

PRINCIPIOS FÍSICOS DE RESONANCIA MAGNÉTICA

Campo Magnético Principal, Gradientes Magnéticos y Campo de Radiofrecuencias

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

Introducción

El campo magnético principal (denominado Campo B0), las gradientes magnéticas (denominadas genéricamente como Gn) y el campo de radiofrecuencias (denominado como Campo de RF o Campo B1), son componentes fundamentales del equipamiento de un resonador. Todos ellos están involucrados en la generación de los fenómenos de Equilibrio, Excitación y Relajación nuclear y son representados en componentes importantísimos del equipamiento (hardware) de un resonador.

Campo Magnético Principal (Campo B0)

El campo magnético principal debe ser intenso, idealmente de una gran potencia, ya que la potencia se relaciona con la resolución de la imagen, secundaria a una alta intensidad de señal.

La función principal del campo magnético principal es la de establecer la condición de equilibrio nuclear (denominado Equilibrio de Boltzmann en el magneto). Esta condición de equilibrio es la inicial en el fenómeno de la resonancia magnética de uso clínico-imagenológico. Este campo magnético debe cumplir con las siguientes características:

1. Debe ser muy homogéneo: La potencia de B0 debe ser idealmente igual en cualquier punto en el interior del túnel (bore) de un resonador.
2. Debe ser de fácil generación: Los magnetos permanentes son los que lo generan más fácilmente, ya que están permanentemente imantados y sin ninguna necesidad de aporte de energía externo para la mantención del flujo magnético, sin embargo, presentan el inconveniente de su peso. Un resonador permanente de 0.32 T tiene un peso de 16 toneladas. Esto limita la capacidad de instalar un equipo permanente, ya que requiere de losas extremadamente resistentes. Siguiendo con este razonamiento, un resonador permanente solo puede ser utilizado como tecnología para equipos de bajo campo magnético (inferior a 0.5T). Un resonador permanente de 1.5T pesaría más de 50 toneladas, lo que lo hace inviable desde el punto de vista de los requerimientos de obras para instalarlo. Un resonador resistivo gasta mucha energía para generar altos campos magnéticos. Un electroimán superconductor de 1.5 T pesa

1

1

alrededor de 4,5 toneladas y gasta energía una sola vez (al momento de “levantar” el campo magnético) y en adelante solo “consume” gas criógeno, necesario para mantener las bajas temperaturas que requiere la superconducción. Un magneto superconductor prácticamente no tiene límite de intensidad de campo magnético, de hecho actualmente existen equipos de 7 T (usados principalmente en investigación). En la figura 1 encontraremos un resumen de los distintos tipos de magnetos.

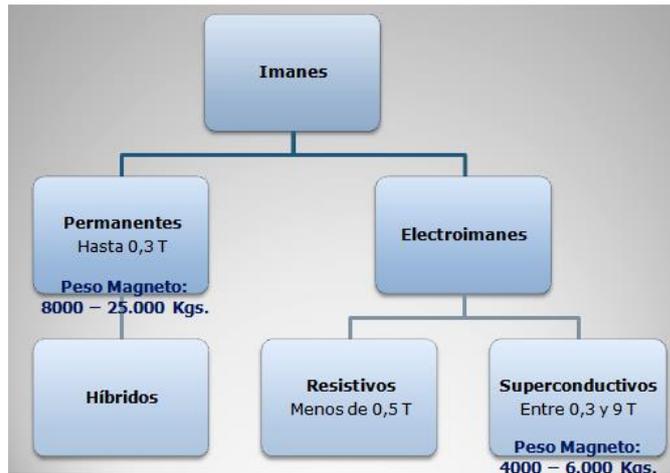


Figura 1: Tipos de magnetos

3. Debe permitir que sea modificado a través de las gradientes: En el campo magnético principal debe poder establecerse variaciones lineales de la potencia de campo magnético en una dirección del espacio. A esto se le llama gradiente magnético. Un campo magnético sin gradientes solo permite establecer el estado de equilibrio de Boltzmann en el magneto, pero no permite realizar cortes tomográficos ni codificar la señal para posteriormente reconstruir la imagen.

De lo anteriormente visto, en la actualidad la tecnología de los resonadores es así: Los resonadores de bajo campo magnético (de menos de 0.5T) utilizan magnetos permanentes, mientras que los resonadores de alto campo magnético (1.5T, 3T y hasta 7T) utilizan magnetos con tecnología superconductor. Se ha discontinuado la producción de resonadores de 0.5T, 1T y 2T superconductivos.

La forma del conductor en los resonadores superconductivos o de los “plates” de los imanes permanentes, determinará las líneas de fuerza del campo magnético (Figura 2)



Figura 2: Tipo de magneto, forma del conductor y líneas de fuerza de B_0

En la Figura 2 observamos que una barra tiene las líneas de fuerza concentradas en los extremos, ya que el flujo magnético va desde el polo norte al polo sur. Al doblar la barra en forma de U, vemos que el flujo se dirige entre los extremos, estableciendo un flujo de líneas que van de polo a polo, con una alta concentración de líneas (alta potencia del campo) y equidistantes entre sí (alta homogeneidad del campo magnético establecido). A la derecha tenemos un diseño solenoidal (en forma de espira), en la que las líneas de fuerza se concentran en el interior del solenoide, donde se encuentra también la más alta densidad de líneas (o sea alta intensidad del campo magnético) y una gran equidistancia entre ellas (gran homogeneidad). El diseño más eficiente de magneto es el solenoidal, por lo que es el elegido para magnetos superconductores de alto rendimiento.

La homogeneidad del campo magnético se mide en partes por millón (ppm) las cuales son medidas en un volumen esférico de un determinado diámetro (Diameter of a Spherical Volume o DSV). Existen DSV estandarizados a 40, 45 y 50 cm. Si situamos un volumen esférico, por ejemplo, de 50 cm de diámetro, y este volumen se divide en un millón de partes, habrá una porción de estas partes que tendrá un valor de campo magnético distinto al resto. Las homogeneidades actualmente alcanzables están en torno a las 0,6 ppm. El máximo permisible de inhomogeneidad es de 6 ppm (Figura 3).

