

Aplicaciones clínicas de los campos magnéticos. Magnetoterapia y magnetosteogenia*

P. GUILLEN, J. M. MADRIGAL, A. MADROÑERO, J. I. PITILLAS, J. M. GALVEZ, J. LLOPIS

RESUMEN

Se comentan los fundamentos de las dos técnicas fundamentales mediante las cuales pueden utilizarse clínicamente los campos magnéticos, la magnetoterapia, o sea, utilización de impulsos de baja frecuencia que activan los procesos celulares mediante un incremento del contenido en iones del citoplasma, y la estimulación de las faltas de consolidación ósea mediante la aplicación de campo magnético continuo y alterno de más altas frecuencias. El campo continuo estimula la fijación del calcio óseo y los campos alternos estimulan los procesos celulares de las células óseas.

Se muestra cómo, a partir de medidas efectuadas en laboratorio de la respuesta eléctrica de huesos inmersos en un campo magnético, pueden diseñarse unos equipos basados en circuitos resonantes que, con una electrónica simplificada al máximo, vayan suministrando a lo largo del tratamiento la frecuencia más adecuada en cada momento para resolver una falta de consolidación en el aparato locomotor.

Indicadores: Campo magnético en consolidación ósea. Magnetoterapia para la consolidación ósea.

SUMMARY

The fundamentals of the clinical using of magnetic fields are explained in the two possible ways, the magnetotherapy and the stimulation of bone delayed and non unions. The low frequency magnetic pulses are used to promote cellular functions by increasing of ions formation in the citoplasm. The stimulation of delayed and non union is possible using a continuous and alternate superimposed magnetic fields. The continuous field promotes calcium fixation in bone tissue. The alternate magnetic field promotes the stimulation on the bone cells activity.

The experimental use of several kinds of laboratory measurement of electrical response of alive bones in magnetic environment is significant.

It is possible to design and make an equipment able to supply the most adequate doses of magnetic field in order to get an optimal influence to improve bone consolidation.

Key words: Magnetic fields in bone consolidation. Electric magnetic fields in bone consolidation.

* Trabajo realizado en el Centro de Rehabilitación Mapfre en Majadahonda (Madrid)

I. Introducción

Desde que en el año 1600, William Gilbert, en su libro «On the magnet» avanzara la posibilidad de la utilización de campos magnéticos con fines terapéuticos, los intentos han sido múltiples (1).

El gran atractivo de la utilización de un campo magnético radica en primer lugar en lo cómoda que resulta su aplicación sin casi contraindicaciones, y, en segundo lugar, en el hecho de que al ser nuestros tejidos totalmente permeables a cualquier campo magnético, se puede actuar *sobre ellos desde el exterior* con un campo magnético exógeno generado en unas simples espiras activadas por la corriente producida por un equipo electrónico. 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. En el momento que dispongamos de un conocimiento profundo y completo de la interacción entre un campo magnético y una célula viva (2), podremos conseguir un buen aprovechamiento de las posibilidades terapéuticas de los campos magnéticos.

En cualquier caso, en una Medicina como la actual, quizás sobrecargada 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 se pueden presentar contraindicaciones en enfermos con marcapasos cardíaco implantado, con diabetes o en estado de gravidez.

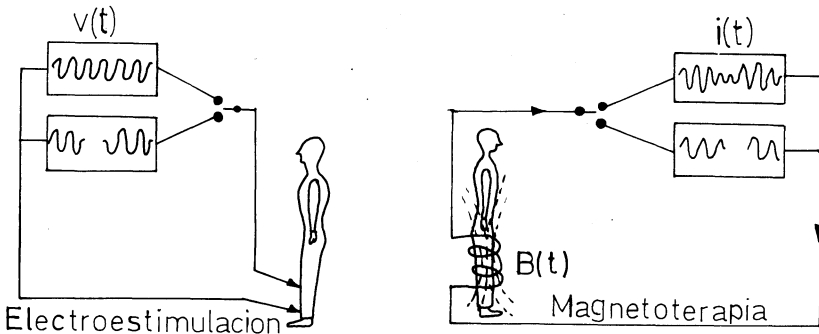
Por el momento hay dos rangos de aplicación terapéutica de los campos magnéticos: como magnetoterapia y como estimulación

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 electromedicina, pero aquí nos vamos a ocupar solamente de la magnetoterapia y la estimulación de la osteogénesis.

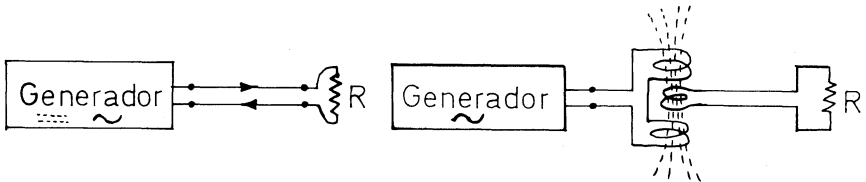
II. La magnetoterapia

Guarda un cierto paralelismo formal con la electroestimulación, tan habitual ya en nuestras clínicas de rehabilitación (fig. 1). Consiste esencialmente, de acuerdo con una teoría prácticamente aceptada por todos los investigadores (3) en un aumento de la permeabilidad de las membranas celulares a los iones, de modo que lo que en realidad se origina es un incremento de la actividad de las membranas de las células de los tejidos blandos.

El mecanismo parece sencillo. La membrana celular mantiene sus biopolímeros ordenados gracias a un fuerte campo eléctrico originado por las cargas superficiales acumuladas en sus dos caras. En su cara intercelular se acumulan los iones Na^+ , estando su cara intracelular tapizada de aniones proteínicos A^- . En la zona estable citoplasmática abundan aniones A^- acomplexados por iones K^+ , resultando conjuntos neutros y estables. De vez en cuando una molécula de agua golpea a un complejo A-K^+ ; si hubiese rotura existe una posibilidad (que, como veremos, el campo magnético exogénico aumenta) de que los iones K^+ escapen a la atracción de los A^- . El tapizado de aniones A^- de la cara intracelular de la membrana

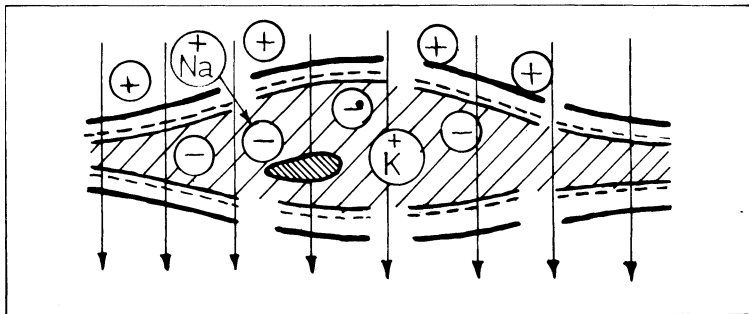


a) Similitud entre magnetoterapia y electroestimulacion



Electroestimulacion (c.c. y c.a.) Magnetoterapia (solo c.a.)

b) Modo de aporte de la energia, mediante corriente impuesta por electrodos y mediante acoplo electromagnetico



c) Actuacion de impulsos de campo magnetico sobre los iones del protoplasma celular

FIG. 1.- Concepto de magnetoterapia.

los atraen fuertemente como la rejilla de un triodo de vacío; los iones K^+ adquieren, en consecuencia, una importante energía cinética que les permite traspasar los canalículos de la membrana, alcanzando finalmente la zona intercelular o intersticial. Es el conocido efecto de bombeo selectivo de la membrana celular.

La conveniencia del campo magnético en forma de impulsos es evidente. Un complejo $A-K^+$ citoplasmático estable que se mueve impactado por una molécula de agua*, sufre un esfuerzo rompedor por efecto del campo magnético, ya que la fuerza que actúa sobre K^+ es opuesta a la que actúa sobre A^- por el opuesto signo de ambos iones. Así pues, imponer un campo magnético exógeno es aumentar el flujo de iones K^+ intracelulares que alcanzan la membrana con posibilidades de traspasarla.

