanente a lo largo de la superficie exterior de la botella, consiguiéramos arrastrar la moneda por el interior de la botella; actuamos a través de la pared de vidrio sin producirla el menor daño. Es el sueño de una cirugía futurista.

Sin embargo, la utilización de esta idea como terapia no es una técnica habitual en la Medicina actual, posiblemente porque su aplicación viene realizándose desde hace pocos años y, sobre todo, porque la naturaleza íntima de la relación entre la evolución de los distintos procesos celulares y los campos magnéticos no es totalmente conocida hoy por hoy.

En cualquier caso, en una Medicina como la actual, quizás sobrecar-

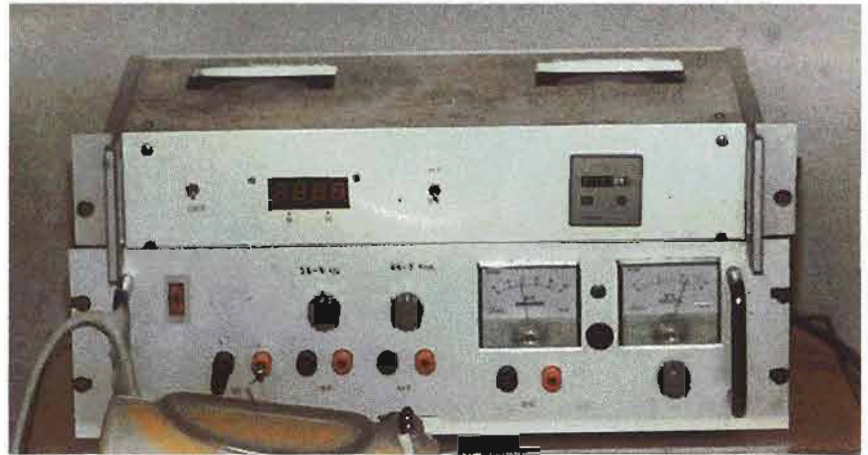


Fig. 1: Equipo diseñado.

gada de potentes fármacos, la aplicación terapéutica de los campos magnéticos aparece como una sugestiva posibilidad, sobre todo por su carácter indoloro y por su completa inocuidad (se trabaja siempre con campos de intensidad muy inferior al nivel de comienzo de efectos secundarios indeseables) de forma que sólo pueden presentar contraindicaciones en enfermos con marcapasos cardíaco implantado, con diabetes o en estado de gravidez.

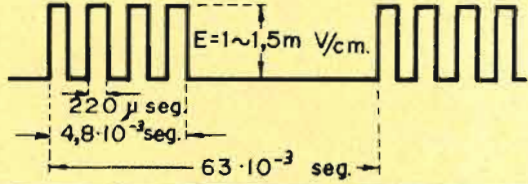
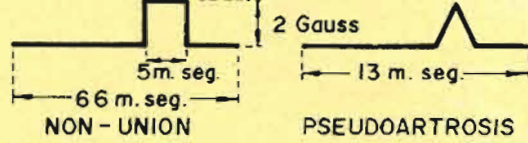
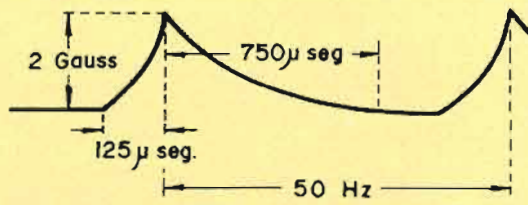
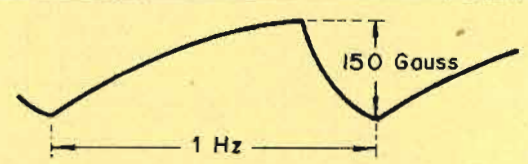
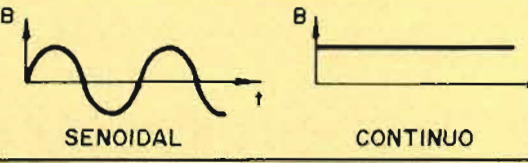
Por el momento hay dos rangos de aplicación terapéutica de los campos magnéticos: como magnetoterapia y como estimulación de la osteogénesis en procesos de reparación ósea. Se vislumbra también la detección de campos magnéticos endógenos (campos magnéticos generados por las corrientes eléctricas que tienen lugar en el interior de nuestro cuerpo); así por ejemplo, puede pensarse en substituir un electroencefalograma por un magnetoencefalograma, un electrocardiograma por un magnetocardiograma. Esta última vertiente de los campos magnéticos será, sin duda, el

próximo brillante paso de la electro-medicina, pero aquí nos vamos a ocupar solamente de la magnetoterapia y la estimulación de la osteogénesis.

La magnetoterapia consiste en aplicar campos magnéticos de hasta unos 80 ó 100 gauss máximo (el gauss es una antigua unidad de densidad de flujo magnético. Para hacernos una idea, el campo magnético terrestre vale algo menos de medio gauss) a una zona del cuerpo humano aquejada de una disfunción o trauma. La actuación de estos campos magnéticos alternos (de frecuencia inferior a 100 Hz), consiste en aumentar la oxigenación en las membranas celulares, de forma que se corrige el indeseado origen del dolor. La magnetoterapia es pues en esencia, un método moderno y potente de rehabilitación y con el cual existe ya bastante experiencia. Son innumerables las clínicas, incluso privadas, a las que acuden a tomar sesiones de magnetoterapia pacientes aquejados de sinusitis, dolores traumáticos, etc.

