

UF9

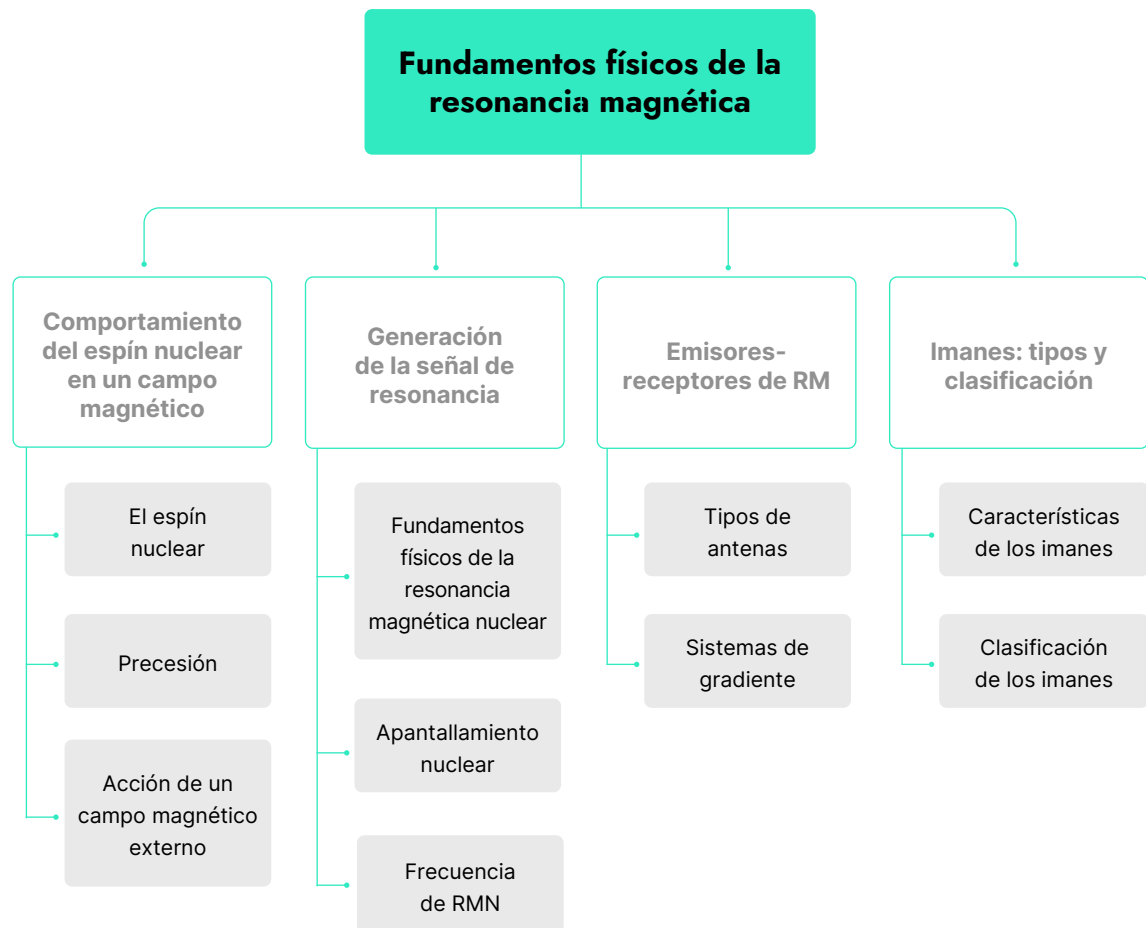
Fundamentos físicos de la resonancia magnética

Fundamentos físicos y equipos

ÍNDICE

Mapa conceptual	03
1. Comportamiento del espín nuclear en un campo magnético.....	04
1.1. El espín nuclear	04
1.2. Precesión	05
1.3. Acción de un campo magnético externo	05
2. Generación de la señal de resonancia.....	07
2.1. Fundamentos físicos de la resonancia magnética nuclear (RM)	07
2.2. Apantallamiento nuclear	09
2.3. Frecuencias de RMN	09
3. Imanes. Tipos y clasificación	10
3.1. Características de los imanes	11
A. Intensidad del campo magnético	11
B. Homogeneidad	11
3.2. Clasificación de los imanes	11
A. Permanentes	11
B. Electroimanes	11
4. Emisores-receptores de resonancia magnética.....	14
4.1. Tipos de antenas	14
4.2. Sistemas de gradiente	15