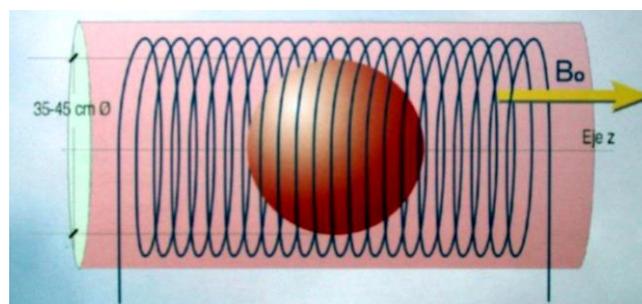


Figura 3: Homogeneidad del campo magnético principal

Conociendo la fórmula de Larmor, en la que la frecuencia de precesión de los espines depende de la constante giromagnética del hidrógeno, multiplicada por la potencia del campo magnético, se deduce que en la zona del magneto que es homogénea, todos los espines en este sector tendrán la misma frecuencia de precesión (es decir girarán a la misma velocidad). Los espines que están en las zonas inhomogéneas del campo magnético tendrán una frecuencia de giro distinta a las demás, o sea, estarán desfasadas. Vale señalar que es imposible construir un imán absolutamente homogéneo, ya que los mismos componentes y la inducción del campo magnético por parte de la corriente eléctrica que lo genera influyen en la inhomogeneidad. Debido a la inhomogeneidad del campo magnético, no todos los espines situados bajo la influencia de un campo magnético precesará a la misma frecuencia, sino que algunos de los espines, los sometidos a las zonas inhomogéneas del campo, precesarán a una frecuencia distinta. Para mejorar la homogeneidad del campo magnético, durante la instalación de un resonador se realiza un procedimiento denominado "shimming pasivo". Esta homogeneidad óptima se mantendrá mientras no varíen las condiciones del entorno del imán. Por ejemplo, si se instalan en el entorno grandes masas metálicas móviles, como un ascensor, este shimming no será útil y aumentará la inhomogeneidad del campo magnético, la que tendrá implicancias por ejemplo en imperfecciones en la supresión espectral de la grasa y artefactos de imagen en algunas secuencias, como la secuencia EPI.

Gradientes magnéticos

El concepto de gradiente es conocido. Por ejemplo, el gradiente osmótico, dado por la diferencia de concentración de iones entre un lugar y otro, en que en un lugar existe una alta concentración, y en el otro una concentración menor. Un gradiente, por definición es una diferencia de cantidad, o de concentración de una sustancia entre un lugar y otro. Esta variación debe ser siempre lineal, por lo que se establece en un eje del espacio, o sea, en una dirección y sentido. En la Figura 4 vemos un ejemplo de gradiente de color

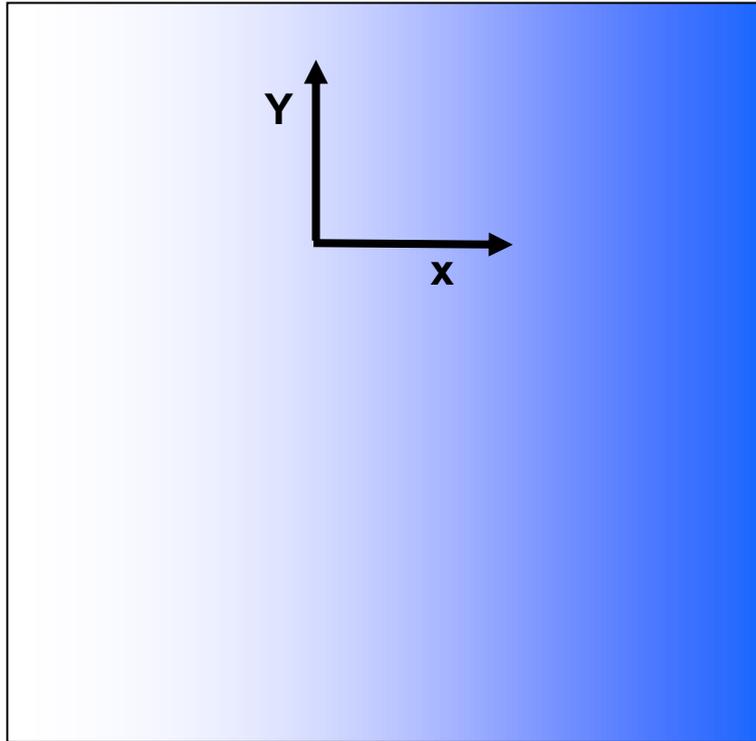


Figura 4: Gradiente de color

En la figura 4 se observa una variación de color, desde el color blanco a la máxima intensidad de color azul, pasando por una gama de colores celestes desde el más claro al más oscuro. En el ejemplo la variación se establece en la dirección del eje X, por lo que tendremos un gradiente de color en la dirección y sentido del eje X. De este mismo modo podemos hacer una analogía con un gradiente de campo magnético

Gradientes Magnéticos

- Variaciones del B_0 medidas a lo largo de una dirección.
- Campo homogéneo \Rightarrow Precisa crear gradientes
- Gradientes deben ser lineales.
- Creados por bobinas de gradientes.
- Actúan por poco tiempo
- Se instalan rápidamente
- Tienen un valor máximo: G_{max} (Amplitud Máxima del Gradiente)

Una imagen en tonos azules de un equipo de resonancia magnética, mostrando el tubo del paciente y la estructura del escáner.

Figura 5: Gradientes magnéticos

Los gradientes magnéticos son variaciones del campo magnético desde un punto de mayor intensidad a otro de menor intensidad, en una distancia determinada. La medida de la variación se da en variaciones del rango de los miliTeslas en un metro.

Una condición importante de las gradientes es que sean lineales. Teniendo el valor inicial y el final de la potencia del campo magnético en el área delimitada por la gradiente, el valor del campo magnético se puede conocer en cada punto de la recta. En cada punto de la recta tendremos entonces un valor de campo magnético, que influye en la frecuencia de precesión de los espines que pudieran estar sometidos a la acción de esta gradiente. Así los espines sometidos a la zona de la gradiente con menor valor precesarán más lentamente que aquellos sometidos a los valores más altos del campo magnético dentro de esta gradiente.