* Es bien conocido en la Física Clásica que un campo magnético sólo actúa sobre una partícula cargada si ésta se encuentra en movimiento. Las partículas cargadas en reposo son insensibles a un campo magnético de cualquier intensidad.

Este es el efecto beneficioso del campo magnético en magnetoterapia. Por ello tiene poca influencia la orientación del campo con respecto al miembro a tratar.

La aplicación de esta técnica se verifica en las clínicas de rehabilitación en sesiones diarias (normalmente de 20 a 30 sesiones por tratamiento) con un equipo consistente en una camilla de material amagnético, normalmente acero inoxidable, donde se acuesta al paciente (fig. 2). La zona a tratar es colocada en la zona central de una gran bobina desplazable, que, activada por una corriente producida por un equipo electrónico, sumerge a la zona afectada en un campo magnético adecuado a su fin terapéutico. La dosificación y tipo de campo a aplicar (intensidad del campo, frecuencia de los impulsos, etc.) varían según el tipo de dolencia a resolver, siendo siempre impulsos rectangulares de baja frecuencia (no más de 1.000 impulsos por seg.) con intensidades de campo de hasta 100 gauss (1/100 de tesla).

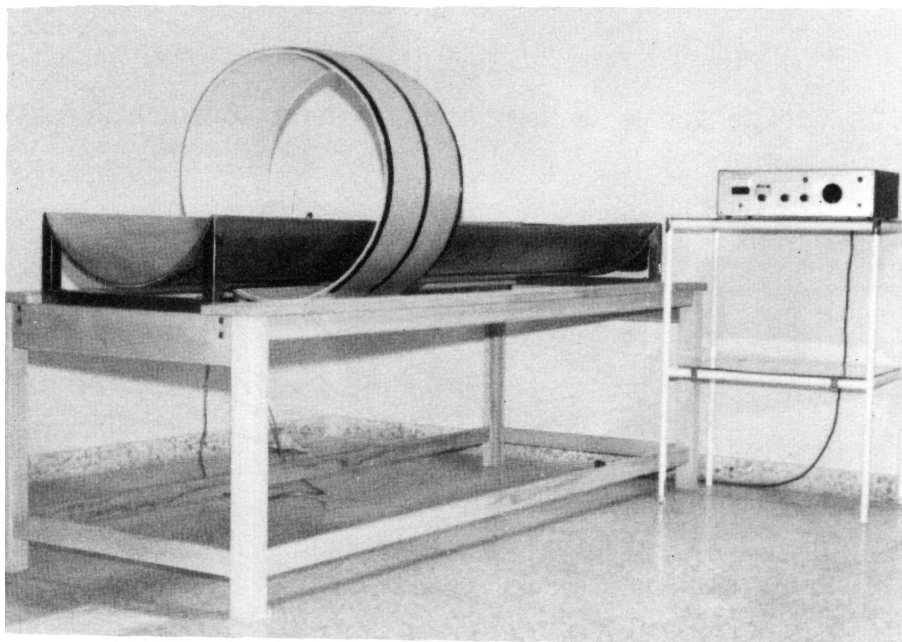


FIG. 2.— Equipo comercial para administración de tratamientos de magnetoterapia en una clínica.

Con esta técnica se resuelven en nuestras clínicas casos de dolores traumáticos, sinusitis, artrosis reumatoide, etc.

III. Estimulación de los procesos osteogénicos como tratamiento de uniones retardadas, pseudoartrosis congénitas, necrosis avascular, osteoporosis, enfermedad de Paget y procesos metastáticos

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 posiblemente debido a que la brecha a rellenar se ve ocupada por un cartílago que inhibe la formación del callo (4). En estos casos la fractura no se resuelve de un modo espontáneo, sin que se sepa del tema lo suficiente como, por ejemplo, para prever qué tipo de individuos están predispuestos a estos problemas. Una esperanzadora posibilidad para estos casos es la aplicación de impulsos de campos magnéticos, que en 1979 fue admitida por la Food and Drug Administration de los EE.UU., posiblemente en base a los trabajos realizados por Bassett y cols. (5, 6, 7 y 8), admitiéndose normalmente que esta técnica es efectiva en el 80 por 100 de los casos (4).

Existen también trabajos realizados por otros grupos de investigadores, que emplean impulsos de campo de distinto tipo, como puede verse en la Tabla I.

Repasando las relaciones de resultados recogidos en la literatura médica, aparece como si aplicando prácticamente cualquier tipo de impulsos 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.

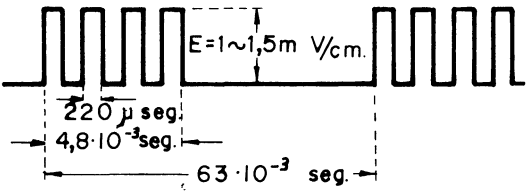
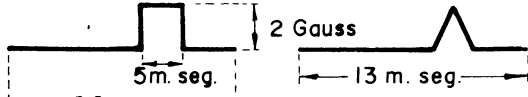
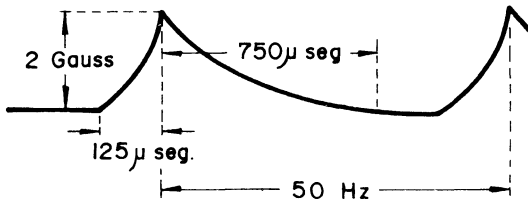
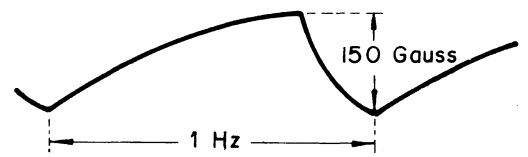
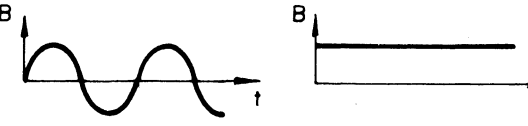
Nuestras investigaciones empezaron en este sentido. Comenzamos por construir en nuestros laboratorios un equipo electrónico capaz de suministrar una amplia gama de impulsos eléctricos.

Trabajamos 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 nuestro laboratorio, a los requerimientos de la estimulación osteogénica: con aquel mismo aparato 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 I, 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 por análisis de Fourier (un tratamiento matemático habitual, que nos permite calcular qué 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 campo magnético terapéutico tienen en común un campo magnético continuo a cuyo efecto, a lo mejor, es debida su capacidad terapéutica. Si esto fuera cierto, la conclusión podría ser que en vez de los costosos equipos electróni-

TABLA I

Diferencias entre los impulsos de campo magnético usados en la estimulación de la osteogénesis para resolución de fallos de consolidación

AUTOR	TIPO DE IMPULSOS
Rooze y Hinsenkamp (1979)	<p style="text-align: center;">Equipo Bio - Osteogen</p>  <p style="text-align: center;">$E = 1 \sim 1,5 \text{ m V/cm.}$</p>
Sharrard (1980)	 <p style="text-align: center;">NON - UNION PSEUDOARTROSIS</p>
O'Connor y cols. Corfield y Jones	 <p style="text-align: center;">50 Hz</p>
Watson y Downes (1979)	 <p style="text-align: center;">1 Hz</p>
Habirova (1978)	 <p style="text-align: center;">SENOIDAL CONTINUO</p>

Mitbreit (1978)

Frecuencia senoidal de 50 Hz

Thielemann (1978)
Bogdanovich (1974)

Emplean la R.N.M. para seguimiento de la progresión de la osteogénesis

cos que normalmente se emplean para estas terapias, podríamos usar unos simples y baratos 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), descritas en (9 y 10). 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. 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 tratamien-