Mapa conceptual



Comportamiento del espín nuclear en un campo magnético

01

1.1. El espín nuclear

El **espín** es una propiedad de las partículas atómicas (electrones, protones y neutrones). Al igual que los electrones, al circular por una bobina generan un campo magnético en una dirección determinada, y lo mismo ocurre cuando estos giran alrededor del núcleo de un átomo, generando un campo magnético con un determinado **momento angular**. El momento angular es una magnitud física que representa la cantidad de movimiento y rotación de un objeto, y todas las partículas subatómicas tienen un momento angular intrínseco cuyo valor no se modifica. El espín es el cuarto número cuántico de la función de onda de cada una de las partículas atómicas anteriores, el cual indica su momento angular, y solo puede tener dos valores: $-1/2$ o $+1/2$.

En el caso de los electrones, hay una clara distinción entre su espín y su momento angular orbital; ambos se combinan para dar el momento angular total. En el caso de los núcleos atómicos, actúan como un conjunto de las partículas que los componen, por lo que tienen un **momento angular intrínseco (I)** que provoca un momento de inercia que hace girar al núcleo. Por tanto, los espines nucleares de protones y neutrones se tratan de forma similar a los espines de los electrones, y poseen un momento magnético asociado, que es mucho menor que el del electrón.

Solo aquellos elementos que tengan núcleos con un espín diferente a cero podrán experimentar el fenómeno de la resonancia cuando sobre ellos actúe un campo magnético externo. El elemento que cumple todos estos requisitos es el **hidrógeno**.

Ferromagnetismo	Paramagnetismo	Diamagnetismo
Los espines se encuentran paralelos unos a otros. El aumento de temperatura los desordena. Son atraídos hacia los imanes.	Su magnetismo es estable, pero se magnetiza en presencia de un campo magnético externo, debido a la presencia de electrones desapareados, y en el mismo sentido que el campo externo. Si desaparece el campo magnético externo, desaparecen sus propiedades magnéticas.	Son repelidos por los campos magnéticos. Tienen todos sus electrones apareados y su magnetización es débil y en sentido opuesto al campo magnético externo.

Esquema 1. Diferencias en los materiales según sus propiedades magnéticas. Las exploraciones mediante RM se basan en el paramagnetismo, pero el resto pueden influir en determinadas ocasiones.

Cuando l no es nulo, el núcleo atómico presenta un momento angular de espín y un **momento magnético asociado (μ)** que depende de la dirección del espín. El momento del espín de un núcleo puede valer entre $+l$ y $-l$, en números enteros, y es el **número cuántico magnético (m)**. El número total de estados posibles del momento angular es $2l+1$. El momento magnético es la magnitud vectorial generada por el movimiento del núcleo al girar sobre sí mismo. Momento magnético y momento angular son proporcionales y se relacionan mediante la siguiente ecuación:

$$\mu \text{ (MHz/tesla)} = \gamma l \text{ (}\gamma \text{ es la constante giromagnética)}$$

1.2. Precesión

La **precesión** es el movimiento que experimenta el eje de rotación de un cuerpo asociado con la dirección en el espacio. Es ese «cabeceo» o «tambaleo» que podemos observar, por ejemplo, cuando una peonza pierde la verticalidad respecto al suelo y empieza a torcerse mientras gira. Este mismo fenómeno también se produce en el planeta Tierra al girar y en los núcleos atómicos. La precesión se produce debido a la interacción entre el espín y un campo magnético externo. El campo magnético externo crea una fuerza perpendicular al momento angular de espín de los átomos de H, originando así un movimiento circular rotatorio, denominado movimiento de precesión. Este movimiento de precesión se produce con una frecuencia específica para cada elemento químico.

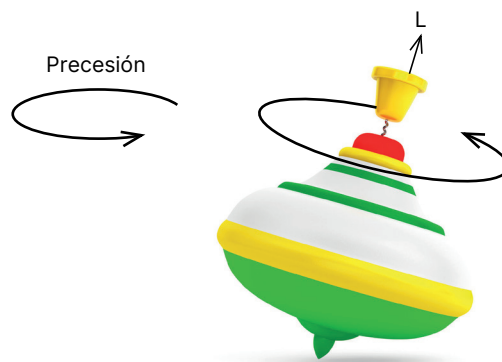


Fig. 1. Movimiento de precesión de una peonza. Con los espines nucleares ocurre algo parecido.