La magnetoterapia puede ser, in-

TABLA I
DIFERENCIAS ENTRE LOS IMPULSOS DE CAMPO
MAGNETICO USADOS EN LA ESTIMULACION DE LA
OSTEOGENESIS PARA RESOLUCION DE FALLOS
DE CONSOLIDACION

AUTOR	TIPO DE IMPULSOS
Rooze y Hinsenkamp (1979)	Equipo Bio-Osteogen 
Sharrard (1980)	
O'Connor y Cols. Corfield y Jones	
Watson y Downes (1979)	
Habirova (1978)	
Mitbreit (1978)	Frecuencia senoidal de 50 Hz
Thielemann (1978) Bogdanovich (1974)	Emplean la R.N.M. para seguimiento de la progresión de la osteogénesis.

Por el momento, hay dos rangos de aplicación terapéutica de los campos magnéticos: como magnetoterapia y como estimulación de la osteogénesis en procesos de reparación ósea.

algunos años (ver tabla 1) y el hecho de ser desconocido hasta los factores que determinan su efectividad, impedía la correcta valoración de los resultados.

Repasando las relaciones de resultados recogidas en la literatura médica, parece como si aplicando prácticamente cualquier tipo de pulso de campo magnético, se produjesen maravillosas resoluciones de faltas de consolidación en la mayoría de los casos, siendo imposible en los casos en los que no había éxito, dar explicación alguna de la razón del fracaso.

La primera fase de los trabajos de investigación de la Beca y conjuntamente con el Departamento de Traumatología del Centro de Rehabilitación MAPFRE, fue diseñar y construir un equipo como el mostrado en la figura 1, que permitía aplicar impulsos de campo de intensidad frecuencia y modulación regulables a voluntad. Trabajando con conejos a los que se les producía quirúrgicamente una fractura en el fémur, y se les aplicaba campos magnéticos a la zona fracturada. Nuestro propósito era ver si había alguna diferencia entre el tejido óseo que constituye un callo formado espontáneamente y el tejido óseo crecido bajo la influencia de impulsos de campo magnético. No pudimos encontrar diferencia alguna, y no existía la posibilidad de poderlo achacar a una poca adecuación del campo magnético producido por el aparato diseñado y construido en MAPFRE, a los requerimientos de la estimulación osteogénica: con aquel mismo aparato

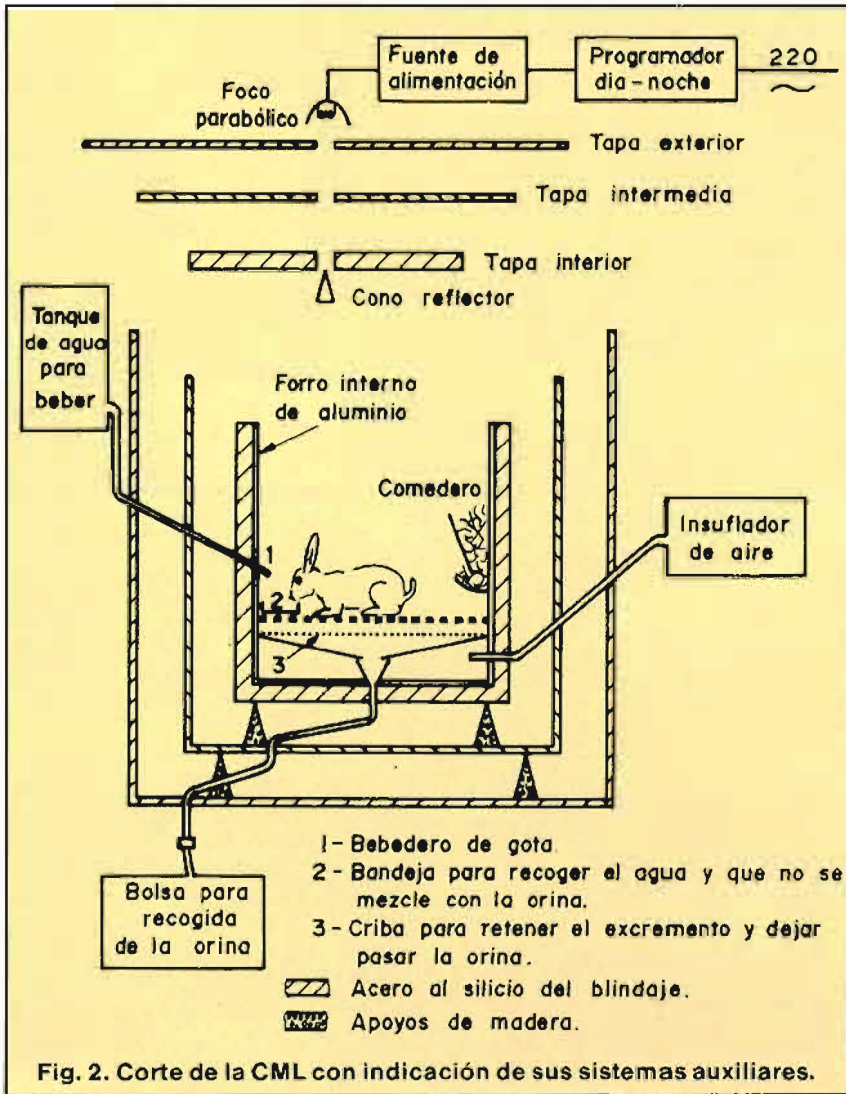
cluso, un auxiliar valioso de otras terapias, incluida la estimulación de la osteogénesis. De esta terapia en exclusiva vamos a ocuparnos en el presente artículo.