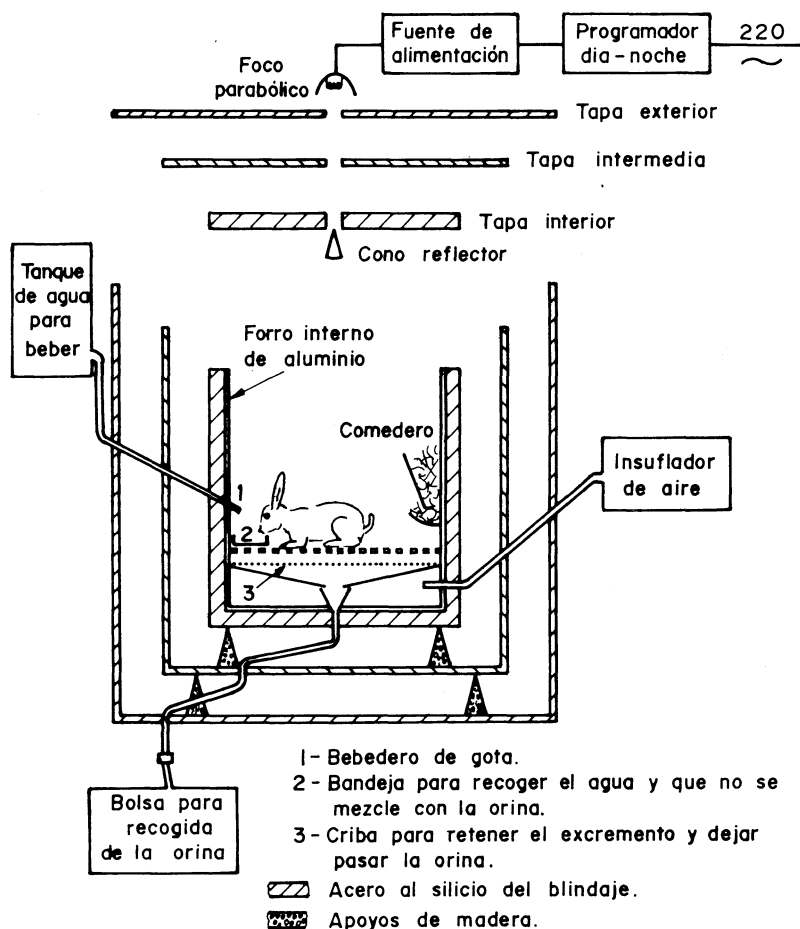


FIG. 3.- Corte esquemático de la jaula con el campo magnético terrestre apantallado, utilizada para realizar nuestros experimentos.

to 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 3, 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. 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).

En la fig. 5 pueden verse unas reproducciones de una radiografía de la zona coxígea de un conejo antes de iniciar un experimento y en el máximo de la calcemia producida por la ausencia del campo magnético terrestre; puede verse que los huesos que perdieron el calcio se han vuelto osteoporósicos al haber conservado calcio sólo justo debajo del periosteo, dando lugar al característico «hueso de cristal» de los ancianos.

Nuestra hipótesis era pues 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*. La primer consecuencia de este aserto es que los resultados experimentales publicados en la literatura técnica han de ser valorados teniendo en cuenta que *además* del campo magnético creado por el equipo electrónico, estuvo actuando el campo magnético terrestre, de influencia nada despreciable.

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

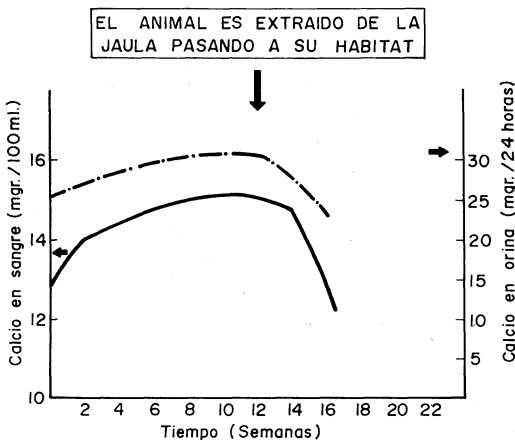


FIG. 4.—Gráfica de la evolución del calcio en orina y sangre de un conejo, debido solamente a su permanencia en ausencia del campo magnético terrestre.

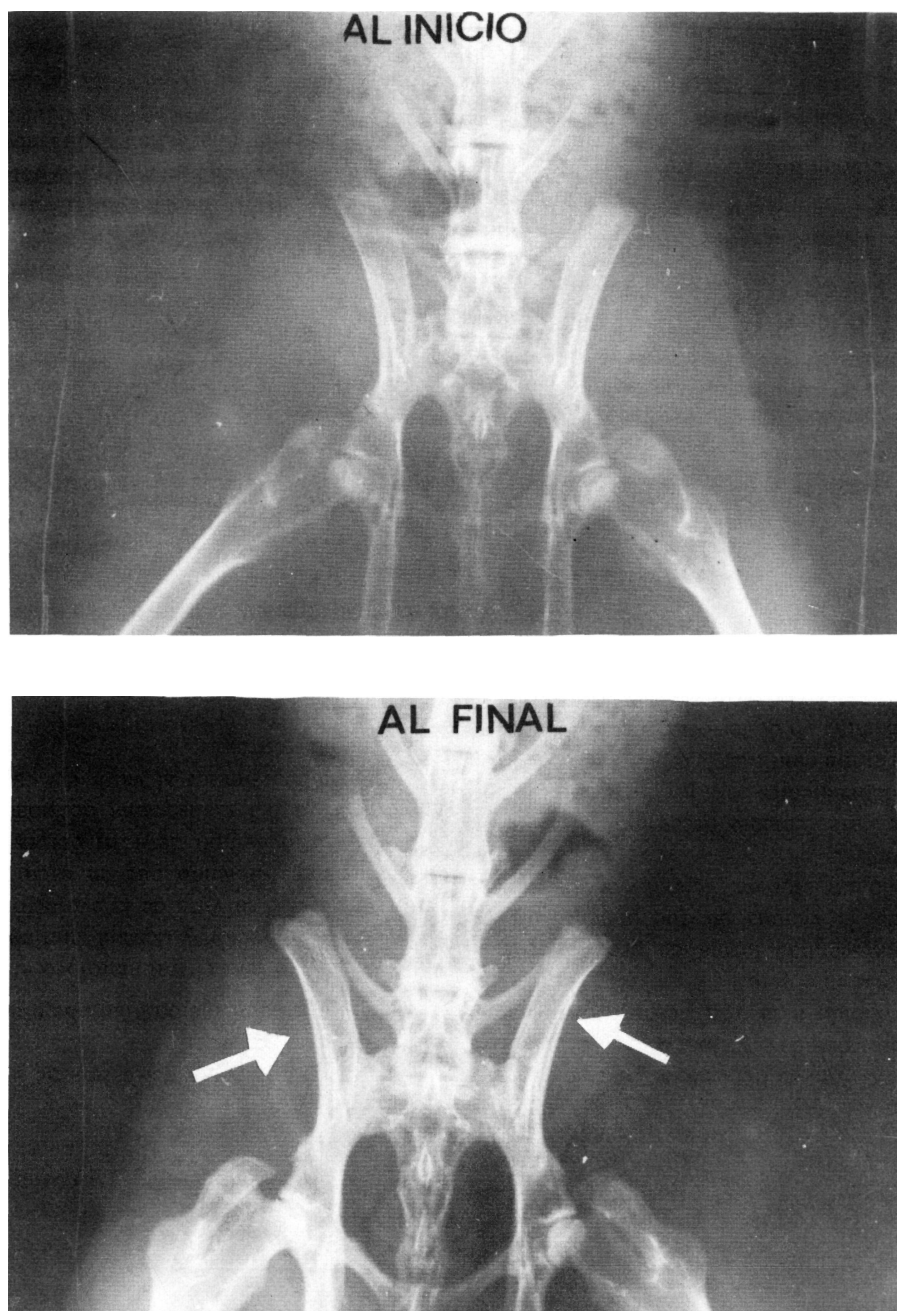


FIG. 5.-Evolución radiológica de la zona coxígea de un conejo sometido a permanencia en una zona limpia del campo magnético terrestre.

vir 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 en-

sayar huesos de extremidades amputadas por cualquier circunstancia. Los resultados experimentales están expuestos en la figura 6, 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.