Las gradientes son necesarias para provocar variaciones en el campo magnético, ya que si al campo no se le hace nada, permanece con una potencia constante e invariable en el tiempo, solo modificada por las zonas inhomogéneas de este campo.

Las gradientes magnéticas son generadas por las bobinas de gradiente. Existen distintos tipos de bobina, antiguamente eran de tipo "loop", actualmente son de estado sólido, similares a una lámina de cobre con una espira impresa y dentro de una cobertura de estado sólido

Las gradientes no están activas todo el tiempo, sino que actúan sólo cuando son necesarias y esto es al momento de realizar los cortes tomográficos y al momento de recibir la señal en el período de relajación, permitiendo la codificación de la señal. El tiempo en que están activas las gradientes va desde los mili a los microsegundos, por lo que aplican en forma de "pulsos" de gradientes. Durante un examen se envían pulsos de gradientes cuando son necesarios dentro de las distintas secuencias de pulso que lo componen.

Las gradientes tienen distintos parámetros que las caracterizan:

1. Amplitud máxima del gradiente (G_{máx}): Corresponde al valor máximo que puede adoptar la. El G_{máx} es el máximo valor de la pendiente y se mide en mT/m (miliTeslas por metro). Un mayor G_{máx} significa que la variación de un punto a otro es mayor y, por lo tanto, es una gradiente más potente. Si tenemos una gradiente A que tiene un G_{máx} de 20 mT/m, significa que en un eje del espacio es capaz de establecer una diferencia de campo magnético de 20 mT entre los extremos del eje que están separados por un metro de distancia. Si comparamos esta gradiente con una gradiente B de 40 mT/m, tendremos que la gradiente B es más potente, ya que en la misma distancia de un metro establece el doble de variación de campo magnético que la gradiente A, o sea, la pendiente que se establece es el doble más grande (Figura 6)

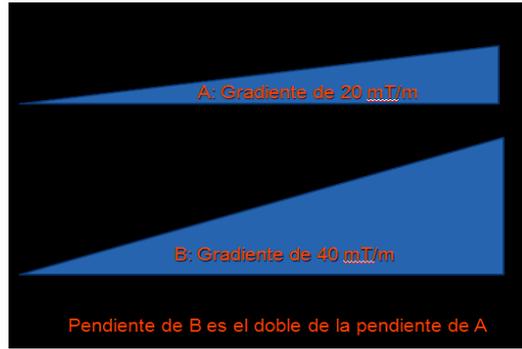


Figura 6: Comparación entre gradientes

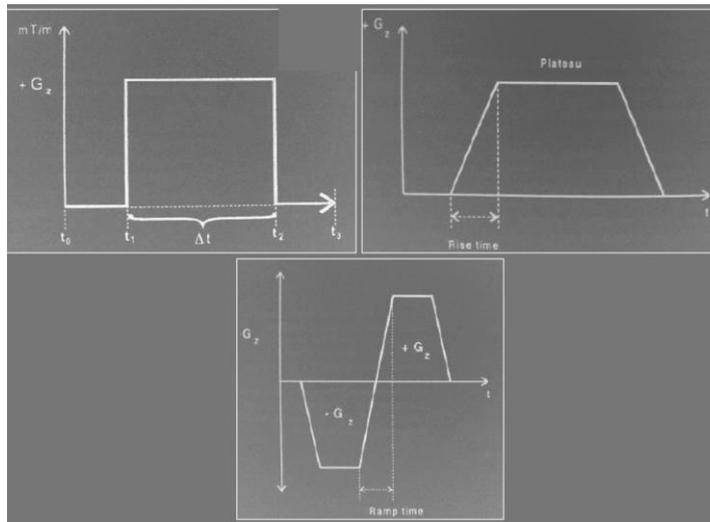


Figura 7: Diagrama de las gradientes

La Figura 7 muestra un esquema acerca de las gradientes. En este esquema se ve la forma en que una gradiente llega a su valor máximo. La gradiente no está activa todo el tiempo, sino que en un momento se instala automáticamente, alcanza su valor máximo, se mantiene trabajando durante un periodo de tiempo Δt y luego se corta abruptamente. La condición descrita es la de la imagen superior izquierda, y es ideal, pero no es lo que ocurre en realidad, puesto que cuando se le aplica corriente a la bobina de gradiente mediante, a la gradiente le toma un tiempo instalarse y alcanzar su $G_{m\acute{a}x}$, como se ve en la imagen superior derecha. El tiempo que demora la gradiente en adquirir su valor máximo se llama Rise Time (RT)

2. Rise Time (RT): El tiempo que pasa desde que se da la instrucción de instalar la gradiente hasta que alcanza su $G_{m\acute{a}x}$ se denomina *Rise Time* o *Tiempo de Emergencia de la Gradiente*. La gradiente se mantiene activa durante un periodo ΔT , denominado *Duty Cycle*, y luego se corta la energía a la bobina, tampoco se termina de inmediato, sino que tiene una cierta latencia que se denomina *Fall Time* o *Tiempo de Caída*, que es igual al Rise Time.

3. **Ramp Time (RaT):** Las gradientes normalmente se aplican como pulsos bipolares y eso significa que se invierte la polaridad de la gradiente y el que era el valor mínimo de la gradiente pasa a ser el valor máximo y viceversa. Hay, entonces, dos pendientes involucradas. Siempre en una gradiente bipolar, entre los dos lóbulos, el lóbulo negativo G- y el lóbulo positivo G+ las gradientes pasan por el valor 0 y al finalizar la gradiente bipolar se vuelve a 0 nuevamente. El valor 0 no implica que en ese punto el campo magnético sea nulo, sino que el valor es igual al del campo magnético principal. En el máximo valor negativo (G-) el valor del campo magnético es menor que el valor del campo magnético principal. En el máximo valor positivo (G+) el valor del campo magnético alcanzado será mayor que el del campo magnético principal (Ver Figura 8). El tiempo que transcurre entre el paso desde el máximo valor negativo hasta el máximo valor positivo en una gradiente bipolar se denomina *Ramp Time* y es igual a dos veces el Rise Time. A medida que las gradientes son más poderosas y más avanzadas, tienen Rise Times y, por ende, Ramp Times cada vez más pequeños.