2. ESTIMULACION DE LOS PROCESOS OSTEOGENICOS COMO SOLUCION A LOS CASOS DE NO-UNION (PSEUDOARTROSIS) Y DE UNION RETARDADA

Cuando un hueso humano se rompe, el remedio tan óptimo como antiguo es reducir la fractura y fijarla.

El proceso del crecimiento espontáneo de hueso produce una soldadura natural, al originarse un callo de fractura que deja la zona incluso sobrerreforzada. Pero hay ocasiones en las que el callo no se produce, por lo que la lesión no se resuelve, sin que se sepa del tema lo suficiente como, por ejemplo, para prever qué tipo de individuos están predispuestos a estos problemas, ni el mecanismo que falló imposibilitando la consolidación. Una esperanzadora posibilidad para estos casos es la aplicación de impulsos de campos magnéticos.

Se venían usando desde hacía



campo magnético terapéutico tienen en común un campo magnético continuo. Si esto fuera cierto, la conclusión podría ser que en vez de los costosos equipos electrónicos que normalmente se emplean para estas terapias, podríamos usar unos simples y baratísimos imanes permanentes adheridos a la zona afectada con un simple esparadrapo. Había que hilar muy fino en la experimentación.

Por aquel tiempo aparecieron publicados en algunas revistas científicas una serie de trabajos que daban cuenta del «fracaso» de una serie de experimentos biológicos realizados a bordo de satélites artificiales, concretamente en misiones espaciales Skylab (USA) y Cosmos (URSS). Los experimentos trataban de estudiar el comportamiento de los mamíferos (concretamente ratas) en condiciones de gravitación nula. Los trabajos daban cuenta de cómo las funciones fisiológicas normales (circulación sanguínea, digestión, etc.) se daban en el vuelo orbital con toda normalidad: había sólo una excepción pero altamente significativa. Todas las ratas, al cabo de unos cuantos días de vuelo orbital, presentaban una *descalcificación ósea*, llegando incluso a presentar la osteoporosis de los viejos. Dicha osteoporosis se les curaba a los animales a su regreso a la Tierra de una forma totalmente espontánea, sin-

fueron curados enfermos que tenían faltas de consolidación. Es decir, los campos magnéticos no producen un callo de fractura «diferente», sino que ponen en marcha el mecanismo osteogénico normal.

A continuación nos pusimos a pensar acerca de lo que podía haber en todos los impulsos de campo magnético usados en los trabajos (resumidos en la tabla 1, por ejemplo) referenciados en la literatura médica publicada sobre el tema, que los hacía terapéuticos la mayoría de las veces, e ineficaces en el resto. El tratamiento matemático del análisis del Fourier (un tratamiento matemático habitual, que nos permite calcular que intensidad tiene cada componente elemental de un impulso) nos dice que todos los impulsos utilizados en estas terapias tienen en común, al menos una *componente continua*. Es decir, los impulsos de



tratamiento medicamentoso alguno. El efecto fue achacado a la falta de gravitación.

En vuelos subsiguientes se les hizo vivir a los osteoporósicos viajeros roedores en unas jaulas insertas en una centrifugadora, de modo que en pleno vuelo orbital los roedores recobraban las condiciones de gravitación terrestre. No se curaban de su osteoporosis. Los articulistas acababan sus trabajos reconociendo que tales resultados no tenían fácil explicación.

Estos «fracasos científicos» resultaron ser para nuestro trabajo un faro luminoso que rasgaba la oscuridad. Si hiciéramos la hipótesis de que es la ausencia del *campo magnético terrestre* y no la del campo gravitatorio terrestre la causa de la aparición de la osteoporosis durante el vuelo orbital, todo encaja perfectamente.

Nosotros no teníamos la posibilidad de mandar al espacio unas ratas y, una vez osteoporósicas, curarlas durante el vuelo orbital mediante la aplicación de un campo magnético continuo. Hubimos de conformarnos con construir en el animalario una caja de tres envueltas, como se indica en la figura 2, de acero al silicio como el que se emplea en la construcción de los núcleos de los transformadores eléctricos. Dentro de esta caja, el campo magnético terrestre quedaba apantallado hasta una cienmilésima parte de su valor habitual.

Pusimos a vivir unos conejos en su interior (fig. 3). Se pudo comprobar, en todos los casos, que (a los conejos no se les suministraba más que luz, agua, aire y su habitual pienso) en cuanto los animales vivían en ausencia del campo magnético terrestre, el contenido en calcio de su sangre aumentaba, e inmediatamente después eliminaban el calcio por la orina (fig. 4). Nuestra hipótesis es cierta rigurosamente: la descalcificación no viene producida por la ausencia de campo gravitatorio, sino por la ausencia del campo magnético terrestre. Es decir, normalmente, el campo magnético terrestre actúa sobre nosotros moderando la actividad osteoclástica, y en su ausencia la *descalcificación se pone en marcha y la osteoporosis resulta inevitable*.