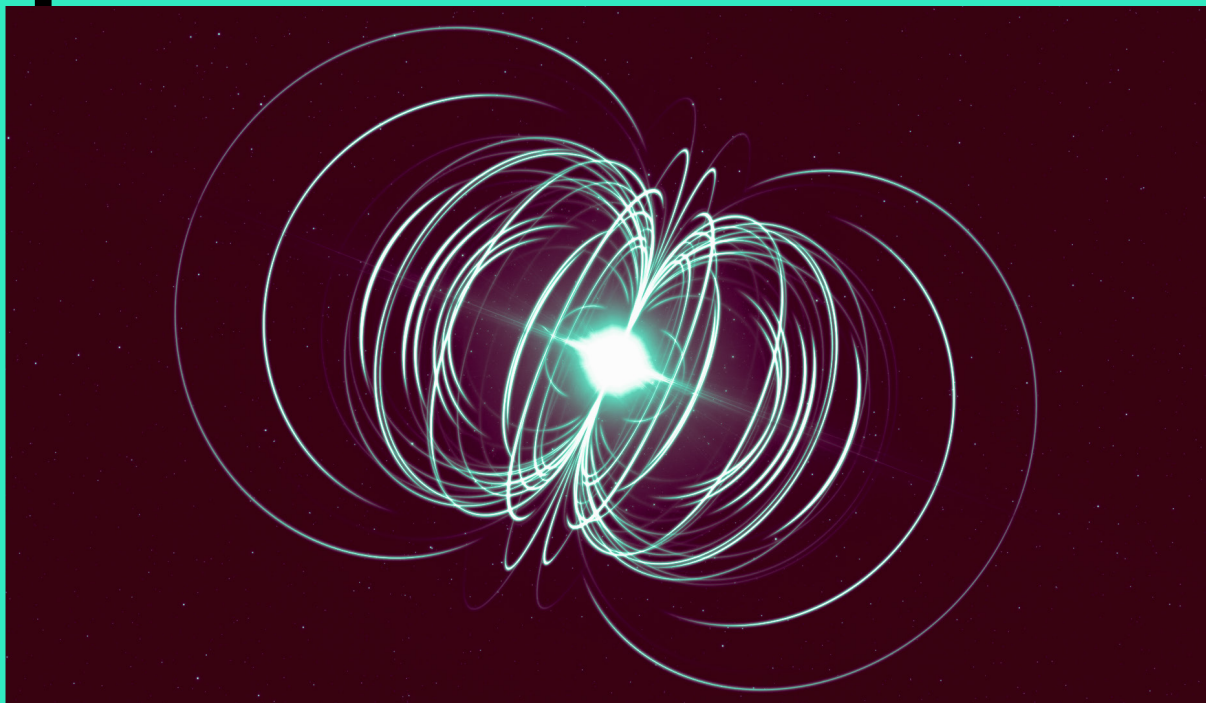
1.3. Acción de un campo magnético externo

El **momento angular del espín nuclear** está cuantizado, tanto respecto a la magnitud como a la orientación; es lo que definíamos anteriormente como m . Si consideramos un núcleo cuyos dos estados posibles de espín (m) sean $+1/2$ o $-1/2$, las energías de ambos estados son degeneradas, es decir, son las mismas, por lo que los números de átomos (poblaciones) en sendos estados serán iguales en equilibrio térmico.

Cuando colocamos un núcleo bajo la influencia de un **campo magnético (B_0)**, la interacción entre el momento magnético (μ) y el campo externo hará que los dos estados de espín posibles no tengan la misma energía. Estos diferentes estados nucleares del espín tendrán diferentes energías en un campo magnético distinto de 0, y los dos estados se alinean a favor o en contra del campo magnético, generándose una diferencia de energía entre ambos.

Esta diferencia, al ser excitada por una radiación electromagnética de la misma frecuencia, genera **resonancia**. La absorción de esta radiación ocurre cuando la frecuencia (ν) de un fotón coincide con una de las radiofrecuencias del espectro electromagnético.