La instalación de gradientes bipolares de esta forma se conoce como alternancia de las gradientes. Cuando los ramp o rise times son muy pequeños producen variaciones bruscas en la dirección de los campos magnéticos. Si un conductor conduce corriente y se somete a la acción de campos magnéticos variables, la conducción en ese conductor se altera, ya que se producen corrientes parásitas y enlentecimiento del flujo eléctrico. Entonces, el valor del Ramp Time tiene influencia sobre la conducción eléctrica. Análogamente, los pacientes sometidos a un examen de RM verán interferidos los potenciales de acción en sus nervios periféricos y en lugar de corriente estos conducen potenciales de acción causado por Ramp Times cortos. Mientras más cortos sean, la alternancia es más rápida e interfiere aún más en los potenciales de acción. En los resonadores con un alto desempeño de gradientes se puede observar que los pacientes presenten parestesias y otras incomodidades secundarias a la acción de los gradientes sobre los nervios periféricos.

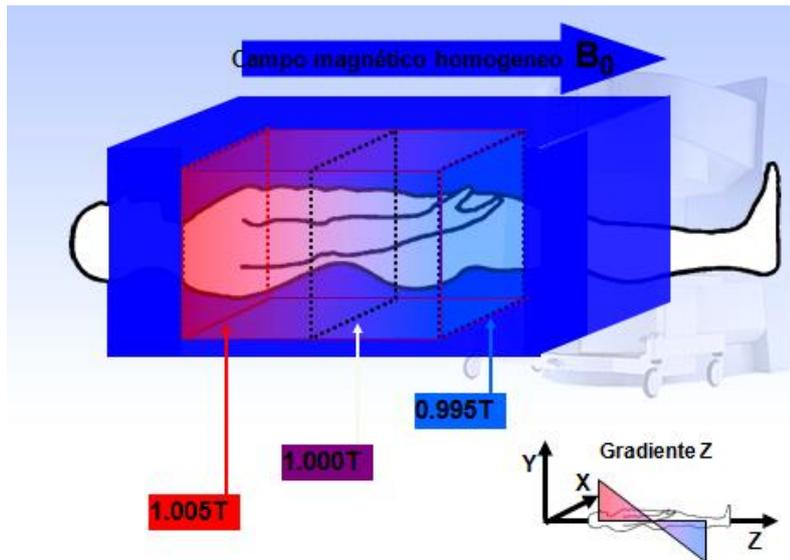


Figura 8: Gradiente magnético en el eje Z

4. Slew Rate (SR): Es una medida de desempeño de una gradiente. Se define por la relación entre $G_{\text{máx}}$, dividido por el RT. ($SR = G_{\text{máx}} / RT$) y sus unidades son en T/m/seg. Una gradiente de alto rendimiento tendrá un valor de SR alto, lo que implica que tiene un alto valor de $G_{\text{máx}}$ y un corto valor de RT. Sirve para comparar 2 equipos entre sí. El equipo que tiene el SR más alto es el que tiene una mejor performance de las gradientes comparado con el que tiene uno de menor valor.

Concepto de Fase y Frecuencia

Concepto de Fase y Frecuencia

- Frecuencia: Velocidad de oscilación en el tiempo
 - Se mide en ciclos / segundo
 - Frecuencias de precesión (vueltas por seg)
- Fase: Ángulo entre 2 vectores

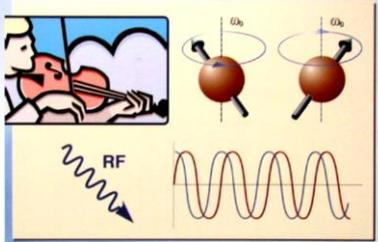


Figura 9: Concepto de fase y frecuencia

Hay dos conceptos importantes que son la *Frecuencia* y la *Fase*. La **Frecuencia** nos habla de velocidad o tasa de cambio y es la cantidad de oscilaciones de un fenómeno en función de una unidad de tiempo. Por ejemplo, si algo gira dando 20 vueltas en un minuto sobre su eje, se puede decir que gira a una frecuencia de 20 vueltas/min. Habitualmente la frecuencia se mide en ciclos por segundo o Hertz. Cuando los espines giran en el movimiento de precesión, a través de la ecuación de Larmor se puede conocer cuántas vueltas están dando por segundo. A 1 Tesla se puede determinar que darán 42,58 millones de vueltas por segundo, o sea, su frecuencia de precesión será de 42,58 MegaHertz (MHz)

La **Fase** corresponde simplemente a una diferencia del ángulo formado entre dos vectores. Es decir, si existen dos vectores, ambos en 0° no habrá diferencia de ángulo entre ellos, o sea, diremos que están en fase. Si hay dos vectores en la misma dirección, pero con sentido contrario, diremos que existe una pérdida de fase entre ellos, o que entre ellos no hay coherencia de fase, o simplemente que no están en fase. La diferencia de fase entre ellos, en este caso es de 180° .

Estos dos conceptos se relacionan entre sí. Si dos espines están en la misma fase y apuntando con la misma dirección y sentido, la diferencia en ángulo o fase entre ellos es de 0° , por lo que no presentan desfase. El desfase entonces implica que la diferencia medida en unidades de grados de ángulo entre dos vectores es distinta de 0.

Si los mismos espines son puestos en un imán, estos inevitablemente comenzarán a precesar. Si están sometidos al mismo valor de campo magnético ellos precesarán exactamente con la misma frecuencia. Si precesan exactamente a la misma velocidad el desfase en el tiempo será igual a 0° .

Si los mismos dos espines se sitúan dentro del imán, pero justo uno de ellos se ubica en una zona inhomogénea del imán, éstos precesarán a frecuencias distintas, cambiando su fase, por lo que entonces podremos decir que están desfasados.