– Osteoblastos o fibroblastos evolucionados, de forma muy alargada, que constituyen el almacén 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 pe-

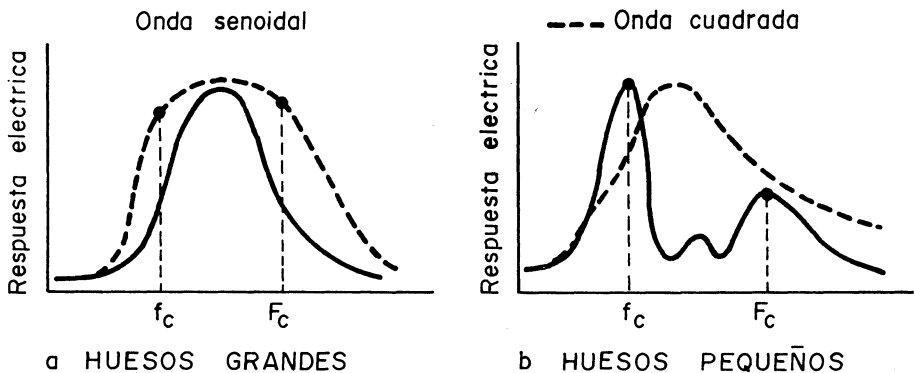


FIG. 6.— Respuesta eléctrica de los huesos vivos sometidos a un campo magnético alterno.

queño 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. (11), donde, apoyándose solamente en las ecuaciones de Maxwell, (cuatro ecuaciones de la Física que compendían 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 esfericidad, 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 osteo-

génesis mediante campos magnéticos exógenos, que recoja la filosofía que acabamos de exponer.

IV. Diseño de un equipo ideal para magnetosteogenia

Está claro que el ideal es un equipo pluralente 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

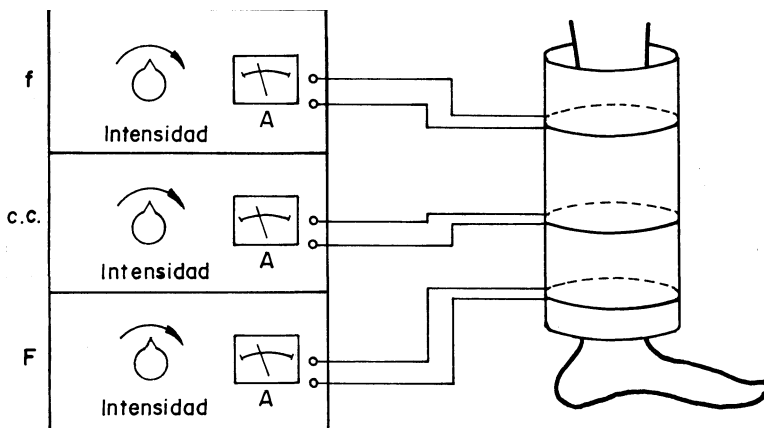


FIG. 7.- Arquitectura de un equipo sencillo con tres devanados independientes.

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 podemos 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 como la mostrada en la figura 7. Vamos a elegir las tres frecuencias.

a) Huesos pequeños (fig. 6.b)

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

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

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

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. (Llamamos B_1 a 0'5 Gauss, una densidad de flujo magnético similar al valor del campo magnético terrestre).

b) Huesos grandes (fig. 6.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 6 se ve fácilmente la estrategia. Aquí no tenemos una «alta» y otra «baja»,

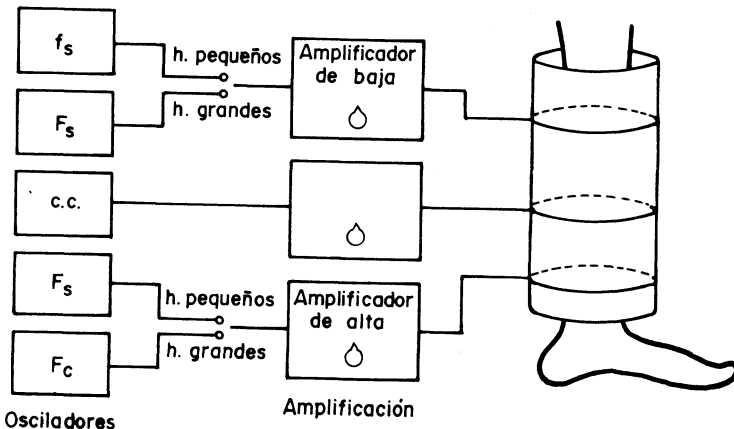


FIG. 8.- Arquitectura real del equipo polivalente con tres devanados.

sino dos «equivalentes», de modo que aunque se 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 8.

La arquitectura del equipo que acaba-

mos de describir es lo mínimo que debe contener un equipo portátil que cubra los requerimientos mínimos para, de acuerdo con la filosofía expuesta, posibilitar la evolución optimizada del campo terapéutico de acuerdo con la marcha del proceso osteogénico.

Aún puede irse a una mayor eficacia en el diseño, sobre todo pensando en equipos de hospital, cuyo costo puede ser más elevado, destinado a casos muy difíciles. Se trata simplemente de cubrir la posibilidad de prudentes desplazamientos hacia la derecha o hacia la izquierda de las curvas de la fig. 6.

Ello puede hacerse trabajando con cinco espiras, es decir, con una arquitectura como la esquematizada en fig. 9, siendo entonces las frecuencias las indicadas en la Tabla II. Los equipos trabajan normalmente a las frecuencias f_1 , f_2 y F_1 y F_2 aunque conviene disponer de la posibilidad de incrementar o de reducir levemente estos valores, a fin de poder contrarrestar un leve desplazamiento de los picos en cada caso.

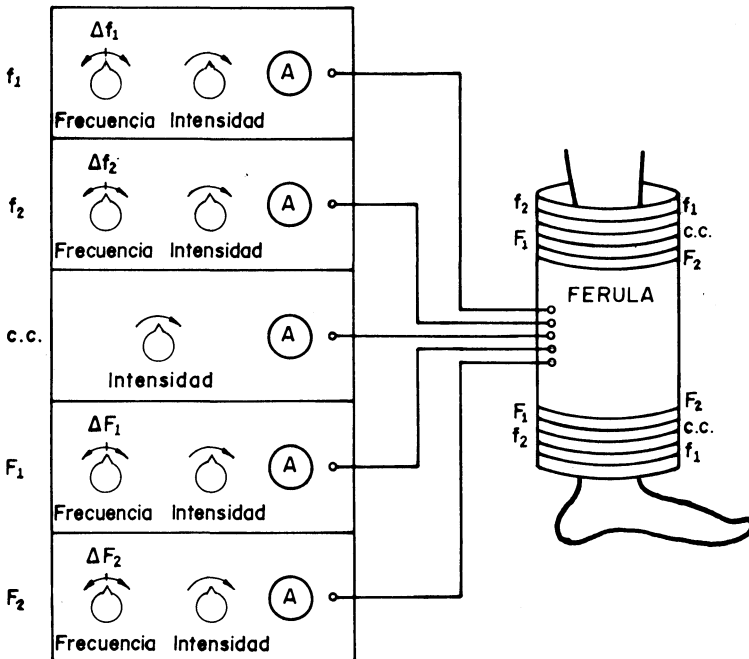


FIG. 9.- Arquitectura de un equipo polivalente con cinco espiras.