1 CASO PRÁCTICO



A GRAN ESCALA

En el epígrafe anterior hemos visto cómo la Tierra sufre también precesión, al ser un objeto que gira, pero este no es el único punto en común con los espines nucleares. ¿Qué otras características o elementos comparten nuestro planeta y un conjunto de partículas subatómicas?

SOLUCIÓN

Al ser objetos que giran, ambos tienen un momento angular y, por tanto, un momento de inercia. El espín nuclear tiene un momento magnético asociado, al igual que la Tierra, que puede incluso generar su propio campo magnético. Por la precesión, ambos sufren nutación, es decir, la oscilación del eje de giro.

02 Generación de la señal de resonancia

2.1. Fundamentos físicos de la resonancia magnética nuclear (RM)

Como hemos visto anteriormente, cuando el momento magnético nuclear asociado al espín nuclear es colocado bajo la acción de un campo magnético externo, a cada estado de espín le corresponde una **energía potencial magnética** diferente que depende de la orientación del dipolo magnético dentro del campo externo. Esto provoca la **polarización del espín nuclear**, que en el caso de los protones se dirigen hacia la dirección del campo magnético, sufriendo una pequeña magnetización y un alineamiento con el campo magnético externo de mínima energía potencial. Esta alineación o polarización no es uniforme, pudiéndose encontrar los núcleos, en nuestro caso es el núcleo de hidrógeno el cual está representado por un solo protón, en un mayor o menor nivel energético, siendo el último el más frecuente. El hidrógeno está presente en las células de los seres vivos en gran medida; y su núcleo es ligero; de ahí su importancia.

Una señal de radiofrecuencia con una ν apropiada puede inducir la **transición** entre los diferentes estados del espín, la cual provoca que algunos de los espines se coloquen en su estado de energía más alto. Al desconectarse la señal de radiofrecuencia que provocaba este cambio, los espines sufren una relajación hasta que vuelven a su estado de energía más bajo, emitiendo una pequeña cantidad de radiación de radiofrecuencia, la cual se detecta y se mide. A este proceso se le denomina **resonancia magnética nuclear (RMN)**. El momento magnético del espín de un electrón es opuesto a la dirección de su espín; sin embargo, en el caso de los protones se encuentran en la misma dirección. En ambos casos el espín tenderá a la **precesión** alrededor del campo magnético emitiendo una frecuencia determinada llamada **frecuencia de Larmor**, que teniendo en cuenta la diferencia de energía potencial magnética $h\nu = 2\mu B$, la frecuencia angular asociada a un cambio de espín se define de forma general con la siguiente fórmula:

$$\omega = \gamma B$$

La precesión de los espines y la frecuencia emitida por la misma es lo que se detecta en la RMN. La emisión de esta radiación durante la precesión de los espines está asociada a la relajación de los mismos desde sus estados excitados. Hay dos constantes de tiempo diferentes para este decaimiento en el estado de los espines:

TEJIDO/ÓRGANO	T ₁ (MS)	T ₂ (MS)
Grasa	180	40
Hígado	270	50
Corteza renal	360	70
Materia blanca	390	80
Bazo	480	90
Materia gris	520	90
Músculo	600	100
Médula renal	680	140
Sangre	800	180
Fluido cerebroespinal	2000	300
Agua	2500	2500

Tabla 1. Valores de las constantes de relajación para diferentes tejidos u órganos.

Tras alterar o perturbar los átomos con pulsos de radiofrecuencia, los núcleos tienden a volver a su estado de equilibrio mediante dos procesos: en el primer proceso se tiene en cuenta cómo el núcleo vuelve al estado de equilibrio intercambiando energía con el entorno; mientras que en el segundo proceso se alcanza el equilibrio como consecuencia de las interacciones dipolo-dipolo:

- T1**

Es la mayor de las dos constantes y se asocia con el decaimiento de la componente z del campo, que es paralela al campo magnético estático aplicado B₀. También se le llama constante de tiempo longitudinal (por los movimientos de traslación y rotación) o tiempo de relajación red-espín. Al ser la energía potencial magnética proporcional en todo este eje, un cambio de magnetización a lo largo del mismo implica un intercambio de energía y que el espín ha interactuado con el entorno. Esta interacción nos permite distinguir diferentes tipos de tejidos.
- T2**

Es más corta que la constante anterior y se asocia con el decaimiento de la componente transversal (componente y) al campo magnético estático aplicado B₀. También se le llama constante de tiempo transversal o tiempo de relajación espín-espín. Varía también según el tipo de tejido.