Por lo tanto, son dos conceptos relacionados puesto que acabamos de ver que la *fase es consecuencia de la frecuencia*. Desde el punto de vista práctico, en la realidad, donde no tenemos dos espines, sino que tenemos miles de billones de ellos, es muy difícil caracterizar esta muestra desde el punto de vista de la frecuencia. Es más fácil fijarse en la fase o desfase presente entre ellos. Si toda esta muestra está en fase, se infiere que no experimenta ningún cambio de frecuencia. Si encontramos pocos desfases podremos concluir que existen pequeños cambios de frecuencia entre ellos, por ejemplo, es lo que pasaría en un campo magnético con la mayoría de los espines ubicados en la zona homogénea del campo magnético, y los menos en la zona inhomogénea. Si se observan muchos desfases, se puede suponer que existen grandes cambios de frecuencia entre ellos, por ejemplo, es lo que pasaría si esta muestra fuera sometida a la acción de los gradientes magnéticos.

¿Dónde habrá más desfase, cuando un espin precesa a mayor frecuencia o cuando precesa a menor frecuencia? No se sabe. No se puede predecir el grado de desfase, sino sólo que habrá desfase. También es probable que si un espin precesa muy rápido respecto a otro, tenga períodos en que esté en una fase completamente opuesta respecto al “espin de referencia” (180° de desfase) y períodos en que esté en fase con respecto al mismo espin anterior (0° de desfase), pero no es predecible “a primera vista”. Este efecto es la base del Chemical Shift de 2º orden, también conocido como “Fenómeno de cancelación de fase”. Una forma clara de ver el concepto de fase y frecuencia se visualiza al analizar dos ondas seno y coseno

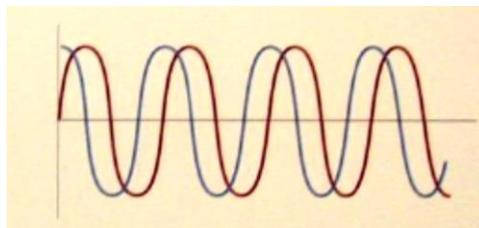


Figura 10: Funciones seno y coseno

En la Figura 10 están graficadas una función seno (en rojo) y coseno (en azul). Si bien es cierto, ambas funciones en el gráfico tienen la misma frecuencia, estas parten desde el inicio desfasadas en 90° ($\pi/2$). Como la frecuencia no varía para ambas funciones, el desfase en 90° nunca variará. O sea, si nunca hay cambios en la frecuencia, nunca se traducirá en un cambio de fase. En todas las situaciones donde está involucrada la frecuencia de precesión, esta es calculada a través de la Ecuación de Larmor ($\omega = B * \gamma$), tanto en un campo magnético principal homogéneo e inhomogéneo, como en un campo modificado a través de gradientes magnéticos.

Los gradientes magnéticos son generados a través de bobinas de estado sólido, sin embargo, funcionan en forma de espira tipo “loop”. En la Figura 11 se ve la forma del campo magnético inducido en una espira loop. El sentido de las líneas de fuerza del campo magnético inducido por la corriente es de derecha a izquierda. Hay que fijarse el sentido de la corriente

en el conductor, ya que la corriente circulando en el sentido en el que se muestra en el esquema, y debido a la regla de la mano derecha, es que inducirá un campo magnético en sentido derecha izquierda. Si se invierte el flujo de corriente, el flujo magnético también cambiará al sentido contrario (izquierda-derecha). Es importante que no cambien los parámetros de amperaje y voltaje de la corriente, a pesar de que se cambie el sentido de ella, esto es para que los campos inducidos sean exactamente iguales en intensidad y dirección, pero solo con sentido contrario.

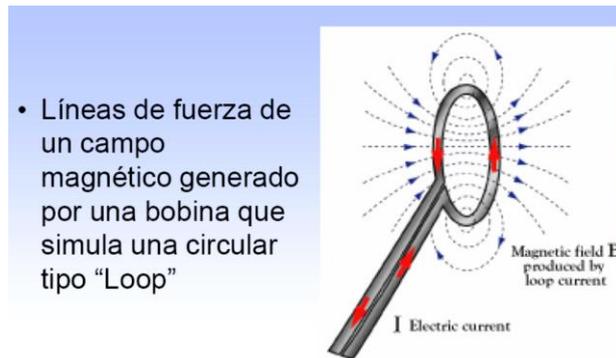


Figura 11: Campo inducido por bobina circular tipo loop

Las bobinas de gradiente se encuentran en el interior del túnel del magneto, por lo que están sometidas al campo magnético principal. En la Figura 12 podremos apreciar su mecanismo de acción.