V. Realización práctica de un equipo para utilización clínica

Una vez trazada la arquitectura de un equipo ideal que contempla la aplicación óptima de todas las posibilidades, vamos a intentar explicar la realización práctica de un equipo portátil de utilización domiciliaria, introduciendo las modificaciones que sean precisas para que pueda realizarse, con una electrónica de costo asequible, y con una seguridad total de utilización sin peligro

de accidentes. En la fig. 10 mostramos su aspecto exterior.

En lo que sigue vamos a exponer, no unos complicados cálculos de diseño que estarían fuera de lugar, sino unas sencillas valoraciones numéricas, que nos van a dar solamente un orden de magnitud de las dificultades que van a determinar la configuración final de un mínimo equipo clínico para utilización domiciliaria.

Empecemos por las férulas. En la fig. 11-a mostramos un esquema *de lo que tiene que*

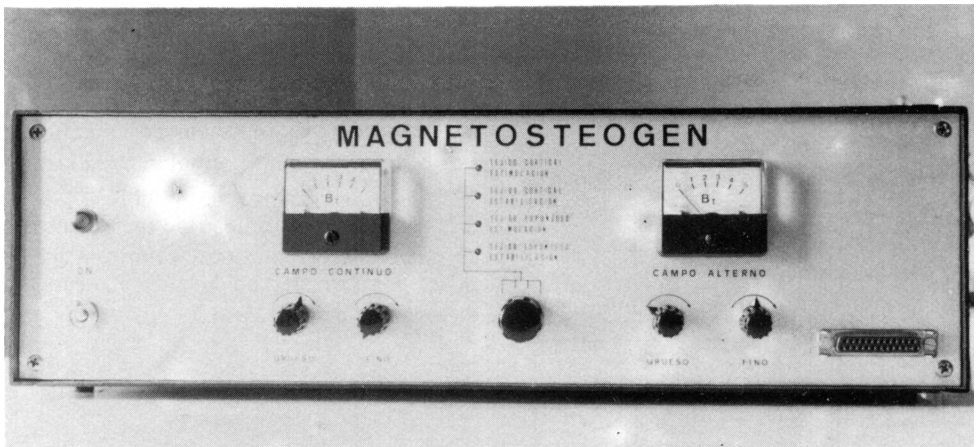


FIG. 10.- Equipo comercial portátil para la estimulación de la osteogénesis mediante aplicación de campos magnéticos, del tipo basado en férulas acopladas en resonancia.

TABLA II

Frecuencias de trabajo de un equipo a cinco espiras independientes como se muestra en fig. 9

		Onda cuadrada	Onda senoidal
f_1 (en Hz)	Mínimo	4.000	10.400
	Normal	5.500	10.500
	Máximo	7.000	10.600
f_2 (en Hz)	Mínimo	15.000	16.300
	Normal	16.500	16.500
	Máximo	18.000	16.700
f_1 (en Hz)	Mínimo	27.500	26.400
	Normal	29.000	26.500
	Máximo	30.500	26.600
f_2 (en Hz)	Mínimo	38.500	
	Normal	40.000	45.500
	Máximo	41.200	

ser una férula para aplicar un campo magnético al muslo de un paciente. Tiene que ser ni más ni menos que un cilindro de material eléctricamente aislante conteniendo a un solenoide, al que alimenta un equipo electrónico que genera las tensiones adecuadas y suministra la potencia que se necesite.

Como queremos que con una corriente máxima de 0'5 Amp. (un oscilador que entregase más corriente sería voluminoso y caro) se consiga un campo de 5 B_T (es decir,

2'5 Gauss o sea, 2'5.10⁻⁴ Teslas), aplicamos

$$B = 9 \cdot 10^{-7} \frac{NI}{R}$$

donde:

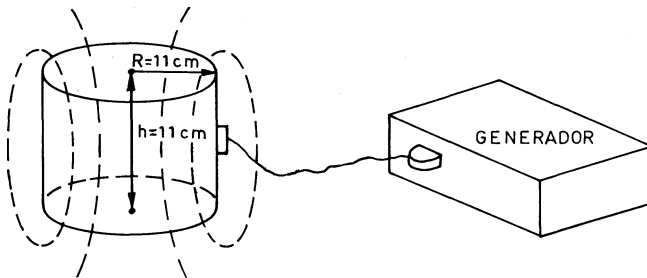
B = campo magnético a conseguir
 ≈ 2'5.10⁻⁴ Teslas.

R = radio de la férula = 11 cm.

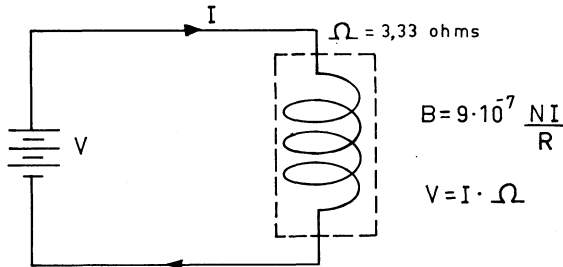
h = altura de la férula = 11 cm.

I = intensidad que da lugar a B = 5 B_T.

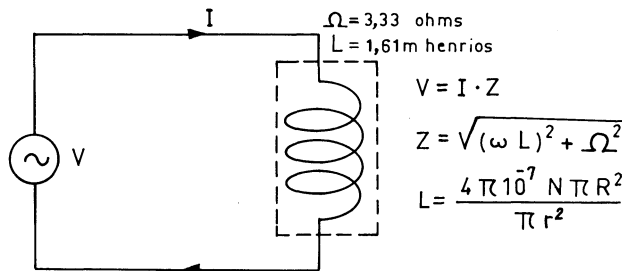
Le hemos fijado I = 0'5 A.



a) una posible geometría de la férula.



b) funcionamiento en continua.



c) funcionamiento en alterna.

FIG. 11.- Esquema eléctrico de una férula para aplicación de campo magnético al muslo de un paciente.

N = número de espiras que deben constituir el Solenoide.

Con estos datos nos sale N = 61 espiras. Estas espiras estarán constituidas, por ejemplo, de hilo de cobre para bobinar de un grueso de 0'5 mm. Lo cual dará lugar a una resistencia ohmica.

$$\Omega = \delta \frac{\text{longitud}}{\text{sección}} = \frac{2 \pi R \cdot N}{r^2}$$

siendo:

δ = resistividad eléctrica del cobre = $1'55 \cdot 10^{-6} \Omega \text{ cm}$.

R = radio de la férula = 11 cm.s

N = número de espiras = 61.

r = radio del hilo de cobre = 0'25 mm.

Realizando el sencillo cálculo se obtiene $\Omega = 3'33$ ohms. Es decir, si solamente fuésemos a originar campo magnético continuo, nos bastaría como generador una fuente de tensión continua que suministrara V = I.R. = $0'5 \cdot 3'33 \approx 1'66$ Volts. con una potencia de W = V.I. = $1'66 \cdot 0'5 = 0'83$ watos. Podría ser una fuente sencillísima y económica.

Pero el problema es que bobinados como éste han de ser recorridos por corriente alternas. La bobina presenta entonces, además de la resistencia ohmica, una autoinducción que vale

$$L = \frac{\mu_0 N^2 \pi R^2}{h}$$

siendo:

μ_0 = permeabilidad magnética del vacío
= $4 \pi \cdot 10^{-7}$.

N = 61

R = 11 cm

h = 11 cm

Realizando el sencillo cálculo sale

L = $1'61 \cdot 10^{-3}$ H (1'61 mili henrios).