2.2. Apantallamiento nuclear

No todos los núcleos que tienen la misma γ (constante giromagnética) resuenan a la misma frecuencia, ya que los electrones que giran alrededor del núcleo provocan que el campo magnético externo que actúa sobre los protones se debilite. En este caso se dice que el núcleo está apantallado. También depende de la diferente electronegatividad de los átomos cercanos, que pueden desapantallar o apantallar los átomos estudiados. Este fenómeno es especialmente evidente en espectroscopia RMN, pero en imagen para el diagnóstico ayuda a diferenciar los diferentes tejidos.

2.3. Frecuencias de RMN

La frecuencia emitida por el protón durante su relajación es **proporcional** al campo magnético al que están sometidos. Mediante la utilización de un **gradiente de campo magnético** bien calibrado a lo largo de un tejido o sustancia, con propiedades paramagnéticas podemos asignar cada frecuencia detectada a un tejido determinado, permitiéndonos mapear el tejido en función de los protones presentes en el mismo, generando con ello una imagen de resonancia magnética bidimensional. Como la densidad de los protones varía según el tejido, se pueden utilizar **soluciones de contraste**.

Alrededor del 80 % de los átomos del cuerpo humano son átomos de hidrógeno, lo que nos permite obtener un gran número de señales mediante RM. Estas frecuencias son tratadas mediante la **transformada de Fourier**, que reconstruye la imagen final mediante la caída de inducción libre o FID que emite y que es la que indica la posición del núcleo resonante. Detallaremos este proceso en la Unidad 11.

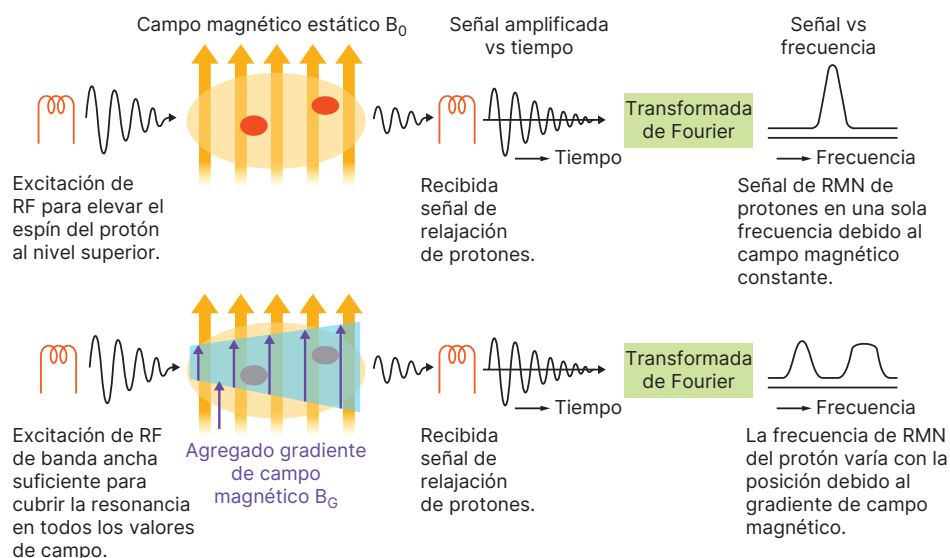


Fig. 2. Diferencia entre aplicar un campo magnético constante y un campo magnético con gradiente. En el primer caso obtenemos solo una señal, la cual nos indica únicamente la presencia de protones; mientras que en el segundo caso resultan diferentes señales que varían con la posición del gradiente, permitiéndonos localizar y representar los diversos protones y con ello las diferentes estructuras y tejidos del organismo.

2 CASO PRÁCTICO



CÁLCULOS DE FRECUENCIA

Calcula la frecuencia de Larmor para los siguientes elementos expuestos a un campo magnético dado:

- a) Protón en un campo magnético de 14,1 T (cte. giromagnética = 42,58 MHz/T).
- b) ^{19}F en un campo magnético de 16,2 T (cte. giromagnética = 40,05 MHz/T).
- c) ^{13}C en un campo magnético de 1 T (cte. giromagnética = 10,71 MHz/T).

