

PRINCIPIOS FÍSICOS DE RESONANCIA MAGNÉTICA

Magnetismo, Electromagnetismo, superconducción y propiedades magnéticas

Acad. T.M Cristian Garrido I.
Centro de Imagenología. Hospital Clínico, Universidad de Chile

Introducción

La presencia de un campo magnético no es el único requisito para que se manifieste el fenómeno de Resonancia Magnética. Los otros son los siguientes:

1. Disponibilidad de núcleos atómicos susceptibles: Según el abordaje cuántico, corresponden a aquellos con número másico impar; es decir, que la suma de protones más neutrones sea un número impar ya que en esos casos el núcleo presentará la propiedad de resonancia. El más conocido de ellos es el Hidrógeno y se utiliza en la aplicación clínica de la RM debido a dos razones:
 - De acuerdo a la fórmula de los estados (u orientaciones) posibles que puede alcanzar un núcleo atómico, determinada por la expresión $2s+1$, en el hidrógeno, al reemplazar el valor del número cuántico de espín que tiene valor $1/2$, tenemos la siguiente relación:

$$2s + 1 = 2 \left(\frac{1}{2} \right) + 1 = \frac{2}{2} + 1 = 1 + 1 = 2$$

Por lo tanto el núcleo de hidrógeno tiene sólo dos orientaciones posibles, conocidas como Up o Down ($+1/2$ y $-1/2$ respectivamente), lo que permite que trabajar con él sea más sencillo, ya que hay que discriminar entre dos estados, lo que definitivamente es más fácil que discriminar, como en el caso del sodio (que tiene un número de spin de $3/2$) entre 4 estados energéticos ($+3/2$, $+1/2$, $-1/2$ y $-3/2$).

- El 63% de las cadenas orgánicas está compuesto por hidrógeno, convirtiéndolo en el núcleo más abundante y óptimo para la utilización clínica de la RM. Sin embargo, no olvidemos que también se puede hacer resonancia a elementos como el Sodio o el Fósforo, lo que determina otras implicancias físicas y técnicas.
2. Disponibilidad de un campo de radiofrecuencias: También conocido como **campo B1** o *campo de Radiofrecuencias*, que son las que producirán la excitación nuclear, puesto que las ondas de RF, que son enviadas en forma de “pulsos de RF”, aportan la diferencia de energía para llevar los espines desde un estado menos energético (Up) a uno de mayor energía (Down). Una vez enviadas las ondas de RF se cortan los pulsos y los protones

vuelven a su estado de equilibrio inicial mediante el proceso denominado relajación nuclear. Del proceso de relajación se desprenden los tiempos de relajación conocidos como tiempos o constantes T1 y T2, así como otros parámetros que serán usados para adquirir las imágenes.

3. Disponibilidad de un campo magnético potente (Campo magnético principal o **Campo B_0**): Es lo que produce la alineación de los espines en los estados Up y Down, así como también establece la “referencia” respecto a la cual se van a alinear los espines. Este campo, por convención, se conoce como Campo B_0 y corresponde al campo estático, al imán o magneto. Sin embargo, para adquirir las imágenes en RM no sirve sólo que el campo sea homogéneo, sino que requiere ser manipulado de modo que se establezcan “zonas” de campo magnético más potentes y que en el sentido opuesto a esta zona se genere “otra zona” con una potencia de campo magnético menor. Este efecto se logra mediante la generación de gradientes magnéticos a través de bobinas de gradientes, las cuales provocan diferencias lineales de la potencia del campo magnético, en una dirección entre sus extremos, lo que permite determinar la intensidad del campo magnético en cada punto de esta variación lineal y, en consecuencia, permite conocer y manipular la frecuencia de precesión de los spines ubicados en cada punto del gradiente establecido. El nuevo campo establecido por los gradientes se llama, por convención, G_n , donde “n” será x, y o z, dependiendo del eje del espacio cartesiano en el que se genere el gradiente.

¿Resonancia Nuclear Magnética o Resonancia Magnética?

Ambos términos son correctos, son equivalentes y aceptados. La denominación “nuclear” es más utilizada en la aplicación del fenómeno en química analítica, mientras que en la utilización en imagenología se tiende a no utilizar la palabra nuclear, ya que da la impresión de que la técnica puede estar asociada a la utilización de radiaciones ionizantes. Esto se ha simplificado acuñando el término MRI (Magnetic Resonance Imaging) cuando la técnica se utiliza con fines clínico-imagenológicos.

Toda la materia interactúa con los campos magnéticos externos. Para nosotros resulta muy familiar la interacción, por ejemplo, de un alfiler con un imán pequeño, y la interacción existente cuando acercamos dos imanes entre sí. La interacción principal, y más instintiva es la de atracción, en el primer ejemplo, y la de atracción y repulsión en el segundo; que depende de la forma en que se acerquen los imanes. Cuando acercamos polos similares, tendremos la manifestación de la interacción en forma de repulsión, y si acercamos polos opuestos la interacción se manifestará en forma de atracción. Sin embargo, existen otras condiciones en la que la interacción no es visible. Si acercamos un material orgánico a un imán nunca veremos ni atracción ni repulsión, pero esto no significa que este material no interactúe con el campo magnético externo. La interacción fue tan débil que no es observable pero existe. Entonces existen diversos niveles de interacción de la materia con un campo magnético externo aplicado. Dentro de las interacciones magnéticas posibles existe un fenómeno denominado “susceptibilidad magnética. La susceptibilidad magnética es una forma de interacción magnética relacionada directamente con la permeabilidad magnética que, finalmente, es la que determina las propiedades magnéticas a la materia, o la forma en que la materia va a interactuar con un campo magnético externo.

El magnetismo y la electricidad están íntimamente relacionados, de hecho el fenómeno que nos interesa, para entender los magnetos que se usan en RM es el electromagnetismo. Este fenómeno se fundamenta en el hecho de que una corriente eléctrica (que básicamente son cargas en movimiento en un conductor) es capaz de producir un campo magnético, y de modo inverso, un campo magnético en movimiento con respecto a un conductor es capaz de producir una corriente eléctrica en el conductor. Esta es la base del funcionamiento de los dínamos y generadores, y en este caso el fenómeno se denomina "inducción electromagnética". En RM el fenómeno de electromagnetismo y una variante de este, la superconducción, son el fundamento de la generación de campos magnéticos potentes que se utilizan como campo magnético principal (B_0), encargado de orientar los espines en Up y Down. Actualmente para la construcción de imanes de alto campo (sobre 1.5 Teslas) la tecnología superconductor es la más eficiente, por lo que es la utilizada en este caso. Los fenómenos de inducción electromagnética en RM se observan en la recepción de señal en la antena. En el fondo, el vector de magnetización que gira con determinada frecuencia induce una corriente en la antena, la cual es la señal que se utiliza para poder construir posteriormente la imagen, por lo tanto la imagen se adquiere mediante una señal de inducción, de ahí su nombre, caída libre de la inducción, o FID (Free Induction Decay).

Magnetismo

Es un fenómeno físico que se manifiesta con el efecto de atracción y repulsión. A lo mejor muchas las personas se han preguntado alguna vez ¿Qué hace que un imán sea un imán?, ¿Qué hace que un alfiler se pegue a un imán, pero un material orgánico no?, ¿Por qué si un clip se pega a un imán, este clip después queda "imantado"? ¿Por qué ciertos metales se comportan como imanes, pero otros no? La respuesta está en las nubes de electrones que rodean al núcleo atómico. La disposición de la nube y otros atributos de los electrones van a determinar el comportamiento magnético de la materia, debido a que existe una disposición ordenada de los electrones en sus orbitales (con una determinada configuración electrónica y orientación electrónica), sumado al hecho de que los electrones tienen un cierto comportamiento magnético, dado por su momento dipolar magnético (MDM); que es una condición intrínseca al electrón (denominada spin electrónico, determinada por el número cuántico de spin) como lo es la carga y la masa. Por lo tanto, el comportamiento magnético de la materia depende de su composición electrónica, y será esta composición la que determine que la materia tenga propiedades magnéticas apreciables, no las tenga, o que se manifieste de alguna forma especial.