Vamos a calcular ahora las características del generador que se necesitaría, de acuerdo con fig. 11.c. En el caso, por ejem-

plo, de tratamiento de huesos pequeños, habría que llegar a f = 45 kHz, como ya dijimos. A esta frecuencia la impedancia de la férula será

$$Z = \sqrt{(\omega L)^2 + \Omega^2} = \sqrt{(2 \pi f L)^2 + 3'33^2} \approx 455 \text{ ohm}$$

lo cual exigiría de nuestro generador una tensión

$$V = Z \cdot I = 455 \cdot 0'5 = 227 \text{ Voltios.}$$

con una potencia:

$$W = V \cdot I \cdot \cos \varphi$$

pero como

$$\varphi = \text{arc tg} \frac{2 \pi f L}{\Omega} = \text{arc tg}$$

$$\frac{2 \pi \cdot 45 \cdot 10^3 \cdot 1'61 \cdot 10^{-3}}{3'33} \approx 89^\circ$$

sale

$$W = 227 \cdot 0'5 \cdot \cos \varphi = 0'83 \text{ watos.}$$

Existe además un término de potencia reactiva que no tomamos en cuenta.

Un generador, aunque solamente sea de 0'83 watos, al requerir salida de 227 Volts. a 45.000 Hz, sería realmente muy costoso, por requerir componentes no habituales. Evidentemente hay que simplificar el problema.

Vamos a basarnos en un circuito resonante, por lo que vamos a explicar en qué consiste y porqué nos va a ahorrar potencia.

En la fig. 12.a representamos como es la descarga de un condensador cuando entrega su energía a la resistencia exterior. Por el contrario, cuando aplicamos una tensión a una bobina (fig. 12.b) aparece un frenado de la corriente decreciente en el tiempo, del campo magnético en el entorno de las espiras. Si ahora asociamos un condensador cargado y una bobina (fig. 12.c) nos encontraremos con la siguiente secuencia:

1.º El condensador consigue descargarse

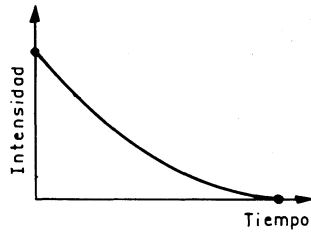
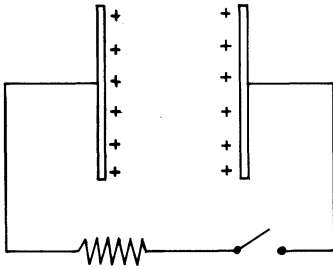
a través de la bobina, dejando a ésta envuelta en un campo magnético.

2.º Al acabar la corriente originada por el condensador el campo alrededor de las espiras ha de desaparecer. Se deslíe generando una prolongación de corriente que carga al condensador.

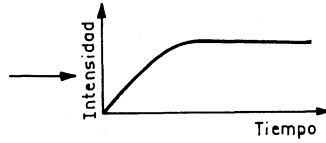
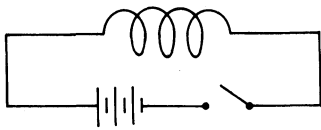
3.º El condensador cargando inicia su proceso de descarga, repitiéndose el ciclo una y otra vez.

Estamos pues en una situación de resonancia que produce unas oscilaciones amortiguadas como se indica en fig. 12.c. La frecuencia tiene *siempre* un valor que depende solamente de los valores L y C, aunque su amplitud decrece paulatinamente por efecto del consumo energético que tiene lugar en la inevitable pequeña resistencia eléctrica del hilo de cobre de la bobina.

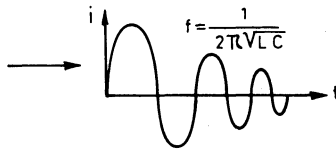
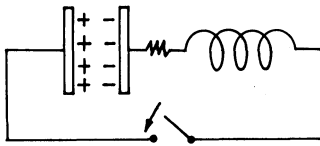
Alimentando con un generador de alterna



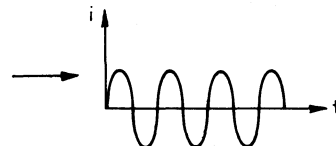
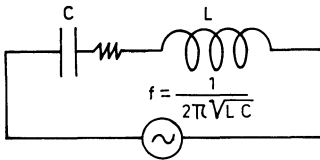
a) descarga de un condensador a través de una resistencia pura.



b) paso de una corriente a través de un Solenoide.



c) generación de oscilaciones amortiguadas.



d) generación de oscilaciones mantenidas.

FIG. 12.- Generación de oscilaciones eléctricas por resonancia LC.

(fig. 12.c) cuya frecuencia sea *justamente* la de resonancia, la autoinducción y la capacidad *desaparecen* como elementos resistivos. El generador de señal no distingue, para esta frecuencia entre $\Omega + L + C$ y Ω solamente. Estamos en la situación óptima de solamente la bobina de continua. Igual sucede en el símil mecánico de la fig. 13. Aportando pequeños impulsos, con la *cadencia adecuada*, logramos que un columpio o péndulo permanezca en situación de oscilación mantenida, puesto que los cadenciosos aportes

energéticos se consumen en contrarrestar solamente la fricción.

La arquitectura del equipo clínico está ahora clara, y es mostrada en fig. 14 para el caso simplificado de que construyésemos solamente dos férulas para aplicar respectivamente en muslo y brazo (lo lógico es que la geometría de la férula se adapte lo más posible a la geometría de la zona del miembro a tratar). Evidentemente ambas tendrán diferente autoinducción, por ejemplo L_1 y L_2 . Suponemos que queremos aplicar con

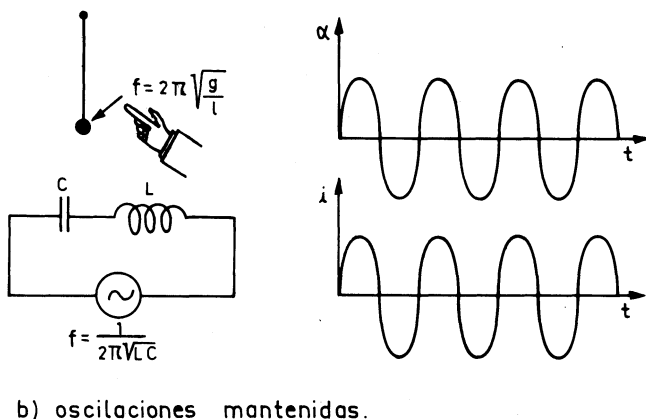
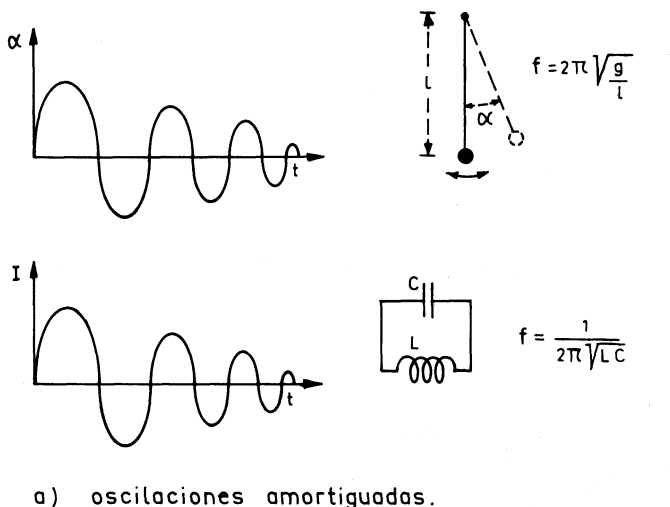


FIG. 13.— Paralelismo entre las oscilaciones mantenidas de un péndulo simple y un circuito resonante LC.

ellas las frecuencias f de estimulación y la frecuencia F de estabilización según el caso, de acuerdo con la secuencia del tratamiento por magnetosteo-genia.

Cuando queramos utilizar la férula para el muslo conectaremos en la salida [1], mientras que cuando queramos utilizar la férula para el brazo conectaremos a la salida [2] del aparato. Cuando queramos dar tratamiento de estabilización en muslo cerraremos el contacto F_1 . Cuando queramos dar tratamiento de estabilización en brazo cerraremos el contacto F_2 . Cuando queramos estimular en muslo cerraremos el contacto f_1 , mientras que cuando queramos estimular en brazo cerraremos el contacto f_2 .