Es posible que en el futuro puedan retrasarse o contenerse las des-

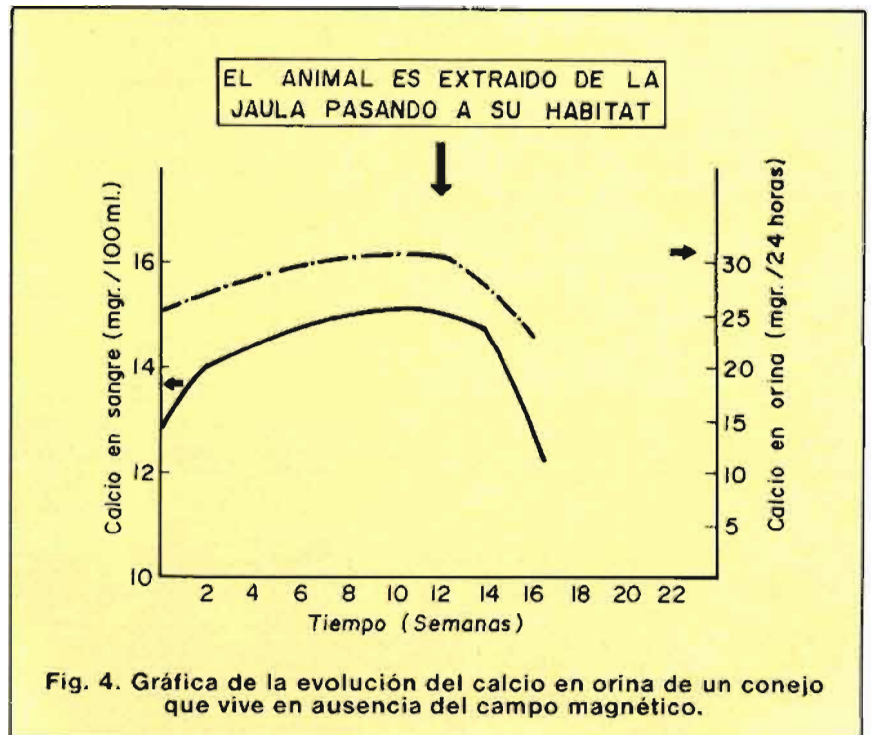


Fig. 4. Gráfica de la evolución del calcio en orina de un conejo que vive en ausencia del campo magnético.

calcificaciones de los ancianos sin más que aplicarles un campo magnético continuo, que refuerce el efecto del campo magnético terrestre. Es posible que en el futuro puedan ser resueltas las calcificaciones *extraóseas* (tejidos óseos originados por metaplasia) sin más que hacer vivir a un paciente por una temporada en una habitación similar a la jaula de nuestro laboratorio. Es posible también imaginar que una persona con una falta de consolidación ósea pueda ser internada en una habitación limpia del campo magnético terrestre: cuando su osteoporosis alcance su nivel máximo tolerable, bastará retornarle a su habitat normal para que el proceso de calcificación generalizado que se desencadenará en todo su esqueleto anule y borre su falta de consolidación. A esta posibilidad nos hemos permitido bautizarla con el casi humorístico nombre de «vacuna magnética». Todo es o será posible, pero volvamos al hilo de nuestra estimulación de la osteogénesis.

Decíamos que la componente continua de los impulsos de campo magnético tiene por efecto una retención de la actividad de los osteoclastos. Pero ¿cuál será el efecto de las componentes alternas? Para ello efectuamos una serie de medidas de laboratorio, consistentes en sumergir a una serie de huesos en un

campo magnético alterno de frecuencia variable midiendo la señal eléctrica que en el hueso se generaba. Los huesos eran extraídos de un animal al que se había sacrificado en aquel mismo instante, pues una vez extraídos su respuesta se apaga en poco tiempo. En el caso de huesos humanos nos teníamos que limitar, lógicamente, a ensayar huesos de extremidades amputadas por cualquier circunstancia. Los resultados experimentales están expuestos en la figura 5, de una forma muy sucinta. Naturalmente los huesos se activan de distinto modo según sean sus poblaciones celulares, por lo que los huesos pequeños (metatarso, etc.) tendrían una respuesta distinta de los huesos grandes (fémur, etc.). También influye si los impulsos de campo magnético son puros o si van acompañados de muchos armónicos.

Desde el punto de vista teórico estos resultados son perfectamente justificables dado que la capacidad de penetración de un impulso de campo magnético en el interior de una célula depende de la forma de ésta. Teniendo en cuenta que es bien sabido que el proceso osteogénico está regulado por estas tres poblaciones de células óseas:

— Osteoclastos, o grandes células plurinucleadas que realizan la eliminación del calcio.

En la primera fase, los trabajos de investigación fueron diseñar y construir un equipo que permitía aplicar impulsos de campo, de intensidad, frecuencia y modulación regulables.

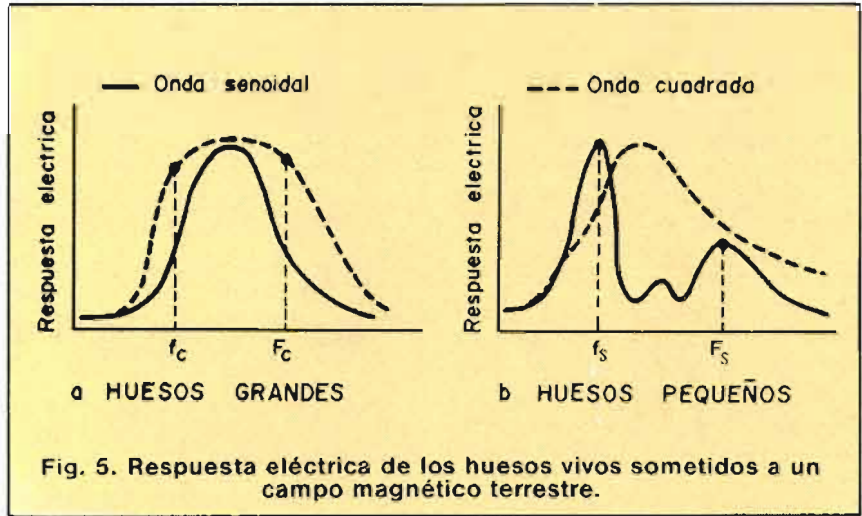


Fig. 5. Respuesta eléctrica de los huesos vivos sometidos a un campo magnético terrestre.