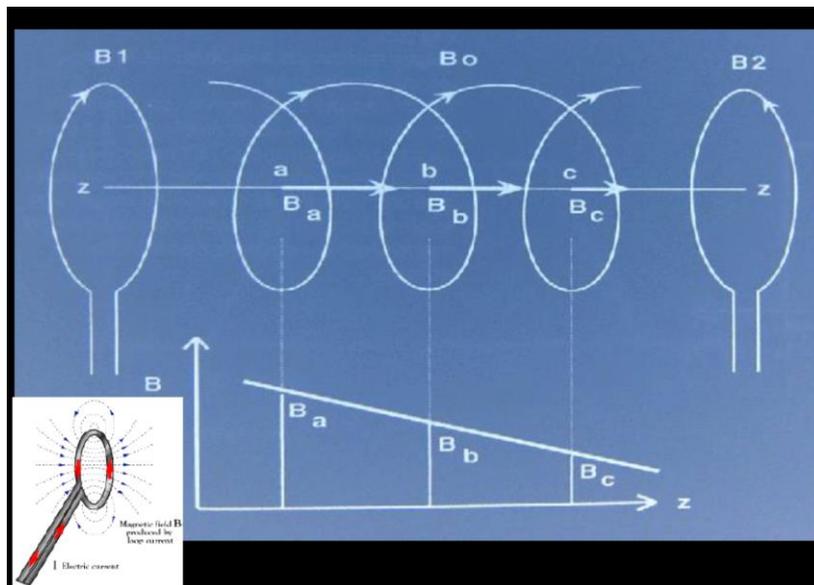


Figura 12: Acción de los gradientes magnéticos

En la Figura 12 se puede apreciar el embobinado principal de un resonador superconductor el cual genera un campo B_0 en la dirección y sentido del eje z que es por convención el eje del campo principal. Tenemos, entonces, un campo magnético inducido por este embobinado principal que es igual a los campos solenoidales anteriormente vistos. En un extremo del imán pondremos una bobina tipo loop por la que circulará corriente en la misma dirección y sentido del embobinado principal, y en el extremo contrario pondremos otra bobina loop pero con la corriente circulando en el sentido opuesto a la corriente que genera el campo magnético principal, produciendo así un campo magnético con un flujo magnético que posee líneas de fuerza que van en el sentido contrario a las líneas de campo magnético principal. Los dos campos inducidos por las dos bobinas se sumarán vectorialmente, en este caso, se restan, generando el efecto de que en un extremo exista un mayor campo. Este campo mayor se genera en el extremo donde la corriente en la bobina loop va en la misma dirección y sentido que la del embobinado principal. En el otro extremo del magneto se generará un campo magnético que se opone en sentido al campo inducido por la bobina loop anterior, por lo que se generará una gradiente lineal en la que en un extremo el valor del campo magnético será levemente superior al campo magnético principal, mientras que en el extremo donde está la bobina con flujo eléctrico y magnético opuesto, se generará el punto con un valor de campo magnético levemente inferior al valor del campo magnético principal (Ver nuevamente la Figura 8). De esta forma se generan las gradientes, las cuales pueden hacerse bipolares solo cambiando el sentido de la corriente que circula por ambas bobinas de gradiente. Hoy en día solo se utilizan bobinas de estado sólido.

Las gradientes no se establecen sólo en la dirección del campo magnético, sino que pueden estar en cualquier orientación (ejes x e y)

A lo largo de la trayectoria de la gradiente, los espines van a precesar de mayor en menor frecuencia en el mismo sentido de la gradiente. Además, con la ecuación de Larmor se puede conocer exactamente la frecuencia de precesión de los espines situados en cualquier punto a lo largo de la gradiente.

La corriente necesaria para el funcionamiento de las gradientes es suministrada por el Amplificador de gradiente. Si el voltaje de la corriente que genera el amplificador es mayor, la amplitud (pendiente) del gradiente generado también será mayor. El amplificador controlará al mismo tiempo las dos bobinas que se encuentran opuestas entre sí, lo que generará la forma lineal que debe necesariamente adoptar un gradiente magnético (Figura 13).

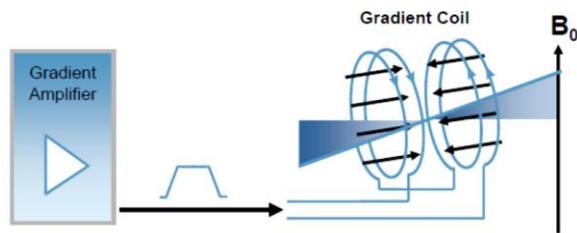


Figura 13: Gradientes y Amplificador de gradientes

Siempre habrá pares de bobinas de gradiente enfrentadas en cada uno de los tres ejes del espacio, controlado por un amplificador de gradientes por cada par, por lo que en un resonador existe un amplificador de gradientes para el eje Z, otro para el eje X y otro para el eje Y (Figura 14)

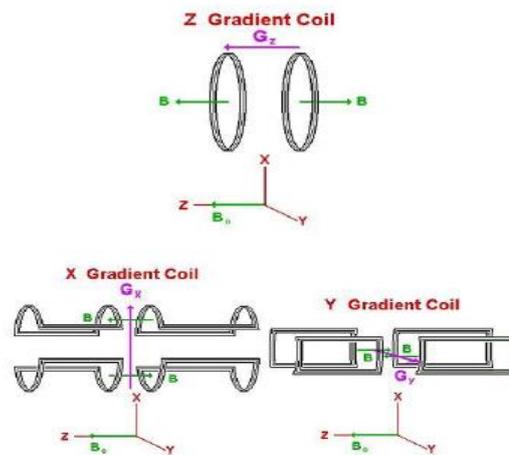


Figura 14: Ejes de gradientes

Si ponemos las bobinas de gradiente en el interior del túnel (bore), y también ponemos un paciente, veremos lo que sucede en la Figura 15

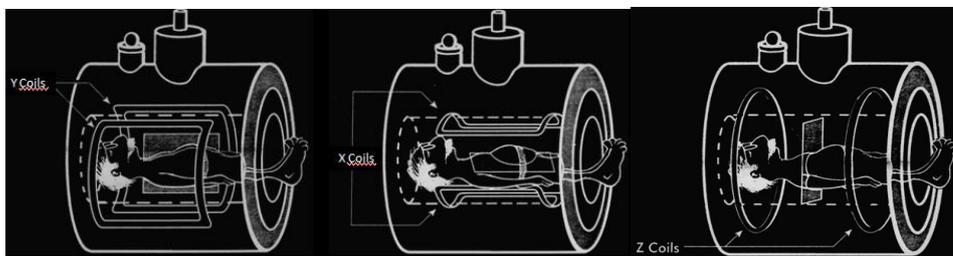


Figura 15: Ejes de gradientes

Su función inicial es la de determinar el plano tomográfico. Al activarse las bobinas del eje Y se pueden hacer los planos sagitales, al activarse las del eje X se pueden realizar los planos coronales, y al activarse las del eje Z se pueden adquirir imágenes axiales. Para hacer planos oblicuos basta con combinar la acción de los gradientes en más de un eje. De este modo si queremos hacer cortes axiales oblicuos, como por ejemplo para ver un disco vertebral L5-S1, basta con activar al mismo tiempo los ejes X y Z, con una mayor intensidad de corriente en el eje Z que en el eje X.

Conocidos los gradientes magnéticos, se verá el efecto de los gradientes sobre la frecuencia de precesión de los espines, y como se refleja este efecto sobre su fase.