La configuración electrónica determinará que las moléculas que forman parte de la materia "herede" ciertas propiedades magnéticas, que vienen de la configuración electrónica de los átomos que las constituyen. Por esta razón, las moléculas también serán pequeños MDMs Para explicar las consecuencias de este hecho nos vamos a basar en la figura 1.

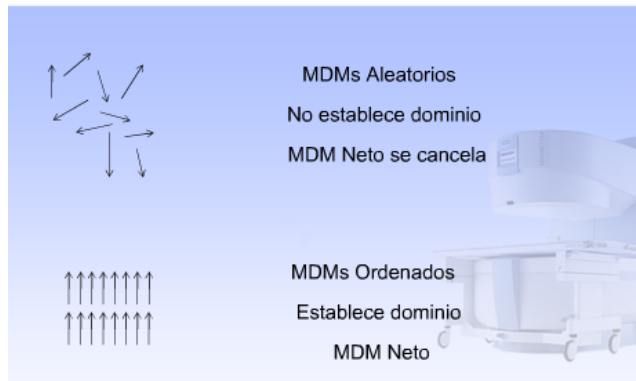


Figura 1: MDMs Aleatorios y MDMs ordenados

De acuerdo a esta figura, cada flecha es un MDM, y se representa así porque es una magnitud vectorial (con módulo o intensidad, dirección y sentido). Cada vector (en adelante MDM) es exactamente igual en módulo, ya que todas las moléculas de una misma clase de “materia” son iguales. En la figura superior vemos que los MDMs están desordenados, es decir su disposición es aleatoria, lo que puede estar dado porque las redes electrónicas de las moléculas están desordenadas (lo que está determinado por la conformación molecular). En este caso, si vemos el conjunto aleatorio de MDMs y hacemos una suma vectorial de los vectores tendremos cero como resultado, es decir los MDMs se cancelan entre si y no se manifestará un “dominio magnético neto”. Un dominio magnético se define como una región del espacio en la que los vectores magnéticos comparten la misma orientación y sentido. El cuerpo (materia) formado por estos MDMs no se comportará como un imán, ya que los imanes, de la forma en que los conocemos, para ser imanes deben tener un MDM neto (o sea deben constituir un dominio magnético). En la figura de abajo la situación reflejada es la de una red electrónica ordenada en las moléculas, por lo que los MDMs se encuentran ordenados, en este caso en la misma dirección y sentido. Esto permite establecer la presencia de un dominio, ya que la suma vectorial de los MDMs es distinta de cero. Existen cuerpos que naturalmente presentan esta disposición de sus MDMs, por lo que intrínsecamente se comportan como imanes (ej: la magnetita), y otros cuerpos tienen MDMs relativamente ordenados, que ante la presencia de un campo magnético externo se orientan en forma ordenada, por lo que se pegan al imán y una vez que se retira el campo magnético externo persisten por un tiempo ordenados (o sea permanecen imantados) hasta que se desordenan y pierden su propiedad de “imán inducido”. Esta situación es la que se observa en un clip, un clavo o un alfiler.

En la figura 2 vemos que un cuerpo puede estar constituido por muchos dominios magnéticos, lo que se denomina “Polidominio”, y cuando estos dominios también se pueden alinear. Cuando un polidominio alinea todos y cada uno de sus dominios magnéticos en la misma dirección y sentido, este cuerpo en su totalidad pasa a denominarse “Monodominio”

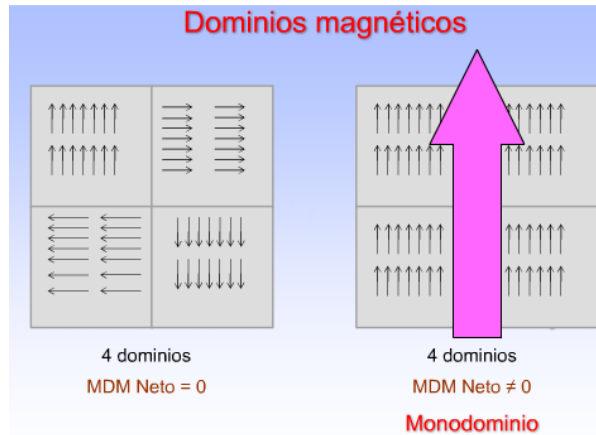


Figura 2: Polidominio y Monodominio

A la izquierda se ve un material con 4 dominios diferentes. Como ya se dijo, un dominio se define como una zona donde todos los MDMs están orientados en la misma dirección y sentido. En el ejemplo, al hacer la suma vectorial de los dominios se obtiene un MDM neto igual a 0. A la derecha observamos una muestra con los 4 dominios orientados en la misma dirección y sentido, es decir, con un solo gran dominio (monodominio) cuya componente de MDM es mayor a 0 y orientada en la misma dirección y sentido de cada uno de los 4 dominios que lo forman.

Otra idea a conocer, es la existencia y disposición de las líneas de fuerza de un campo magnético, las que se muestran en la [figura 3](#):

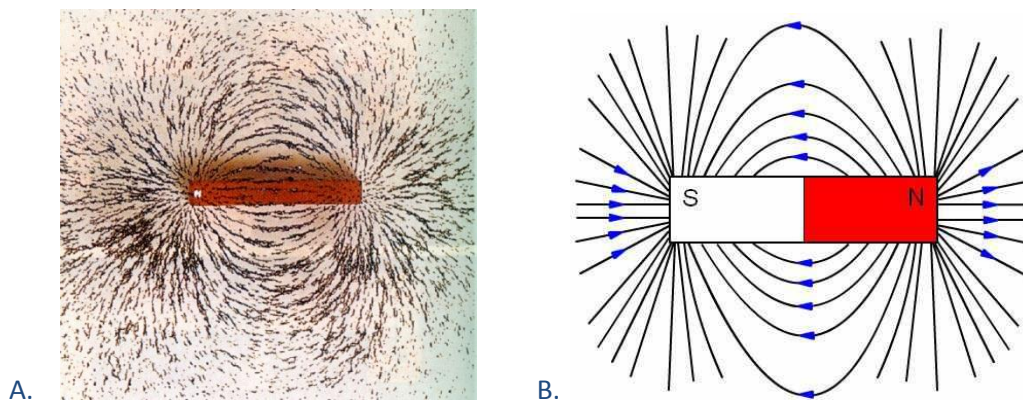


Figura 3: Líneas de fuerza de un imán

En la figura 3A vemos un imán en forma de barra puesto sobre una superficie que contiene virutas de hierro. Esto permite visualizar las “líneas de fuerza del campo magnético”, las que son producidas por el denominado “flujo magnético”. En la figura 3B vemos una representación gráfica de estas líneas de fuerza, donde podemos apreciar que el flujo magnético se dirige desde el polo norte hacia el polo sur. Las trayectorias descritas por el flujo magnético las denominamos líneas de