— Osteoblastos o fibroblastos evolucionados, de forma muy alargada, que constituyen el armazón sobre el que se fijará el calcio.

— Osteocitos, o habitantes definitivos del hueso ya estabilizado.

Podemos interpretar, por ejemplo la respuesta a un campo senoidal del hueso pequeño de la figura 5.b. A la frecuencia f_s se excitan los osteoblastos y/o fibroblastos y a la frecuencia F_s los osteocitos.

La razón para justificar estas interpretaciones se sustenta sólidamente en estudios físicos del problema de la interacción campo magnético-célula. Así, por ejemplo, en un interesante trabajo de Beltrame y cols., donde, apoyándose solamente en las ecuaciones de Maxwell, (cuatro ecuaciones de la Física que comprendían toda la teoría del electromagnetismo clásico) llegan a la conclusión de que:

a) Las células esféricas (osteoclastos) son impermeables a cualquier campo eléctrico alterno. Sólo son traspasables por el campo continuo.

b) Las células alargadas son actuables por campos alternos y cuando más baja es la frecuencia, más penetrables son (osteoblastos).

c) Si vamos transformando una geometría alargada hacia la esférica,

cuanto más la aproximemos a la esfera, más débil será su respuesta y más alta la baja frecuencia que consigue la máxima respuesta.

Estábamos pues, en disposición de pasar a diseñar un equipo para estimular la osteogénesis mediante campos magnéticos exógenos.

3. DISEÑO DE LOS EQUIPOS

Está claro que el ideal es un equipo plurivalente constituido por el mínimo número de elementos indispensables. Es evidente que tendremos que utilizar diversas frecuencias, por lo que vamos a tomar la estrategia de en vez de mezclar las corrientes, usar como generador de campo una bobina con espiras separadas, de modo que lo que haremos será llevar la corriente de cada

generador a una espira aislada pero yuxtapuesta con sus vecinas, de modo que los distintos campos cada uno con su frecuencia, se sumen en el espacio.

El problema es similar a un altavoz que quisiéramos usar para emitir por él un sonido grave y otro agudo simultáneamente. Mejor que esto, separamos ambos generadores eléctricos y disponemos un altavoz para el agudo (altavoz pequeño), otro altavoz para el sonido grave (altavoz grande) y los montamos juntos en una única pantalla acústica. Ambas frecuencias están eléctricamente separadas y los sonidos alcanzan nuestro oído a la vez, después de haberse mezclado en el aire.

Esta segunda forma de proceder tiene, además, la ventaja de que po-

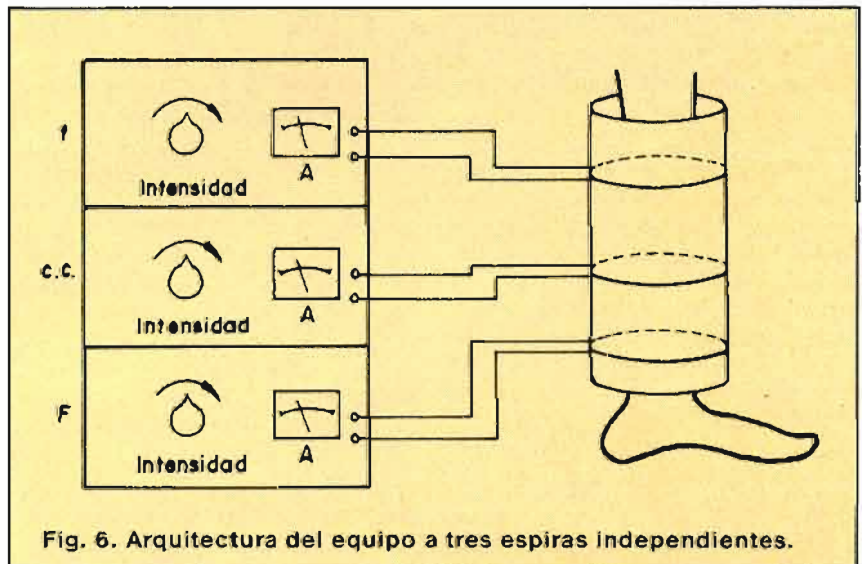


Fig. 6. Arquitectura del equipo a tres espiras independientes.

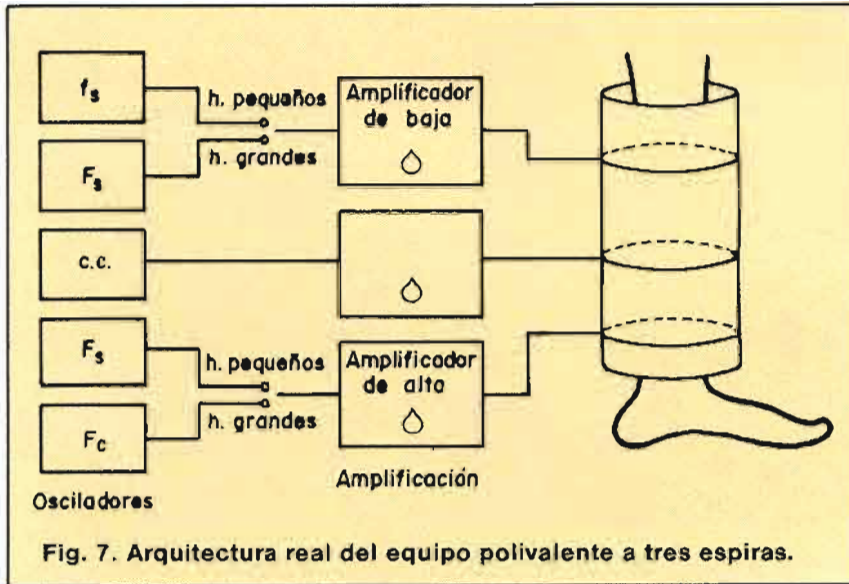


Fig. 7. Arquitectura real del equipo polivalente a tres espiras.

demostramos dejar apagado un altavoz, dejando encendido el otro.