SOLUCIÓN

- a) 600 MHz.
- b) 649 MHz.
- c) 10, 71 MHz.

03 Imanes. Tipos y clasificación

El **imán** o **magneto** es uno de los principales componentes del equipo de RM. Tal y como hemos visto en los epígrafes anteriores, es esencial para **generar** el campo magnético que afecta a los diferentes espines nucleares. Para la generación de gradientes en el campo magnético se utilizan otros elementos que se introducirán más adelante.

3.1. Características de los imanes

A. Intensidad del campo magnético

Es una propiedad determinante de la resolución en la imagen de RM. Interviene en los **cambios de estados** de energía de los protones y el entorno en el que se encuentran, pues la diferencia de energía entre los estados y la magnitud del campo externo son directamente proporcionales. Modifica el tiempo de relajación longitudinal, o T1, de forma proporcional: a más intensidad, más largo es el T1 y a la inversa. Se mide en unidades tesla o gauss.

B. Homogeneidad

En la parte central del imán el campo magnético no suele ser homogéneo. Influye en la **calidad** del equipo de RM, pues incrementa el ruido. La homogeneidad de campo se puede medir en partes por millón (ppm), referidos a la intensidad del campo magnético, y genera rangos de intensidades que producen variaciones en la frecuencia de resonancia, generando **artefactos**.

3.2. Clasificación de los imanes

Los imanes podemos clasificarlos en:

A. Permanentes

Tal y como su nombre indica, son imanes que presentan propiedades magnéticas de forma permanente. Es un imán de material **ferromagnético** que genera un campo magnético perpendicular al paciente. Está compuesto por diferentes piezas que se insertan entre sí y generan una intensidad baja (máximo 0,5 T) cerca del equipo, por lo que no se requieren muchas medidas de seguridad. No requieren enfriamiento ni necesitan energía para generar el campo magnético, por lo que requieren **menos coste** que otros tipos de imanes; sin embargo, presentan problemas de homogeneidad y no pueden desconectarse en caso de emergencia.

B. Electroimanes

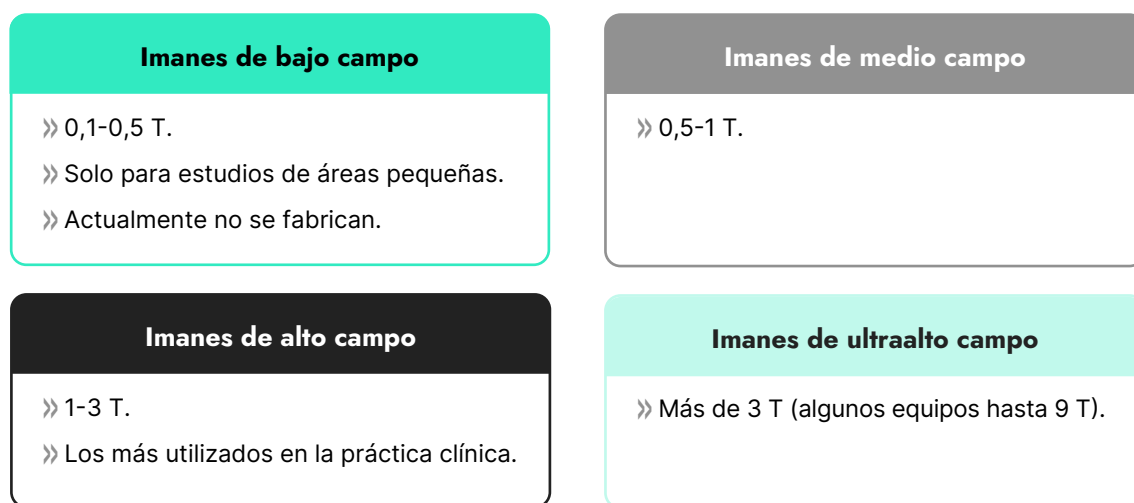
Los hay de dos tipos:

- » Resistivos: son **electroimanes** generados cuando una corriente eléctrica atraviesa un material según la ley del electromagnetismo de Maxwell, formándose un campo magnético alrededor del conductor. La conducción eléctrica a través del mismo genera **calor y resistencia** al flujo de electricidad, por lo que este tipo de imanes

requiere constante refrigeración y energía. Necesitan, por tanto, un elevado coste y tienen un campo magnético poco homogéneo. Su intensidad se encuentra entre 0,1 T y 0,3 T.