fuerza del campo magnético. De este modo, se puede visualizar claramente que la dirección de este flujo magnético desde el polo norte al sur explica que los polos distintos se atraen, por coincidencia del flujo entre los polos; y que los polos iguales se repelen, ya que los flujos en este caso van en sentido contrario. Gráficamente también se puede explicar el concepto de potencia o intensidad de campo magnético, ya que podemos decir que cuando hay muchas líneas, y éstas están muy cerca unas de otras, este campo magnético será más intenso, o más potente, que un campo que tiene menos líneas y están más separadas entre sí. Este atributo también se puede cuantificar, y las unidades son el Gauss (sistema cgs) y el Tesla (sistema mks). Mientras mayor es el valor de intensidad en Gauss o en Teslas, mayor es la potencia del campo magnético. Por otro lado, la equidistancia entre las líneas de fuerza nos dará cuenta de otro atributo de los campos magnéticos: la homogeneidad del campo. Cuando las líneas son equidistantes diremos que el campo magnético es homogéneo, o sea que en cualquier parte del campo magnético, la intensidad será la misma. A la inversa, cuando las líneas no se distribuyen a intervalos regulares podemos decir que este campo es inhomogéneo. Al igual que la intensidad de campo magnético, ese atributo también se puede cuantificar, lo que se hace a través de un parámetro adimensional de “partes por millón” (ppm). Cuando un campo tiene muchos ppm diremos que este campo es inhomogéneo, y a la inversa, cuando el valor en ppm es muy bajo debemos saber que este campo es muy homogéneo. Estos parámetros inciden en la resolución y en la calidad de la imagen que se puede obtener mediante RM.

Con estos conceptos ya se puede hablar de las propiedades magnéticas de la materia. Para esto es necesario definir el concepto de permeabilidad magnética.

La permeabilidad magnética es la capacidad de una sustancia o medio para atraer o dejar pasar a través de sí las líneas de fuerza de un campo magnético externo a la cual es sometida. Debido a esto, cuando un cuerpo es sometido a un campo magnético externo, si sus dominios se alinean con las líneas de fuerza del campo externo diremos que este cuerpo se imantó y por esto mismo va a atraer hacia su centro las líneas de fuerza, lo que se aprecia como que el cuerpo “se pegó al imán”. En este caso diremos que este cuerpo tiene un comportamiento ferromagnético. De modo inverso, existen otros cuerpos que al ser expuestos a un campo magnético externo van a expulsar hacia afuera las líneas de fuerza, por lo que macroscópicamente veremos que este cuerpo no fue afectado por el imán, o no interactuó con él, o sea no se pegó al imán. Estos cuerpos entonces tienen un comportamiento diamagnético.

Permeabilidad Magnética

La permeabilidad magnética, simbolizada con la letra griega μ , es una magnitud física cuya utilidad radica en que permite comparar y predecir el comportamiento magnético de los materiales entre sí.

Mientras mayor es el valor de la permeabilidad magnética, mayor será su interacción ferromagnética

Como se enunció anteriormente, La permeabilidad magnética es la capacidad de una sustancia o medio para atraer o dejar pasar a través de sí las líneas de fuerza de un campo magnético externo a la cual es sometida. Cuando un material se acerca a un campo magnético externo, este material siempre va a interactuar con las líneas de fuerza del imán al cual se acerca, y lo hará de dos formas:

- 1) Atraerá las líneas de campo magnético externo hacia su interior (Ferromagnéticos y paramagnéticos)
- 2) Expulsará las líneas de campo magnético hacia afuera (diamagnéticos)

Existen 2 formas de evaluar la permeabilidad magnética de un material. Una es la denominada permeabilidad magnética absoluta (μ) y la otra es la permeabilidad magnética relativa (μ_r). La permeabilidad magnética relativa es la que permite clasificar y comparar los materiales entre sí. Por otro lado un valor importante es el de la permeabilidad magnética del vacío (μ_0).

La permeabilidad magnética absoluta y relativa está relacionada a través de la siguiente fórmula:

$$\mu = \mu_r \mu_0$$

Al despejar la fórmula, obtenemos lo siguiente:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

En estas condiciones, el valor de μ_0 se hace importante, ya que si μ_r de un material toma un valor de 1, este material se comportará igual al vacío. Por otro lado si toma un valor muy superior a 1, este material tendrá un comportamiento ferromagnético, y si es inferior a uno, su permeabilidad será menor incluso que la del vacío y su comportamiento será diamagnético. Por otro lado, si toma un valor levemente superior a 1, su comportamiento será paramagnético.

El comportamiento magnético de la materia, dada por la susceptibilidad magnética, está resumido en la figura 4.

- **Ferromagnéticos**
Permeabilidad magnética relativa es muy superior a 1.
 - Atraen el campo magnético hacia su interior \Rightarrow "se pegan a los imanes" (Fe – Ni)
- **Paramagnéticos (no magnéticos)**
Permeabilidad relativa es aproximadamente 1 (se comportan como el vacío).
 - Son la mayoría de los que encontramos en la naturaleza
 - Reacción frente a los campos magnéticos es muy poco apreciable
- **Diamagnéticos**
Permeabilidad relativa inferior a 1.
 - Repelen el campo magnético \Rightarrow pasa por el exterior del material.
 - Acción diamagnética débil \Rightarrow no comparable al efecto del campo magnético sobre materiales ferromagnéticos (Cu)

Figura 4: Propiedades magnéticas de la materia

1.- Los ferromagnéticos tienen una permeabilidad relativa con valor muy superior a 1. Incluso, pueden presentar magnetismo por sí mismos (por ejemplo la magnetita). Sin embargo, los ferromagnéticos clásicos se caracterizan por adherirse a un imán, pues atraen las líneas del campo hacia su interior. Los más conocidos son el Hierro, el Níquel y el Cobalto.

2.- Los paramagnéticos también son no magnéticos aunque su comportamiento varía dependiendo de la temperatura a la que se expongan y de la potencia del campo magnético externo aplicado, de acuerdo a la ecuación de Curie. Se comportan en forma casi similar al vacío, tienen un valor de permeabilidad relativa levemente superior a 1 y corresponden a la mayoría de los elementos existentes en la naturaleza, siendo muy poco apreciable su interacción frente a un campo magnético externo. En teoría estos materiales tienen la posibilidad de hacerse cada vez más ferromagnéticos si es que el campo al que son expuestos es infinitamente potente y si la temperatura baja a valores cercanos al cero absoluto.

3.- Los diamagnéticos tienen una permeabilidad relativa inferior a 1. Los organismos biológicos son considerados diamagnéticos y lo que sucede con estos materiales es que las líneas de campo son expulsadas hacia el exterior del material, puesto que no permite que las líneas entren a este material. No es una acción de repulsión, sino que no interactúan con el campo de una manera que podamos visualizarla macroscópicamente.