Es importante recalcar que con estas arquitecturas basadas en circuitos resonantes, *solamente* se pueden producir campos magnéticos *senoidales*, pues jamás se pueden

generar con estos sistemas ondas cuadradas de corriente.

La arquitectura final de los equipos se muestra en la fig. 15, donde se han suprimido detalles de conmutación múltiple que aparentemente se realizan como si fuese una conmutación sencilla. El equipo dispone de cuatro férulas para muslo, pierna, brazo y antebrazo. Las frecuencias con las que se puede trabajar en cualquiera de las férulas están indicadas en la Tabla III. Como puede verse, hemos cambiado las denominaciones «hueso grande» y «hueso pequeño» por «tejido óseo cortical» y «tejido óseo esponjoso» ya que era la identidad celular mayoritaria de las células la que determinaba la respuesta eléctrica de los huesos, no su geometría. En un tercio medio de fémur, por ejemplo, emplearemos bajo denominación «tejido óseo cortical» la frecuencia que

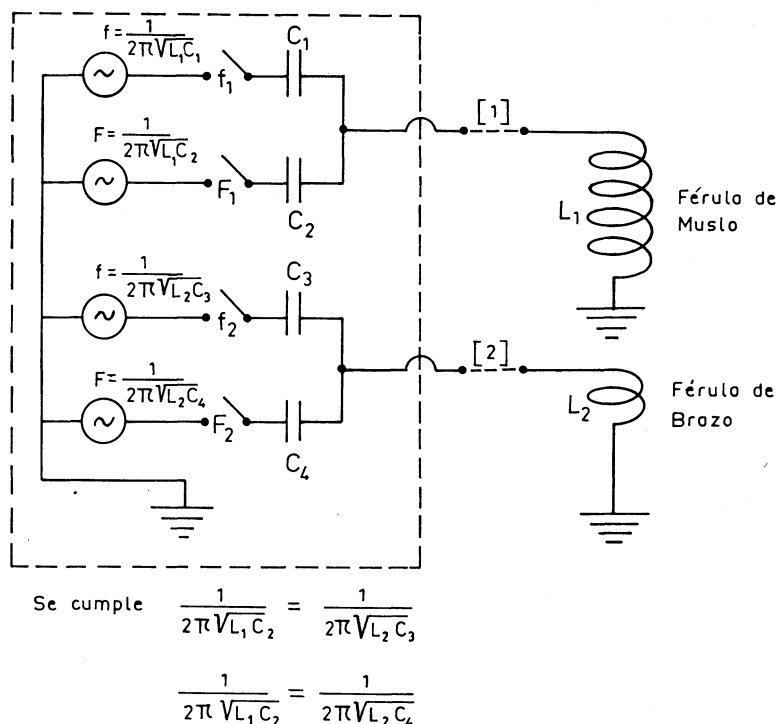


FIG. 14.- Esquema básico de un equipo con dos férulas con las que se desea poder aplicar las frecuencias f y F .

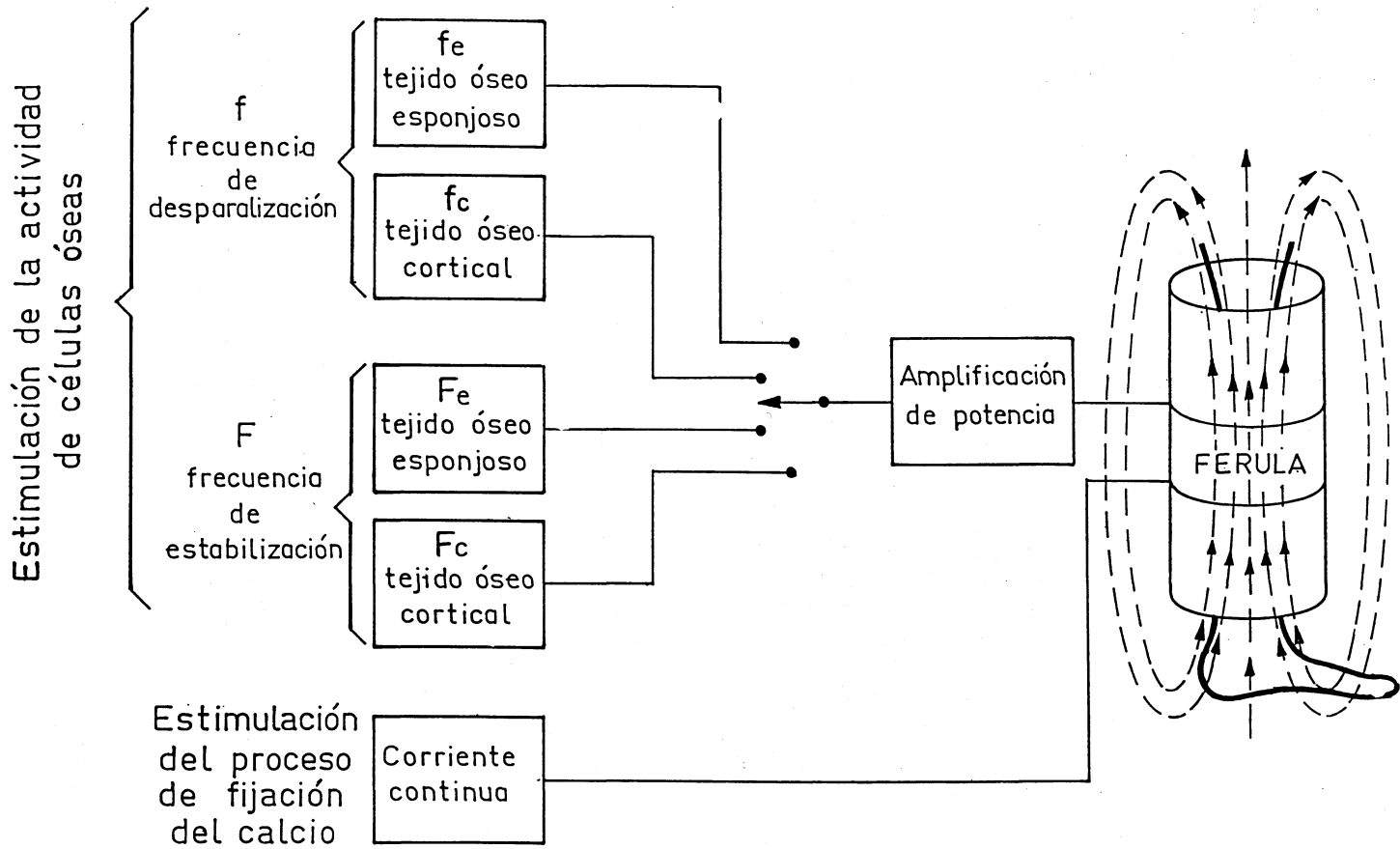


FIG. 15.- Arquitectura de un equipo portátil como el mostrado en fig. 10.

TABLA III

Frecuencias que el equipo de la fig. 10 aplica a través de cualquiera de sus cuatro férulas

Utilización	Frecuencia en Hz
Estabilización de tejido óseo esponjoso	45.000
Desparalización de tejido óseo esponjoso	10.500
Estabilización de tejido óseo cortical	19.000
Desparalización de tejido óseo cortical	10.400

según la denominación anterior correspondía a «hueso grande», mientras que en una falta de consolidación en diáfisis del mismo hueso, puede interesar utilizar la frecuencia que antes asignábamos al «hueso pequeño» dado que puede corresponder a una zona de tejido óseo cortical.

En modo alguno la idea de estos equipos resonantes portátiles indican que las arquitecturas complejas como la de la fig. 9 son desechables por superfluas. Simplemente que la realización de un sistema completo conduce a unos costos y a una sofisticación de los equipos electrónicos que los hace inasequibles como equipos portátiles, sencillos, para utilización domiciliaria.