Inexcusablemente necesitamos tres espiras independientes para producir:

- Campo continuo (c.c.).
- Excitación de los osteoblastos (f).
- Excitación de los osteocitos (F).

En consecuencia dispondremos un aparato con una arquitectura co-

mo la mostrada en la figura 6. Vamos a elegir las tres frecuencias.

a) **Huesos pequeños** (fig. 5.b).

Si empleamos onda cuadrada no podremos actuar tan selectivamente como si trabajamos con onda senoidal. Elegimos, pues, onda senoidal con las frecuencias:

$$f_s = 10.500 \text{ Hz.}$$

$$F_s = 45.000 \text{ Hz.}$$

Se pudo comprobar, que en cuanto los animales vivían en ausencia del campo magnético terrestre, el contenido en calcio de su sangre aumentaba, e inmediatamente después eliminaban el calcio por la orina. La descalcificación no viene producida por la ausencia de campo gravitatorio, sino por la ausencia del campo magnético terrestre.

La secuencia terapéutica de aplicación será:

1.ª etapa (desparalización de la fractura). Se usa $f_s + c.c.$

2.ª etapa (formación del callo). Se usa $f_s + c.c. + F_s$.

3.ª etapa (estabilización final). Se usa F_s .

Obviamente será el traumatólogo el que dispondrá la duración y dosis a suministrar en cada etapa, a la vista de la evolución de cada paciente, sabiendo que en cada caso dispone de un campo de $4 B_1$ por espira (B_1 es el valor del campo magnético terrestre).

b) **Huesos grandes** (fig. 5.a).

En este caso no discernimos unas poblaciones de otras en el caso de campo senoidal. Antes bien, corremos el peligro de que la curva se nos desplace a derecha o izquierda al pasar al fémur de humano (durante el tiempo que efectuamos el trabajo no se efectuó en el hospital ninguna amputación de pierna, por lo que hubimos de conformarnos con fémur de conejo, pero juzgamos que el resultado es aceptable) y nos quedamos fuera del pico. Elegimos como frecuencias.

$$f_c = 14.000 \text{ Hz.}$$

$$F_c = 24.000 \text{ Hz.}$$

Mirando la posición de estas frecuencias en figura 5, se ve fácilmente la estrategia. Aquí no tenemos una «alta» y otra «baja», sino dos «equivalentes», de modo que aunque se

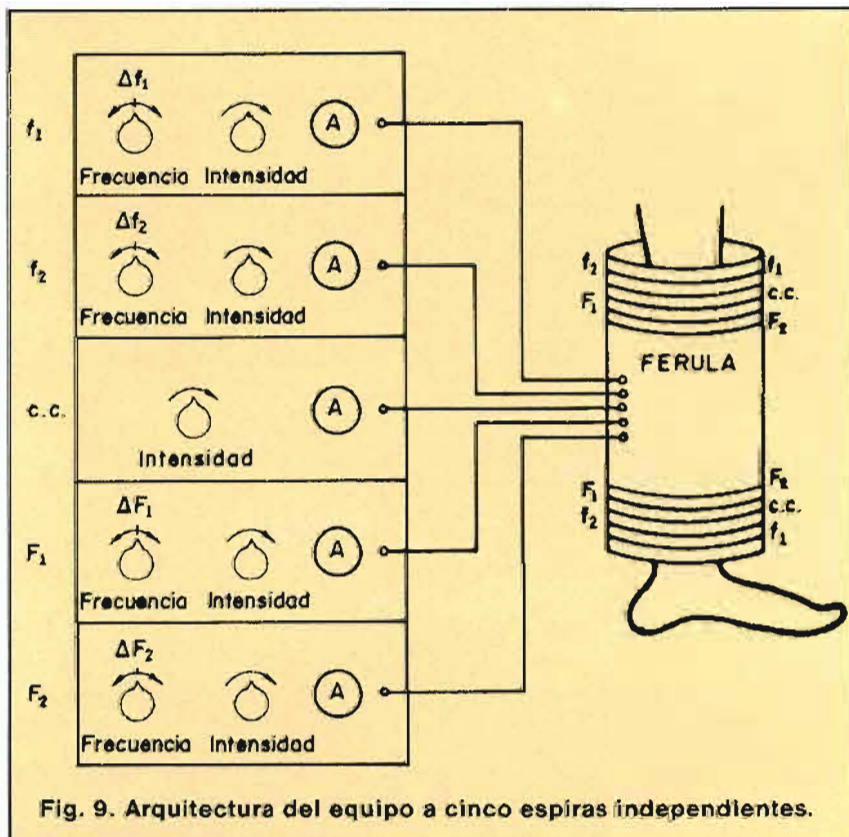


Fig. 9. Arquitectura del equipo a cinco espiras independientes.