En la figura 5 podemos ver un gráfico que muestra estas relaciones, según lo descrito anteriormente:

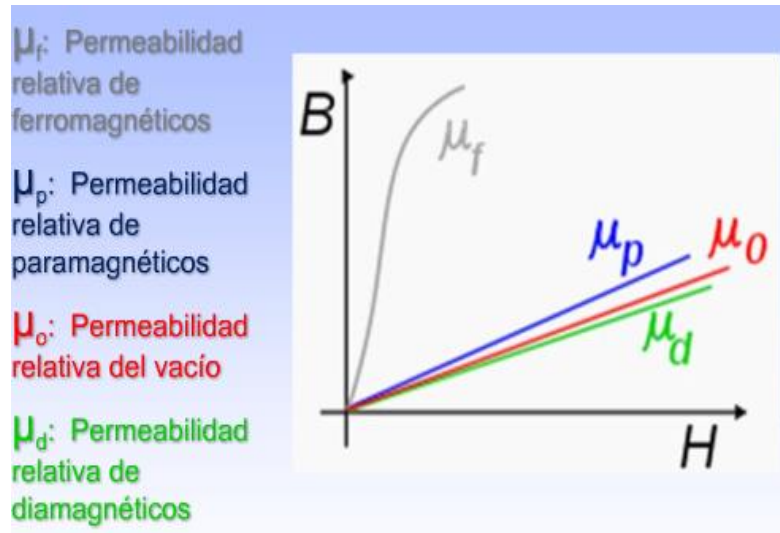


Figura 5: Relación entre distintos materiales según su permeabilidad magnética

En el gráfico se puede observar la comparación entre las permeabilidades relativas de distintos tipos de materiales., incluyendo la del vacío. Se ve que la de los elementos ferromagnéticos es muy superior a la del resto. Además, se observa que la permeabilidad de los diamagnéticos se parece bastante al vacío, y la de los paramagnéticos es levemente mayor.

Cuando un material paramagnético se somete a potencias de campo magnético mayores (eje **B**), su curva adquiere mayor pendiente y se acerca un poco a la de los ferromagnéticos. Es decir, a medida que aumenta el flujo magnético externo, aumentan sus probabilidades de interactuar con un imán externo y se parece más a los ferromagnéticos, ya que empieza a concentrar en su interior las líneas del campo magnético externo aplicado y por eso en su interior aumenta el valor de campo magnético inducido (lo que se llama inductancia magnética, que se simboliza con la letra **H**)

Ferromagnetismo

En los ferromagnéticos que presentan magnetismo espontáneo, todos los MDM de una muestra están ordenados en la misma dirección y sentido, por lo que se establece un monodominio. En la naturaleza no existen los monodominios perfectos, ya que todo material presenta impurezas, pero los dominios presentes pueden transformarse en monodominios cuando un campo magnético actúa sobre un material ferromagnético. En el caso del ejemplo de una aguja, que se pega a un imán, y permanece imantada por un tiempo al retirarse de éste, sus dominios que estaban parcialmente orientados se orientan debido a la acción del campo magnético externo, por lo que se pega al imán. Si el tiempo en que actúa el imán es largo, o si el imán es muy potente, la aguja presentará un reordenamiento de todos sus dominios en la misma dirección y sentido, lo que constituirá un monodominio, y este monodominio permanecerá por un tiempo una vez

retirado el imán, lo que se llama remanencia. Por este motivo la aguja queda imantada hasta que sus dominios se orientan a la condición inicial, perdiéndose esta “imantación inducida” (Figura 6)

- Ferromagnetos divididos en **dominios magnéticos**. En cada uno dominio, todos los momentos magnéticos están alineados.
- Material ferromagnético sometido a un campo magnético intenso:
 - Los dominios se alinean con éste \Rightarrow Monodominio.
 - Al eliminar el campo, el dominio permanece durante cierto tiempo.

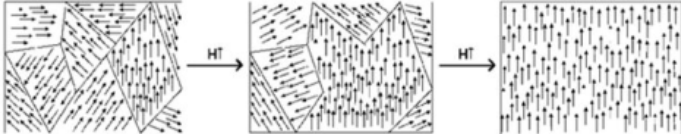


Figura 6: Establecimiento de un monodominio en un ferromagnético

Los materiales ferromagnéticos entonces, por alinear sus dominios ante un campo magnético externo, en la misma dirección y sentido que éste, se reordenaran en un monodominio, atrayendo hacia su interior las líneas del campo externo, por lo que se alinearán con él, lo que macroscópicamente se ve como que “se adhieren al imán”. Los materiales más ferromagnéticos, y por lo tanto los más peligrosos en la RM son el Hierro, Níquel y Cobalto. La forma en cómo concentran en su interior las líneas del campo magnético externo se observa en la Figura 7:

Ferromagnéticas

Sustancias que son atraídas fuertemente hacia la zona más intensa del CM



Mantienen la magnetización aún después de ser retiradas del campo magnético

Fe, Ni, Co

Figura 7: Interacción de un ferromagnético con las líneas de campo magnético externo

Paramagnetismo

Los materiales paramagnéticos son parecidos en su interacción a los ferromagnéticos, sin embargo esta es muy débil como para poder apreciarla macroscópicamente (alineación respecto a

un campo magnético externo). Este fenómeno está condicionado por la Fórmula de Curie (Figura 8)

- El **paramagnetismo** es la tendencia de los momentos magnéticos libres (spin u orbitales) a alinearse paralelamente a un campo magnético
- Si momentos magnéticos están fuertemente acoplados entre sí, el fenómeno será ferromagnetismo.

$$M = \frac{C \times B}{T}$$

M: Magnetización resultante
B: Densidad de flujo magnético del campo aplicado
T: Temperatura absoluta (K°)
C: Constante de Curie. Específica de cada material

- **Materiales paramagnéticos**
 - Cada vez más magnéticos al aumentar el campo aplicado.
 - Cada vez menos magnéticos al elevarse la temperatura.



Figura 8: Paramagnetismo y Fórmula de Curie

Según la fórmula de Curie, la magnetización **M** en el interior del material dependerá de una constante específica para cada material **C**, y también dependerá en forma directamente proporcional a la intensidad **B** del campo magnético externo, y en forma inversamente proporcional a la temperatura **T** del sistema. Por lo tanto si el campo magnético externo es más intenso, en el material paramagnético se producirá un mayor reordenamiento de los dominios magnéticos, por lo que concentrarán más las líneas de campo en el interior del material, haciéndose “más ferromagnético”. Por otra parte, al aumentar la temperatura del sistema el material concentrará menos líneas lo que lo hará “menos ferromagnético”. Por lo tanto, si el campo magnético externo **B** se hace infinitamente potente, y la temperatura baja a temperaturas cercanas al cero absoluto (0° K), este material se hará francamente ferromagnético, Por este motivo, el paramagnetismo es un tipo de ferromagnetismo “regulable” que depende de factores intrínsecos (constante de Curie) y extrínsecos (Intensidad del campo magnético externo y Temperatura)

Según la Figura 9, en un paramagnético que no está sometido a un campo magnético externo (imagen superior izquierda), los dominios están más bien desordenados, pero con una leve tendencia al orden. Al someterse a un campo magnético externo cada vez más potente se irán ordenando en forma progresiva, “haciéndose cada vez más ferromagnéticos”.

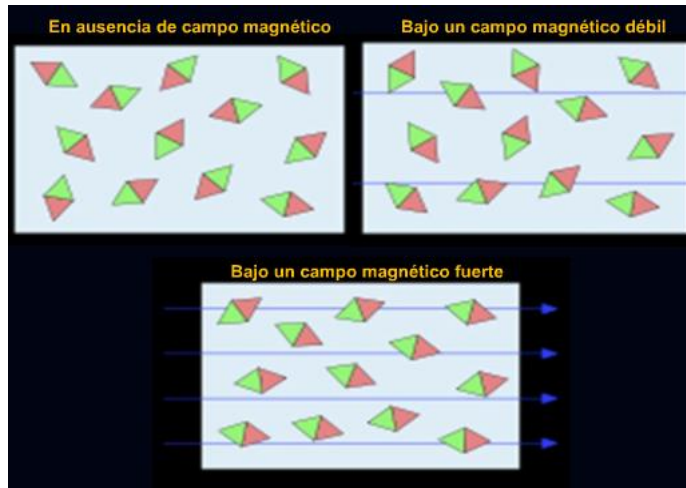


Figura 9: Paramagnetismo y Campos magnéticos externos

Entonces en un paramagnético también se concentrarán las líneas del campo magnético externo igual que en un ferromagnético, pero será en una forma más débil, y dependiente de los factores intrínsecos y extrínsecos anteriormente comentados. Un material paramagnético clásico es el Gadolinio (Gd), y acá está la explicación de su mayor eficiencia como medio de contraste a campos magnéticos más intensos. En la Figura 10 se ve la forma de interacción, que es muy parecida a como interactúan los ferromagnéticos.