VI. Próximos desarrollos y perspectivas futuras

El brillante capítulo de la utilización terapéutica de los campos magnéticos aparece cada vez como una utilísima técnica no invasiva con cada vez más amplio horizonte de aplicaciones. Desarrollada inicialmente para resolver retardos de consolidación ósea, se utiliza cada vez más en problemas afines de fallos de tejidos óseos, como por ejemplo en la fijación de prótesis internas porosas, lo que ha supuesto la posibilidad de iniciar el abandono de cementos acrílicos, con sus secuelas de problemas. En la cirugía maxilofacial y odontología (12) las perspectivas aparecen claras.

En cuanto a la utilización tradicional en problemas de retardos de consolidación, aunque está realmente conseguida, cabe espe-

rar próximos perfeccionamientos que consigan aplicación satisfactoria en cotas más próximas al 100 por 100, ya que últimamente al menos, es posible una mejor valoración de los resultados y, como acabamos de ver, tenemos las ideas más claras en lo que se refiere a la naturaleza íntima del proceso. Ya no se identifican, como erróneamente se hacía hasta hace bien poco, la corriente impuesta por electrodos (técnica invasiva de electrodos y pila implantados) con la corriente inducida por los impulsos de campo magnético (4).

Está completamente clara la evidencia de que el campo magnético terrestre juega un papel decisivo en el metabolismo del calcio

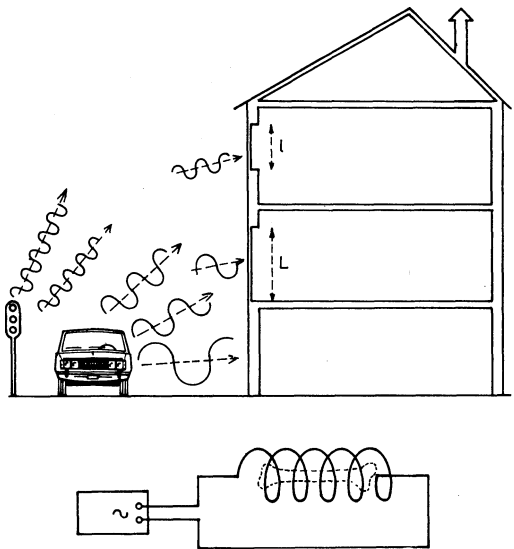


FIG. 16.- Similitud entre la absorción de la energía acústica por un edificio y la absorción de la energía electromagnética por un hueso viviente.

óseo humano. Unos zoólogos ingleses (13) han encontrado minúsculos depósitos lenticulares de magnetita (Fe_3O_4) en capas próximas al periosteo en huesos faciales humanos. A lo mejor aquí está la clave de porqué algunos pacientes presentan un retardo de consolidación ósea; posiblemente sean deficitarios en depósitos subperiosteales de magnetita. Una vez más, al hombre le hace más falta el hierro que el oro.

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 frente de combate contra la osteoporosis de los ancianos.

Una vez más ha vuelto a repetirse la vieja historia medieval relatada por el Conde Lucanor, 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 tan concienzudamente 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 alterno

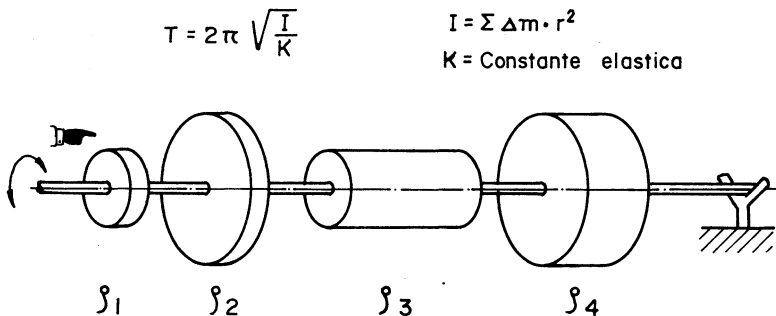
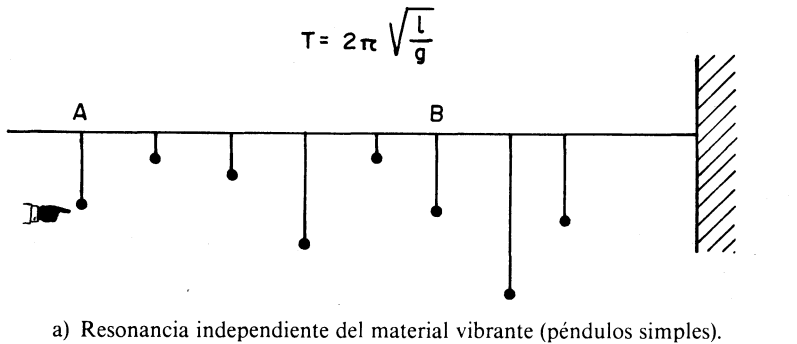


FIG. 17.- Ilustración sobre diferentes respuestas de la materia a la vibración mecánica.

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. 16) 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 17. En la figura 17.a vemos como sólo los péndulos A y B se intercambian energía oscilante, siendo el factor determinante 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-esféricas.

Si el fenómeno fuese más complejo, como por ejemplo en los péndulos de la figura 17.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.

BIBLIOGRAFIA

1. WARNKE, U.; WARNKE, V. (1983): «Storia dell'impiego terapeutico di campi magnetici». Capítulo incluido en el texto de F. Bistolfi «Campi magnetici in Medicina». Edizioni Minerva Medica (Torino).
2. DUBROV, A. P. (1978): «The geomagnetic field and life». Plenum Press (New York).
3. RIVA SANSEVERINO, E. (1983): «Interazioni ipotizzabili tra campi magnetici pulsanti e membrane biologiche». Capítulo incluido en el texto de F. Bistolfi «Campi magnetici in Medicina». Edizioni Minerva Medica (Torino).
4. BASSETT, C. A. L. (1982): «Pulsing electromagnetic fields: A new method to modify cell behaviour in calcified and non calcified tissues». *Calcified Tissue International*, 34, 1-8.
5. BASSETT, C. A. L.; PAWLUK, R. J.; PILLAR, A. A. (1974): «Acceleration of fracture repair by electromagnetic fields. A surgical non invasive method». *Annals of New York Academy of Sciences*, 238, 242-262.
6. BASSETT, C. A. L.; PAWLUK, R. J.; PILLAR, A. S. (1974): *Science*, 184, 575-577.
7. BASSETT, C. A. L.; MITCHELL, S. N.; GASTON, S. R. (1981): «Treatment of ununited tibial diaphyseal fractures with pulsing electromagnetic fields». *Journal of Bone and Joint Surgery*, 63A, 511-523.
8. BASSETT, C. A. L.; PAWLUK, R. J. (1975): «Non-invasive methods for stimulating osteogenesis». *Journal Biomedical Materials Research*, 9, 371-374.
9. GRIGORIEV, SU. G. (1981): «Experimental biology and medicine in space». *Endeavour, New Series*, 5, 147-151.
10. PLANEL, H. (1982): «La biologie en apesanteur». *La Recherche*, 133, 598-600.
11. BELTRAME, F.; CHIABRERA, A.; GRATARDA, M.; GUERINI, P.; PARODI, G.; PONTA, D.; VERNAZZA, G.; VIVALDI, R. (1980): «Electromagnetic control of cell functions». *Alta Frequenza*, 49, 101-114.
12. VAN DER KEIJ, P. (1981): «Reducing residual ridge reduction». Ph Thesis. Dept. of Prosthodontics, Materials Science and Experimental Medicine. Amsterdam. Free University.
13. BAKER, R. R.; MATHEV, J. G.; KENNAUGH, J. H. (1983): «Magnetic bones in human sinuses». *Nature*, 301, 78-80.