Ya hemos visto que la diferencia en la fase entre dos vectores (para nosotros entre dos vectores de espin, o sencillamente espines) se mide en unidades de ángulo formado entre dos vectores. Esta diferencia de ángulo se denomina “phase shift”. Dos vectores que están en la misma dirección y sentido, y que giran (precesan, en el caso de los espines) a la misma frecuencia, nunca van a cambiar su phase shift. En este caso su shift será de 0 grados. Si dos espines se encuentran al inicio con un shift de 180°, es decir tienen la misma dirección, pero con sentido contrario, y siempre precesan a la misma frecuencia, nunca cambiarán su shift, y siempre se mantendrán con una diferencia de ángulo entre ellos de 180°. El shift de 180° recibe el nombre propio de “fuera de fase”. De otra forma, si dos espines parten al inicio con un shift de 0°, y precesan cada uno a distinta frecuencia, el que precesa más rápido se adelantará más que el que precesa más lento, por lo que el shift entre ellos cambiará. Por lo tanto el phase shift depende de la frecuencia de precesión. En la Figura 16 vemos algunos ejemplos de phase shift entre dos vectores.

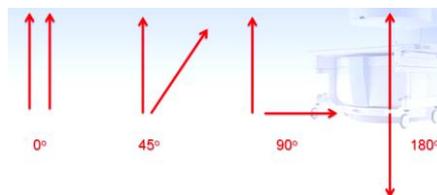


Figura 16: Ejemplos de phase shift entre dos vectores

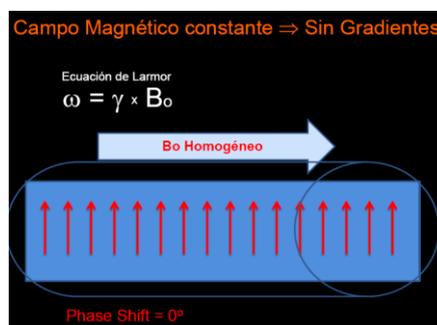


Figura 17: Campo Magnético sin gradientes y Ecuación de Larmor

En la Figura 17 se aprecia que en un campo magnético constante siempre se debe de tener en cuenta la Ecuación de Larmor. El campo como sabemos debe ser lo más homogéneo posible, y se ubica una muestra de espines en el interior del imán, es esperable que el phase shift entre cada espín sea igual a 0, porque el campo es homogéneo. el campo siempre posee inhomogeneidades, aunque sean mínimas, por lo que siempre existen desfases de los espines ubicados en el interior, ya que los espines que están situados en las zonas inhomogéneas del campo magnético precesarán a una frecuencia distinta de la gran mayoría ubicados en las zonas homogéneas, lo que genera los desfases dentro de la muestra.

En la Figura 18 se observa lo que ocurre con la fase de los espines dentro del magneto cuando se aplican gradientes

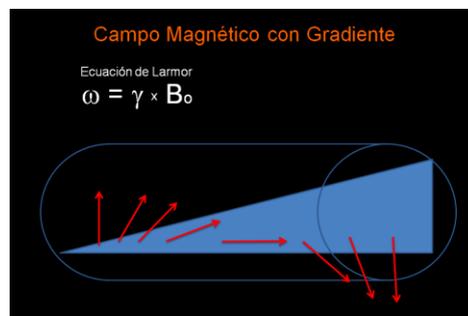


Figura 18: Campo Magnético con gradientes y Ecuación de Larmor

Al aplicar un gradiente, en este caso en el eje Z (el mismo eje del campo magnético principal) los espines comienzan a precesar a distintas frecuencias. Precesarán más lento donde el valor del campo es menor, y más rápido donde es más intenso. De este modo la muestra completa se desfasa. En este ejemplo, el phase shift de toda la muestra será de 180°, lo que dicho de otra forma corresponde a que la “evolución de la fase” de toda la muestra es de 180°, es decir, existen desfases en todos los ángulos comprendidos entre 0° y 180°.

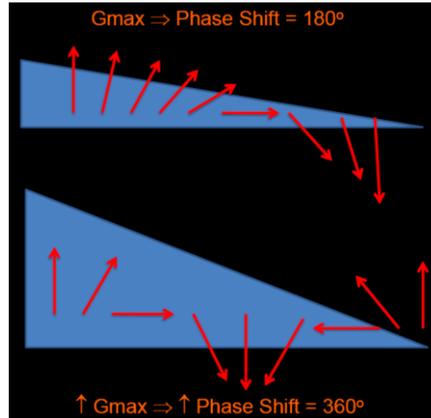


Figura 19: Phase Shift y Amplitud de la gradiente

En la Figura 19 vemos un gradiente con una amplitud determinada (por ejemplo, de 10 mT/m) que logra una evolución de la fase de un conjunto de espines de 180°. A su vez, si se aumenta la amplitud de la gradiente (pendiente) al doble (a 20 mT/m en el ejemplo), logrará una evolución de la fase del doble de rango, es decir, de 360°. Por lo tanto, la amplitud de un gradiente se relaciona con el cambio de frecuencias dentro de una muestra de espines, y por lo tanto de la cantidad de desfases presente en esa muestra. Entonces, la cantidad de desfases puede ser “manipulada” a través del manejo de la amplitud de un gradiente magnético, usando del cambio que produce en las frecuencias de precesión.

En la Figura 20 veremos qué pasa con la fase de una muestra de espines sometida a la influencia de un gradiente bipolar.