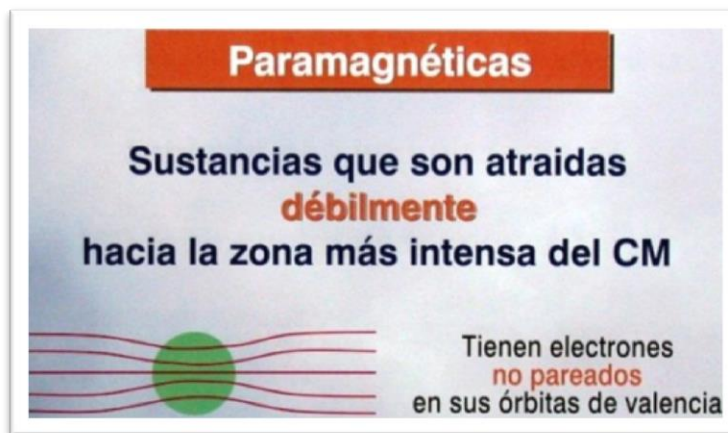


Figura 10: Interacción de un paramagnético con las líneas de campo magnético externo

Diamagnetismo

En los materiales diamagnéticos las líneas de campo magnético externo no son concentradas en su interior, sino que son expulsadas hacia el exterior del material, lo que explica

que no se alinean con respecto a este campo (“no se adhieren al imán”. Recordemos que sus valores de permeabilidad magnética relativa son inferiores incluso que la del vacío. Este fenómeno es prácticamente independiente de la temperatura del sistema. La interacción se observa gráficamente en la Figura 11



Figura 11: Interacción de un diamagnético con las líneas de campo magnético externo

Susceptibilidad Magnética

Para quienes ya están familiarizados con la RM en forma cotidiana en su práctica profesional, les resultará conocido un artefacto de la imagen conocido como “Artefacto de Susceptibilidad”. Para comprender este artefacto es vital conocer el concepto de susceptibilidad magnética.

Por definición, la susceptibilidad magnética es un parámetro físico adimensional que da cuenta de “cuanto se magnetiza un material al ser expuesto a un campo magnético externo”. En efecto, en los materiales ferromagnéticos, se observa que en su interior existe una concentración de las líneas de fuerza del campo magnético externo. Es por esto que en el interior del material, por haber más líneas de fuerza del campo magnético por unidad de volumen que en el entorno del campo magnético, es lógico pensar que este material producirá un valor de intensidad de campo magnético mayor en su entorno más próximo, que la intensidad del campo magnético externo. Por este motivo en la proximidad del material que está inmerso en un campo magnético externo, el valor de campo magnético percibido será mayor que en cualquier parte del campo externo, y a medida que nos alejamos del material se percibirá menos influencia del reforzamiento del campo magnético inducido en su interior. Esto queda graficado en la Figura 12.

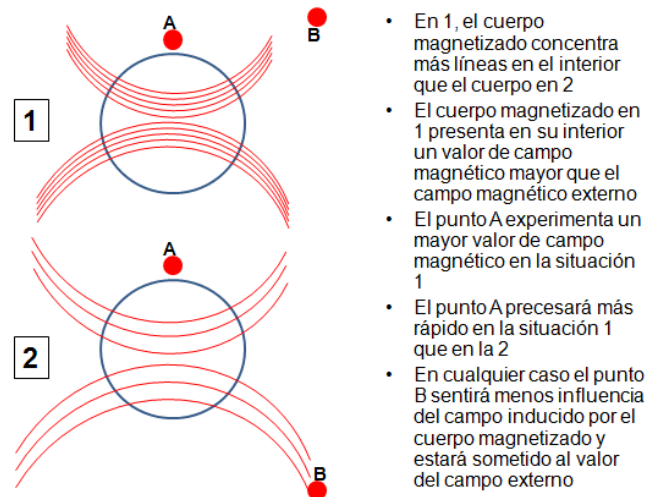


Figura 12: Susceptibilidad Magnética

Por lo tanto, la susceptibilidad magnética dependerá de la permeabilidad magnética los materiales con mayor permeabilidad magnética (ferromagnéticos) concentrarán mayor cantidad de líneas de campo magnético externo en su interior, por lo que en la proximidad del material se “percibirá” un campo magnético de mayor intensidad que el campo magnético externo. Entonces la susceptibilidad magnética inducida por un material será mayor cuando mayor sea la permeabilidad magnética de éste. Por otro lado también dependerá de la potencia del campo magnético externo. A mayor potencia del campo magnético externo aplicado, será mayor la inducción del monodominio y por este motivo será mayor la concentración de las líneas de campo magnético externo en el interior del material, lo que aumenta la susceptibilidad del material. Para aquellos ya familiarizados con el artefacto de susceptibilidad, ya habrán notado que mientras mayor sea la potencia del campo magnético del resonador, mayor será el artefacto, ya que los espines que están más cerca del material estarán sometidos a un valor mayor de campo magnético que los que están en bajo la influencia del campo magnético externo lejos del material. Así los que están más próximos al material precesarán a una frecuencia mayor (según la Ecuación de Larmor) induciéndose mayores desfases y por lo tanto una pérdida de la señal (incluso caída de esta).

Electricidad, Electromagnetismo e Inducción Electromagnética

Es sabido que una corriente eléctrica es producida por el movimiento de cargas (electrones) a través de un conductor. Lo que impulsa a los electrones a través del conductor es la diferencia de potencial, denominada también Tensión, Voltaje (**V**) o Fuerza electromotriz (**f.e.m.**). Cuando mayor es la diferencia de potencial, será mayor la velocidad de movimiento de las cargas a través del conductor. Por otro lado la cantidad de cargas que se mueven en el conductor depende

de la Intensidad de la corriente cuya unidad es el Ampere (**A**). Mientras mayor sea la intensidad de la corriente, más cargas pasarán por el conductor. Asociado a estos conceptos está el concepto de Resistencia (**R**) o Impedancia, cuya unidad es el Ohm (Ω) que es la oposición de un cuerpo, o del mismo conductor al paso de la corriente eléctrica, que depende de la naturaleza del cuerpo o conductor y de la diferencia de potencial e intensidad de corriente que pasa por él.

Una corriente eléctrica con todas estas características asociadas a ella es capaz de producir un campo magnético. El campo magnético producido por el paso de una corriente eléctrica se llama campo electromagnético, por lo que el magnetismo y la electricidad se encuentran relacionados por el concepto de electromagnetismo. El campo magnético inducido por el campo magnético se puede representar a través de la “regla de la mano derecha”. Según la Figura 13, en la regla de la mano derecha si la dirección de la corriente eléctrica va en el conductor que está en una mano en la dirección del pulgar, el campo magnético asociado a la corriente, o campo electromagnético, sigue la dirección de los otros dedos de la mano.