»Superconductor: también se trata de un electroimán, solo que en este caso el campo magnético no es producido por una corriente que atraviesa un conductor, sino mediante el enfriamiento de un cable de aleación de titanio y niobio que al alcanzar los -268°C pierde su resistencia a la conducción eléctrica y se transforma en **superconductor**, generando un campo magnético constante y de gran potencia. Para enfriarlo se utiliza **helio** líquido y el imán no genera calor ni necesita aportes de energía. El helio líquido se sitúa alrededor del imán y los costes de mantenimiento vienen derivados de su reposición. Su intensidad varía entre 0,5 T y 3 T o incluso más. Su alta homogeneidad hace que sean los imanes que utilizan la mayoría de los equipos.

También podemos clasificar los imanes en función de la intensidad del campo magnético que generan:



Esquema 2. Clasificación de los imanes según la intensidad del campo magnético que generan.

Los equipos de RM que emplean imanes de 1.5 T se emplean más comúnmente en equipos de RM abierta y los de 3 T en los de RM cerrada, aunque puede haber excepciones.

Existen sistemas de homogenización de los campos generados por los imanes mediante el **shimming**. Esto puede realizarse por la compensación de pequeñas bobinas que actúan como electroimanes y que producen campos correctores, o bien mediante pequeñas cuñas de material ferromagnético situadas en los polos del imán que generan campos que se suman al principal.

3 CASO PRÁCTICO



¿EN QUÉ ME FIJO?

En la unidad de radiodiagnóstico en la que trabajas van a adquirir un nuevo equipo de RM. Entre los modelos posibles, la única diferencia entre ellos es el tipo de imán. Tus compañeros no terminan de decidirse por cuál sería mejor. Ayúdales indicándoles qué deben tener en cuenta.

SOLUCIÓN

A la hora de adquirir un equipo, respecto al imán hay que tener en cuenta sus características. La intensidad debe ser suficiente para realizar los diferentes estudios y exploraciones y la homogeneidad debe ser alta. Después habría que determinar si se dispone de suficientes recursos para mantener el alto coste de los imanes resistivos o el coste del refrigerante de un imán superconductor es asumible. Si el equipo es para estudios de rutina, bastaría con un imán permanente de bajo coste.

04 Emisores-receptores de resonancia magnética

Los equipos de RM poseen un sistema de radiofrecuencia que transmite la energía a los protones para generar la excitación de los mismos. Esta debe ser igual a la frecuencia de precesión de los espines y puesto que suelen encontrarse en el espectro de radiofrecuencias, es necesario que los equipos se encuentren **aislados** de otras señales externas. Al realizarse la relajación de los espines emiten otra radiofrecuencia que es detectada. Tanto para la emisión como para la recepción de estas señales se utilizan **antenas**.

La radiofrecuencia se transmite mediante **pulsos** y participa de forma fundamental en el contraste de la imagen que se obtiene.

4.1. Tipos de antenas

Las antenas de radiofrecuencia pueden ser receptoras de la señal de RM, emisoras de la radiofrecuencia de resonancia o realizar ambas funciones.

Están compuestas por numerosos elementos minuciosamente conectados entre sí para asegurar un correcto funcionamiento.

A fin de obtener una buena calidad de imagen, se deben escoger minuciosamente la forma geométrica y las características eléctricas que determinen la sensibilidad espacial de la antena. Hay 2 características fundamentales a cumplir: Tener un buen cociente señal/ruido y una buena uniformidad en el área de interés; y en consecuencia, si son de calidad, obtendremos un buen factor de calidad (factor Q) garantizando que no perderemos demasiada energía en relación con la energía almacenada por el resonador.

Las antenas pueden ser conectadas o desconectadas al imán, tienen diversas formas y se clasifican según su forma o según sus ejes de captación.

Según su forma encontramos:

» **Antena única:** circuito eléctrico con amplificador.