Fig. 8: Aparato para huesos grandes, forma de utilización.

corra la curva a derecha o izquierda (de acuerdo con la particular casuística de cada paciente) lo que pierde en eficacia la una lo gana la otra.

En consecuencia, la secuencia terapéutica será:

1.ª etapa (desparalización de la fractura). Se usa $f_c + c.c. + F_c$.

2.ª etapa (formación del callo). Se usa $f_c + c.c. + F_c$.

3.ª etapa (estabilización final). Se usa $f_c + F_c$.

Como conviene disponer de ambos equipos para poder abarcar todos los posibles casos, hemos dispuesto la realización de un equipo híbrido que con un simple golpe de conmutador se transforma en un equipo para huesos pequeños o en un equipo para huesos grandes, a la libre elección del usuario. La arquitectura de este equipo está expuesta en la figura 7, y su apariencia, tal y como puede usarse ya en la clínica, está mostrada en la figura 8.

Complicando más la construcción del aparato y aumentando su costo, pueden utilizarse otras estrategias que conlleven a otro tipo de equipos, aptos especialmente para la investigación de la influencia de factores secundarios como son edad y características particulares de cada paciente, orientación del plano de la fractura con respecto al eje del hueso, etc. Nosotros continuaremos trabajando con uno, a cinco espiras, que tiene una situación automática de las cuatro frecuencias y la posi-

bilidad de variarlas dentro de un intervalo prudente a fin de establecer posibles desplazamientos de curva. Su arquitectura, está mostrada en figura 9.

Es posible que en el futuro, puedan ser resueltas las calcificaciones extraóseas sin más que hacer vivir a un paciente por una temporada en una habitación similar a la jaula de nuestro laboratorio.

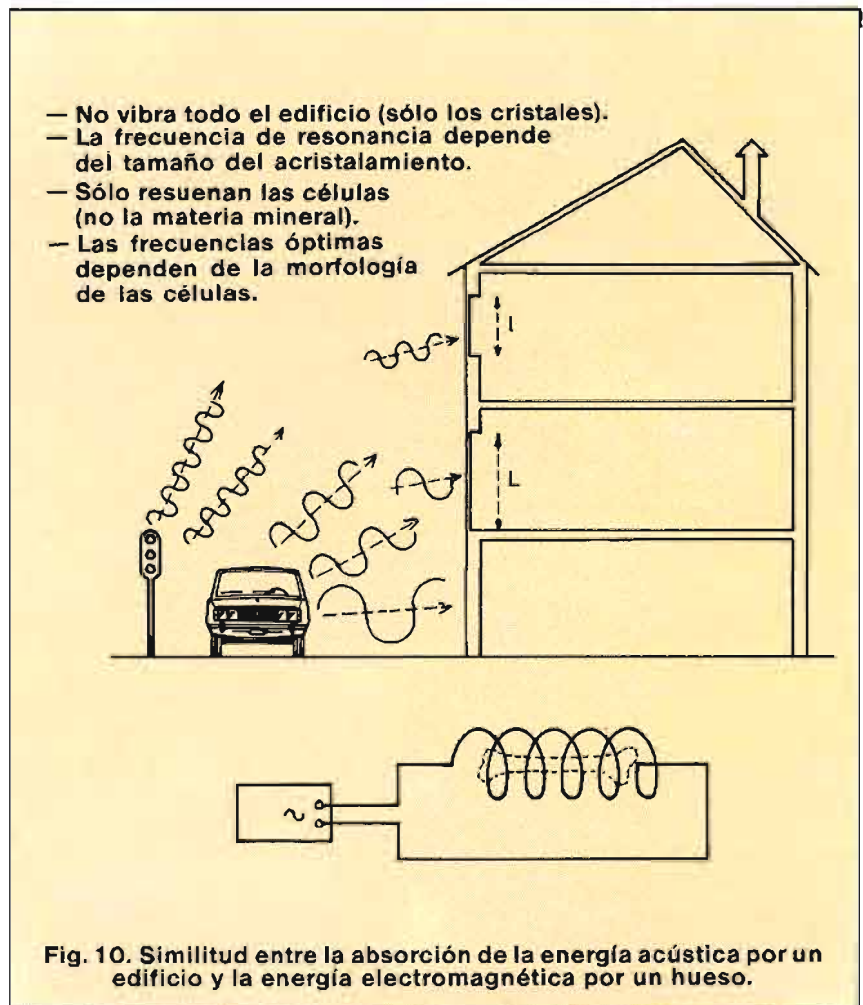


Fig. 10. Similitud entre la absorción de la energía acústica por un edificio y la energía electromagnética por un hueso.

frente de combate contra la osteoporosis de los ancianos.