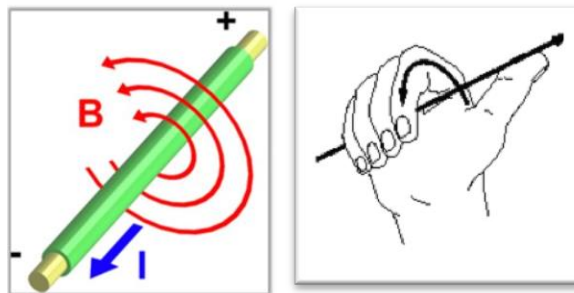


Figura 13: Regla de la mano derecha

La forma más fácil y eficiente de construir un electroimán es enrollando un conductor, formando espiras, alrededor de un núcleo ferromagnético [Figura 14](#)

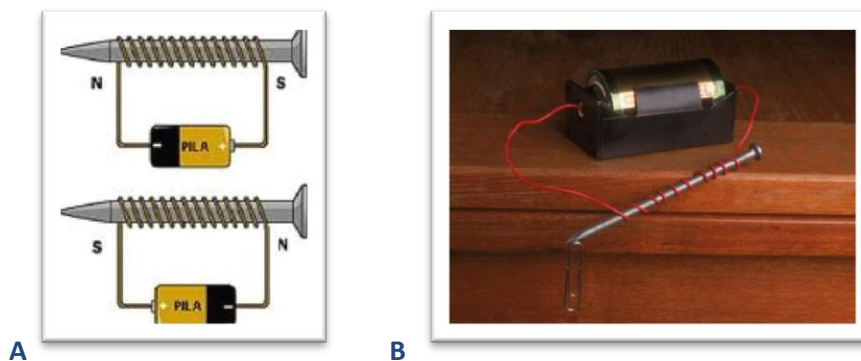


Figura 14: Electroimán casero

En la Figura 14A, vemos que dependiendo de cómo sea la polaridad de la batería, podemos manipular la polaridad del electroimán formado, por lo tanto se puede manipular el sentido del flujo magnético en las líneas de fuerza del campo magnético. En la Figura 14B se observa el electroimán en acción. Ahora bien, si uno desconecta la batería de los cables que conforman la espira, el núcleo ferromagnético (clavo) seguirá imantado, ya que sus dominios fueron alineados formando un monodominio debido a la acción del campo electromagnético. Este efecto también se llama “remanencia”. Por otro lado, si el voltaje de la pila aumenta, o se ponen muchas en serie, la potencia del campo magnético generado por el electroimán también aumentará, teóricamente en forma lineal. Si aumentamos en forma infinita la diferencia de potencial, llegará un momento en el que el campo magnético producido no aumentará más, a pesar del aumento del voltaje. Este efecto se llama “saturación”, y es producido porque al aumentar el voltaje, aumentará también la resistencia en el conductor, y esto disminuirá el rendimiento del electroimán, además de producirse calor, el que puede llegar a ser muy intenso.

Entonces, hemos visto que la producción de un electroimán a través de una espira conductora y un núcleo ferromagnético es un método eficiente, aunque tiene limitaciones del tipo térmico, derivado de la resistencia; pero tiene la ventaja de que permite “manipular” el flujo magnético del imán resultante. La representación de las líneas de fuerza del electroimán producido por una espira conductora se visualiza en la Figura 15. En esta figura podemos ver que el flujo se dirige de “arriba hacia abajo”, por lo que “arriba” estará el polo norte del imán, y “abajo” estará el polo sur. Además, en el interior de la espira se encuentra la mayor cantidad de líneas de fuerza, y además están más equidistantes entre ellas, por lo que se podría afirmar que en el interior de la espira, *el campo magnético es más potente y es más homogéneo* que fuera de los límites de la espira.

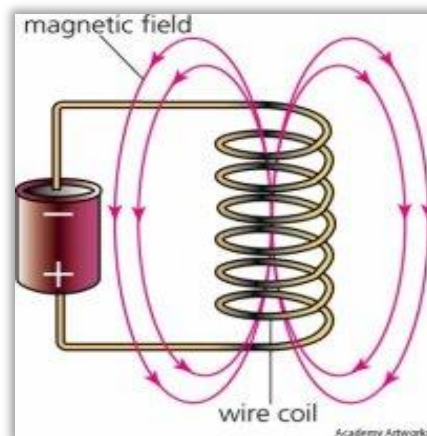


Figura 15: Líneas de fuerza de un electroimán del tipo “espira conductora”

Ahora, ya conocido este concepto, ¿qué pasaría si se enrolla la espira alrededor de un tubo?... Un tubo lo suficientemente grande como para que cupiera una persona acostada en su interior (Figura 16)

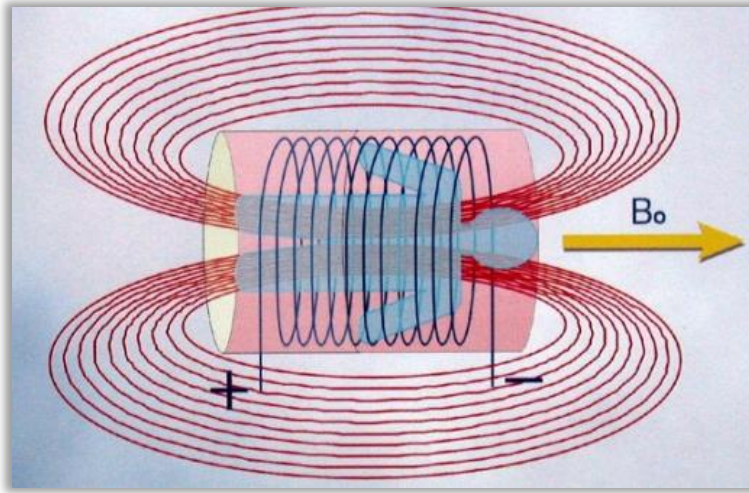


Figura 16: Disposición del campo magnético en un resonador con espiras

En la Figura 16, podemos ver que un electroimán según lo indicado anteriormente, puede utilizarse para poner una persona en su interior, y que si el campo magnético es más potente y homogéneo en el interior de este tubo (que en realidad ahora se parece a un túnel), que fuera de éste, estamos en presencia de un artefacto que “a lo mejor podría utilizarse como un resonador”, y que el sentido del campo magnético principal (B_0) va de “pies a cabeza”.

De lo visto en las últimas figuras, ya se dispone de la arquitectura de un equipo de resonancia magnética, y solo queda por resolver como alcanzar altas potencias de campo magnético (los resonadores actualmente trabajan a 1.5 y 3 Teslas), y para llegar a esas potencias es necesario aplicar mucha corriente a las espiras, lo que trae dos problemas: 1) El consumo de electricidad es excesivo, 2) La resistencia sería tan alta que el calor generado dejaría a un paciente virtualmente “rostitado”. Para solucionar estos problemas se recurrió a la tecnología superconductor, pero ¿qué es la superconducción?

La superconducción fue descubierta a principios del siglo XX, cuando Kamerlingh Onnes, en 1911, observó que la resistencia eléctrica del mercurio caía bruscamente a cero al enfriarlo a la temperatura de 4º K (-269 °C). Él esperaba que disminuyera gradualmente y no que se hiciera nula al llegar a cierta temperatura. Entonces, en este caso, el mercurio que en condiciones normales es un conductor que presenta resistencia eléctrica, al ser enfriado a una temperatura cercana al cero absoluto se transformó en un conductor que podía conducir corriente sin resistencia, o sea, se transformó en un **Superconductor**.