» **Antena múltiple, conjunta o en serie (*phased array*):** consta de varias antenas de superficie integradas entre sí, además del amplificador, por lo que proporcionan un gran campo de visión. Existen diferentes tipos en función del número de canales del que dispongan; a más canales, más información se recoge. Funciona como transmisor y receptor y sus canales pueden ajustarse en función de cada caso; sin embargo, el cableado puede producir ruido. Se utilizan, por ejemplo, en estudios de columna completa.



Fig. 3. Ejemplo de antena conjunta o phased array para realizar una RMN cardiaca.

- » **Antena de cuerpo (body coil):** es también transmisor y receptor. Se encuentra integrada en el equipo.
- » **Antenas de volumen:** pueden ser transmisores y receptores. Existen diferentes tipos y formas y son de gran tamaño, por lo que al alejarse del objeto reducen la relación señal-ruido. Reciben de manera homogénea la señal.



Fig. 4. Ejemplo de antena de volumen para exploración de rodilla.

- » **Antenas de superficie:** normalmente solo actúan como receptoras y se acercan más al objeto, por lo que la relación señal-ruido es alta. Se adaptan mejor al área anatómica, de modo que son útiles para los estudios de extremidades. Otras se introducen en las cavidades corporales para mejorar la señal. Dependiendo de la profundidad, reciben peor o mejor la señal. Solo recogen la señal a 2/3 del diámetro de la antena.

4.2. Sistemas de gradiente

Son sistemas de antena que actúan junto con las antenas *shim* (*shimming*) al lado del imán y concéntricas a este. Consisten en seis electroimanes distribuidos en pares para cada eje espacial y su función consiste en **localizar** la señal de resonancia en todas las direcciones del espacio mediante el cambio de intensidad del campo magnético de forma local y lineal a lo largo del imán principal.

Se caracterizan por la amplitud del gradiente que generan y el tiempo (μs) y velocidad de subida (mT/m/s) hasta alcanzar la intensidad máxima. La amplitud se mide en militesla por metro (mT/m) o gauss por centímetro (G/cm) y suele variar entre 10 y 40 mT/m . La amplitud debe ser máxima si queremos realizar estudios de alta resolución que requieran pequeños vóxeles. Todas estas características determinan la **potencia** de la antena de gradiente.

Funcionan mediante un sistema de **espiras**, que consiste en dos bobinas por cada eje (X, Y, Z) siendo un total de 6, por las que circula la corriente. El sistema hace que en cada extremo la corriente vaya en direcciones contrarias, de tal forma que en el lugar en el que el campo magnético de la antena vaya en la misma dirección que el generado por el imán se aumentará la fuerza y se disminuirá en aquellos lugares en los que sea en dirección opuesta, generando así un **gradiente** en el campo magnético.

Existen varios tipos de gradientes a tener en cuenta:

» **Gradiente de Codificación de la Frecuencia:** el punto en el centro del imán donde los ejes $(x,y,z) = 0,0,0$ se denomina isocentro. El campo magnético en el isocentro es B_0 y la frecuencia de resonancia es ν_0 . Si un gradiente lineal de campo magnético se aplica a nuestra hipotética cabeza con tres regiones conteniendo espines, las tres experimentarán campos magnéticos distintos. El resultado es un espectro de RMN con más de una señal. La amplitud de la señal es proporcional al número de espines en el plano perpendicular al gradiente.

» **Gradiente de Selección del Corte:** la selección de corte en RM, es la selección de los espines de un plano del objeto y se logra con la aplicación de un gradiente lineal de campo magnético en una dirección, durante la aplicación del pulso de RF.



VÍDEOLAB

Para consultar el siguiente vídeo sobre las antenas, escanea el código QR o [pulsa aquí.](#)

4 CASO PRÁCTICO



EL MUNDO DE LAS ESPIRAS

Un compañero de trabajo no entiende que los equipos de RM deban tener un gradiente en el campo magnético; considera que manteniendo el campo magnético constante se obtendría el mismo efecto y resultado. Explica por qué es necesaria la utilización de gradientes en RM.

SOLUCIÓN

De no existir el gradiente en el campo magnético solo se detectaría la presencia de los espines nucleares. Mediante la generación de un gradiente y la oscilación del mismo a lo largo de los ejes posicionales de los núcleos podemos determinar la posición de los diferentes espines nucleares en el espacio, necesario para generar la imagen bidimensional resultante de la RMN.

X T A R T
FP SALUD