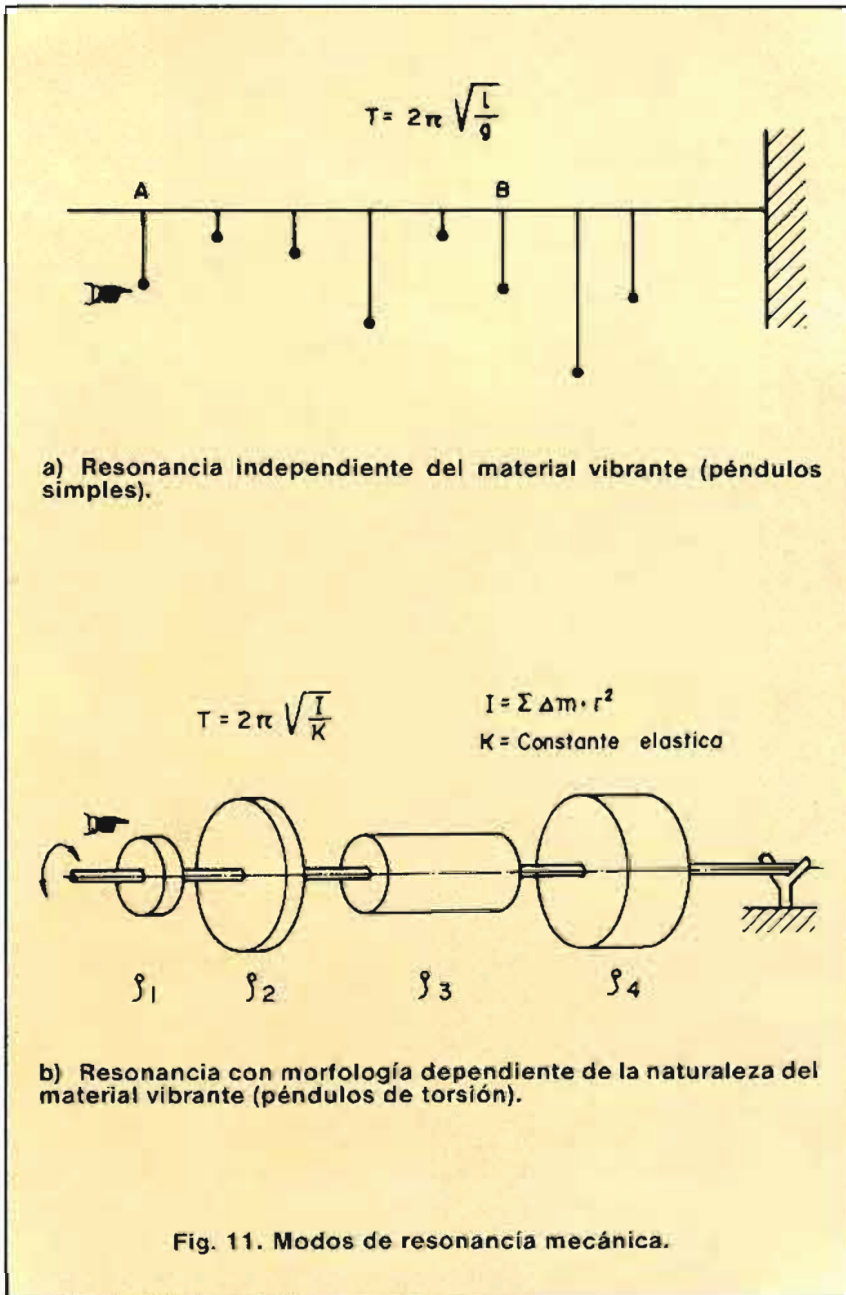
Una vez más ha vuelto a repetirse la vieja historia de aquel padre que dejó a sus hijos por herencia una modesta viña «con un tesoro oculto». Hartos de cavar, los herederos dieron al fin en comprender la naturaleza del oculto tesoro. Al haber cavado el terreno palmo a palmo, habían trastocado a su modesta heredad en la mejor de las viñas. No hay experimento baldío, aunque nosotros no seamos capaces de interpretarlo al principio. Lo importante es acabar comprendiendo la naturaleza profunda de la técnica que estamos manejando.

La energía del campo magnético no es absorbida por la estructura cálcica del hueso, sólo resuenan sus diminutas células vivas, al igual que las ondas acústicas del tráfico urbano (fig. 10) conmueven los cristales de los edificios mientras que los ladrillos reflejan más que absorben los sonidos.

El símil se comprende mejor a la vista de la figura 11. En la figura 11a vemos como sólo los péndulos A y B se intercambian energía oscilante, siendo el factor determinativo de la entrada o no en resonancia la simple igualdad entre las longitudes de cada péndulo. Tal sucede en el hueso cuando excitamos con completa independencia a, por ejemplo, osteoblastos y osteoclastos. Es una mera consecuencia de sus formas alargadas o cuasi-estéricas.

Si el fenómeno fuese más complejo, como por ejemplo en los péndulos de la figura 11.b en los que, además de la geometría juega la densidad (un péndulo grande de aluminio puede ser «igual» a un péndulo pequeño de plomo) del material, las cosas serían más complicadas. Al ser fáciles, la Naturaleza nos está diciendo que lo que hay dentro de una membrana celular (citoplasma y núcleo) exhibe una respuesta similar, independiente del tipo de célula, a los campos magnéticos. El día que sepamos sacarle todo el partido posible a esta idea, habremos descubierto nuestro particular tesoro oculto.

Agradecemos a los Dres. Guillén García, Pitillas y Llopis su ayuda en este trabajo de investigación llevado a cabo en el Centro de Rehabilitación MAPFRE. ■



Independientemente de las ventajas que supone la utilización de equipos sintonizados a las frecuencias propias de resonancia de los huesos, los experimentos realizados nos abren la posibilidad de utilizar al campo magnético terrestre como elemento terapéutico, así como la posibilidad de abrir un sugestivo frente de combate contra la osteoporosis de los ancianos.

4. VISION ACTUAL DEL PROBLEMA DE LA RELACIÓN ENTRE LOS CAMPOS MAGNETICOS Y LA ESTIMULACION OSTEOGENICA

Independientemente de las ventajas que supone la utilización de equipos sintonizados a las frecuencias propias de resonancia de los huesos, los experimentos realizados nos abren la posibilidad de utilizar el campo magnético terrestre como elemento terapéutico, así como la posibilidad de abrir un sugestivo