Entonces, cualquier superconductor es un conductor que al ser enfriado a muy bajas temperaturas es capaz de conducir la corriente eléctrica con resistencia nula, por lo tanto, no genera calor, y sin pierde energía, lo que le confiere además una alta estabilidad. Un

superconductor al ser enfriado alcanza una temperatura en la que su resistencia se hará bruscamente igual a cero. Esta temperatura se llama temperatura crítica (T_c) y cada superconductor tendrá un valor de T_c en el cual su resistencia se hará nula. La idea es buscar materiales que no tengan que enfriarse a temperaturas tan bajas, porque actualmente la forma de llegar a temperaturas bajísimas es a través de un gas que se licua a bajas temperaturas, como el helio, que se licua a 4°K (-269°C) El helio es caro, no así el nitrógeno líquido, que es muy barato y fácil de producir, pero se licúa a 77°K (-196°C), que es una temperatura “alta” para alcanzar el estado superconductor. Actualmente los resonadores usan helio, que permite que una espira superconductora de una aleación de Titanio y Niobio alcance el estado superconductor. Ahora, un imán producido por un superconductor también se llama electroimán, pero con el “apellido” superconductor. Por otro lado, el electroimán no superconductor, que gasta mucha corriente y produce calor se llama “electroimán resistivo”. Por esta razón, cuando se necesita construir magnetos muy potentes para su uso clínico en RM, la tecnología de elección es superconductiva. Esto implica que cuando el campo magnético de un resonador “es subido” por los ingenieros de servicio técnico, ellos aplican corriente al superconductor que está sumergido en un contenedor con helio líquido hasta llegar a 1.5 o 3T. En ese momento ellos cierran el circuito, y la corriente circula por el superconductor sin pérdidas y sin generar calor. Por esto no gasta corriente ni se calienta. El problema es que el campo magnético no se puede “apagar”, por lo que si uno entra a una sala de resonancia con el equipo apagado, el campo magnético siempre estará presente. El campo no se apaga nunca, a menos que eliminemos el helio al ambiente para terminar con la superconducción. Este proceso se llama Quench,.

En la Figura 17 vemos un esquema donde un conductor disminuye gradualmente su resistencia eléctrica a medida que la temperatura del sistema disminuye, pero cuando la temperatura alcanza el valor de temperatura crítica (T_c) para ese conductor, éste se hace superconductor y su resistencia se hace súbitamente nula. Como vemos también, no cualquier conductor se hace superconductor. El superconductor es un material que presenta esa capacidad al alcanzar su T_c . Un conductor común y corriente nunca será superconductor. Al disminuir la temperatura solo tendrá cada vez menos resistencia, pero nunca se hará nula, ni menos habrá un cambio brusco de su resistividad.

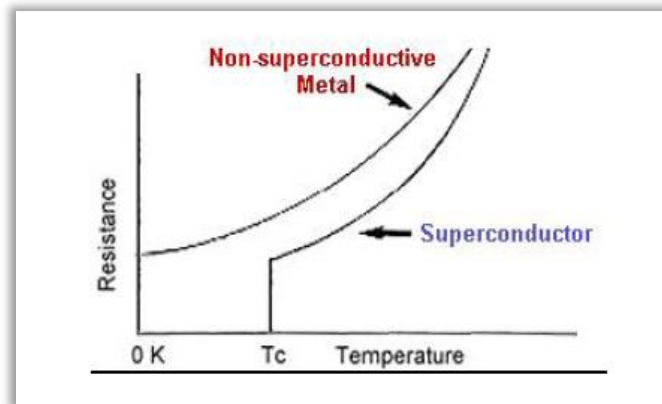


Figura 17: Efecto de la temperatura sobre la resistencia de un conductor y un superconductor

Ya se había mencionado que la unidad de intensidad de campo magnético en el sistema cgs es el Gauss y en el mks es el Tesla (T). Para hacer una relación, podríamos decir que un Tesla equivale a 10.000 Gauss. La Tierra, posee un campo magnético que es el que permite que la aguja imantada de una brújula apunte siempre hacia el norte. El campo magnético de la Tierra tiene una potencia de 0,5 Gauss. No es muy potente, pero si muy masivo. Si 1 Tesla equivale a 10.000 Gauss, un resonador de 1,5T tendría una potencia de 15.000 Gauss. Si lo comparamos con el campo magnético terrestre, que es de 0,5 Gauss, éste resonador es 30.000 veces más potente que el de la Tierra, pero en una masa muchísimo menor que la del planeta. Figura 18.



Figura 18: Equivalencia Teslas – Gauss en la Tierra

Inducción electromagnética

Del mismo modo que unas cargas en movimiento, es decir; una corriente eléctrica son capaces de inducir un campo magnético en un conductor; un campo magnético en movimiento (también denominado “campo magnético variable”) es capaz de inducir una corriente eléctrica en

un conductor. Este último fenómeno es el denominado “inducción electromagnética”, y en ésta, la magnitud del voltaje inducido es proporcional a la variación del flujo magnético (Ley de Faraday).

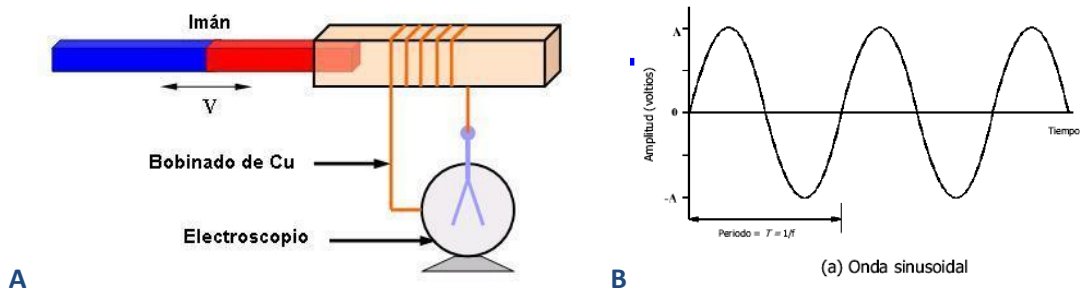


Figura 19A - 19B: Inducción Electromagnética

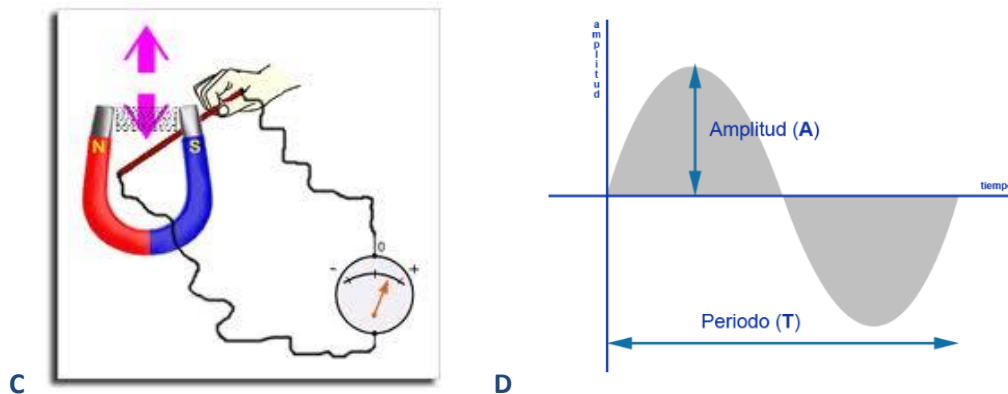


Figura 19C - 19D: Inducción Electromagnética

En la Figura 19A se observa que, al mover el imán dentro de un solenoide conductor, en el conductor se induce una corriente eléctrica que puede ser detectada y cuantificada. Si el imán se mueve siempre con la misma amplitud y velocidad, y por el hecho de que el imán “se aleja y se acerca del conductor”, es que la corriente inducida es de tipo alterna, lo que se representa como una senoide que puede verse en la Figura 19B. En esta figura, se visualiza la corriente sinusoidal (alterna) inducida. Al analizar la Figura 19D, vemos que en esta corriente inducida la distancia entre 2 picos se mantiene constante (lo que se llama “periodo”), y esto es debido a que el imán se mueve para adentro y afuera con una velocidad constante. Del periodo puede extraerse la frecuencia, o sea el tiempo que demora al cambio de un periodo a otro. La frecuencia se expresa en Hertz (ciclos por segundo). La amplitud se relaciona con la intensidad de la corriente inducida, la cual también es constante durante el tiempo, y esto se debe a que el imán es el mismo durante todo el movimiento, es decir, el imán no fue cambiando de tamaño, ni tampoco cambió la cantidad de vueltas del solenoide. En la Figura 19C podemos ver que la inducción

electromagnética también se produce cuando el imán está fijo, pero el conductor se mueve. Esta situación ocurre en los dínamos y generadores, donde el movimiento mecánico de un conductor entre un imán, es capaz de generar corriente.

En la RM también se visualiza este fenómeno. En la RM se generan vectores magnéticos, el vector de magnetización longitudinal (M_z), y el vector de magnetización transversal (M_{xy}). El vector M_{xy} se genera tras la excitación nuclear mediante la aplicación de un pulso de RF. Una vez suspendido el pulso, este vector; que gira en torno al eje longitudinal z , va disminuyendo en tamaño. Si se sitúa un solenoide (una bobina, a la que denominaremos antena) en posición perpendicular respecto al vector M_{xy} generará una corriente en la antena. Si la antena no se situara perpendicular al vector no se produciría esta inducción (Figura 20).

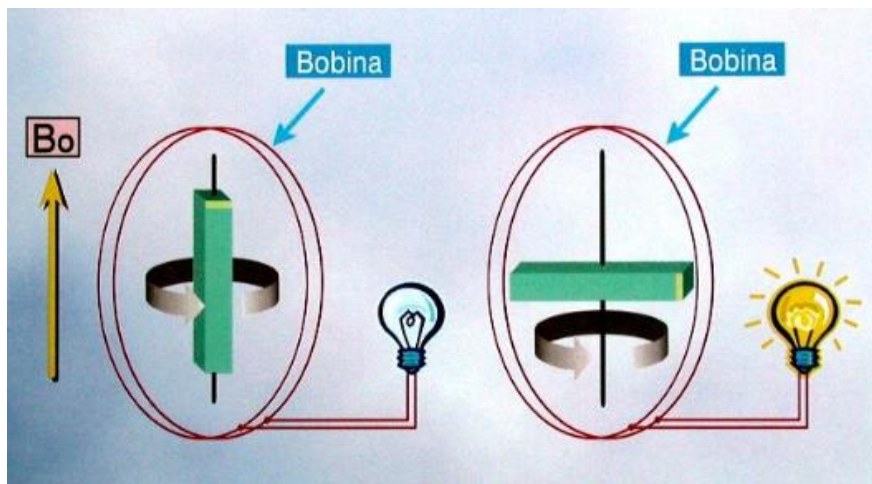


Figura 20: Inducción: Bobinas paralela y perpendicular

El vector M_{xy} es un vector magnético en movimiento que podrá inducir una corriente eléctrica en la antena, y esta señal eléctrica podría usarse para adquirir la señal. Esta señal, por su naturaleza de obtención se llama "señal de inducción". Si el vector no disminuyera de tamaño, la señal de inducción sería igual que en el ejemplo registrado en la Figura 18B, donde la frecuencia de la sinusoide sería igual a la cantidad de vueltas por segundo que da el vector M_{xy} en torno al eje z (en un campo de 1.5T es alrededor de 63 millones de vueltas por segundo), y la amplitud se mantendría constante, ya que el vector nunca disminuye de tamaño (Figura 21)

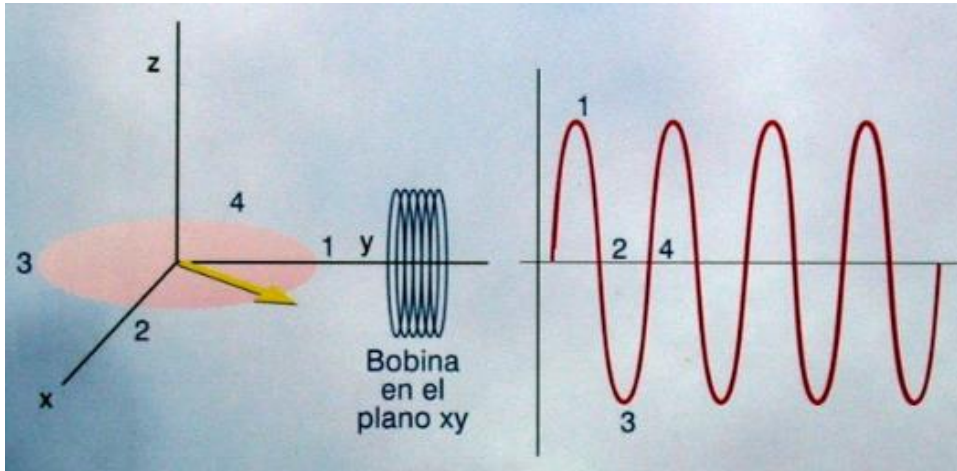


Figura 21: Señal de inducción con vector constante

Como el vector va disminuyendo de tamaño, la situación que se produce en realidad es la mostrada en la Figura 22.

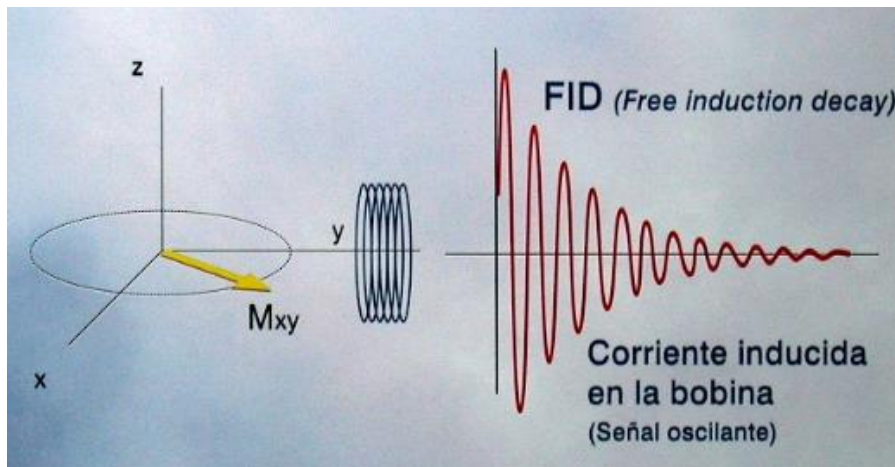


Figura 22: Señal de inducción con vector decreciente (FID)

En realidad, durante la **“relajación nuclear”**, el vector M_{xy} va disminuyendo de tamaño a medida que transcurre el tiempo, mientras mantiene su frecuencia, por lo menos al principio. Esto hace que la señal inducida en la bobina sea de una frecuencia prácticamente constante, pero con amplitud decreciente, debido a la disminución en el tamaño (“módulo”) del vector. La señal, que tiene la apariencia de la señal de la Figura 22 recibe el nombre de *Free Induction Decay (FID)* o *“Caída libre de la inducción”*. Esta es la señal fundamental que se utiliza en RM, la que permitirá registrar el Eco, lo que finalmente permitirá obtener una imagen a través de una secuencia de pulso.