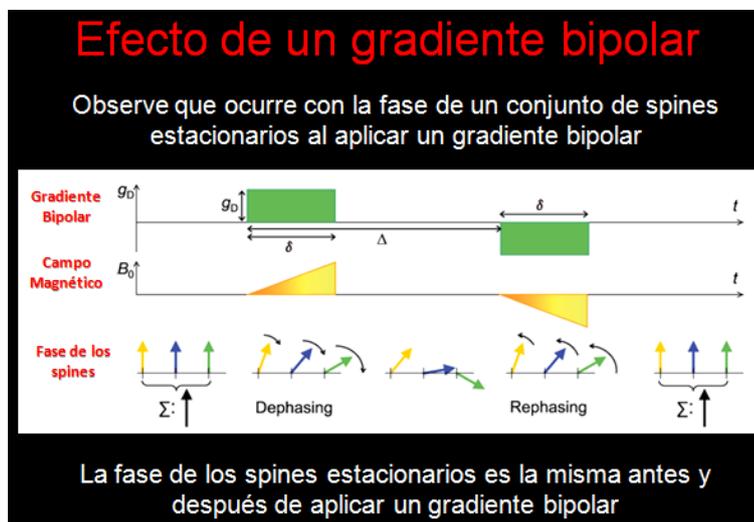


Figura 20: Evolución de la fase de los espines sometidos a un gradiente bipolar

Al principio se aplica un lóbulo +G, que implica que el campo magnético será menos intenso hacia la izquierda, y más intenso a la derecha del gradiente. Esto hará que los espines ubicados en la zona menos intensa del gradiente precesen más lento y los ubicados en la zona más intensa precesen más rápido, lo que establecerá un shift en la muestra, con mayores desfases en la fase de los espines ubicados hacia el extremo derecho del gradiente que los ubicados hacia el extremo izquierdo. Si inmediatamente terminado este lóbulo +G, se invierte la polaridad de la gradiente al lóbulo -G, lo que equivale a cambiar el sentido de la corriente en las bobinas de gradiente, veremos que los espines menos desfasados se refasarán lentamente hacia su estado previo a la aplicación del lóbulo +G, mientras que los más desfasados se refasarán rápidamente hacia su fase previa a la emergencia del lóbulo +G. De esto se obtiene que una muestra de espines sometida a un gradiente bipolar experimentará una marcada evolución de la fase en un sentido y luego en el sentido contrario, sin embargo, al final de ambos lóbulos, la fase final de los espines será exactamente igual a la fase que tenían antes de la aplicación de los gradientes. Para que esto se cumpla, ambos lóbulos deben ser exactamente iguales en amplitud y duración, solo deben tener polaridades opuestas, y los espines no deben ser móviles (“espines estacionarios”). En este caso el primer lóbulo +G se denominará “lóbulo de desfase” y el segundo lóbulo recibe el nombre de “lóbulo de refase”. Esta situación será vista en la clase de reconstrucción de imágenes. En la Figura 21 se observa la misma situación

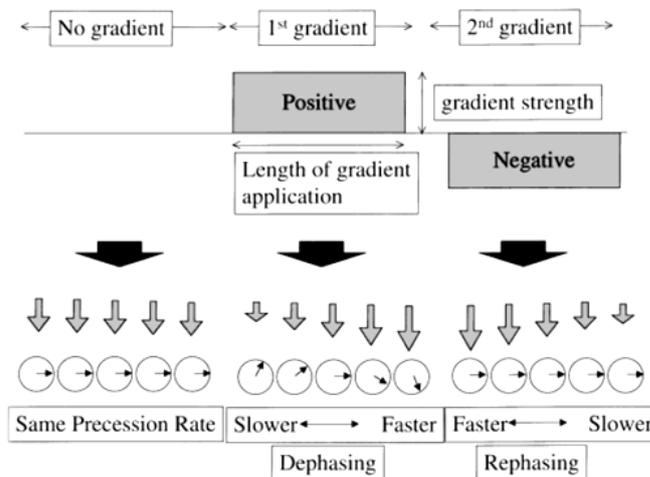


Figura 21: Evolución de la fase de los espines sometidos a un gradiente bipolar

Campo de Radiofrecuencias (Campo RF o Campo B1)

Las ondas de RF se generan cuando una corriente alterna pasa a través de un conductor, y físicamente son ondas electromagnéticas que viajan a la velocidad de la luz, propagándose incluso en el vacío, ya que no necesitan de un medio para hacerlo, a diferencia

por ejemplo de las ondas de choque y de sonido, que requieren del aire, agua o un medio sólido para poder propagarse. Las ondas electromagnéticas se componen de dos campos diferentes pero interrelacionados: un campo eléctrico (conocido como el campo “E”), y un campo magnético (conocido como el campo “H”). El campo eléctrico se genera por las diferencias de voltaje. Dado que una señal de radiofrecuencia es una alternancia, el constante cambio de tensión crea un campo eléctrico que cambia en forma oscilatoria. El campo eléctrico irradia desde una zona de mayor tensión a una zona de menor voltaje. El campo eléctrico, por ser variable, induce un campo magnético perpendicular al campo eléctrico, y con una diferencia de fase con respecto a este de 90°. A su vez el campo magnético inducido por el eléctrico, será capaz de inducir un campo eléctrico, que inducirá uno magnético, y así sucesivamente, lo que explica su auto propagación sin necesidad de un medio. Esta situación de autogeneración y autopropagación se observa en la Figura 22.

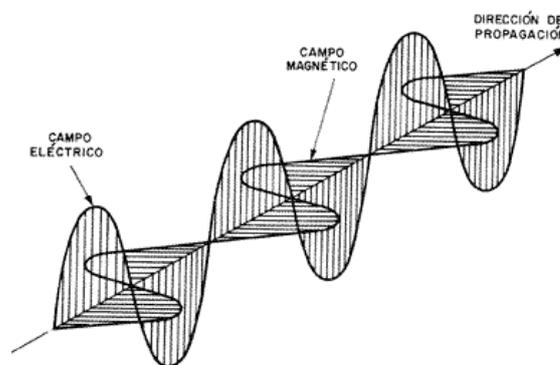


Figura 22: Onda de RF: Campos E y H

Las ondas de RF, así como cualquier onda electromagnética, pueden caracterizarse por su frecuencia y su longitud de onda. La frecuencia se mide en Hertz (Hz o ciclos/segundo) y la longitud de onda se mide en metros. Longitud de onda y Frecuencia se encuentran relacionadas por la siguiente fórmula: **Veloc. Luz (c) = Frecuencia (ω) * Longitud de onda (λ)**. De esta fórmula se deduce que al aumentar su frecuencia, su longitud de onda debe disminuir, y viceversa. La longitud de onda se relaciona con la cantidad de energía que puede depositar una onda de RF. En la Figura 23 se ve la relación entre longitud de onda y energía

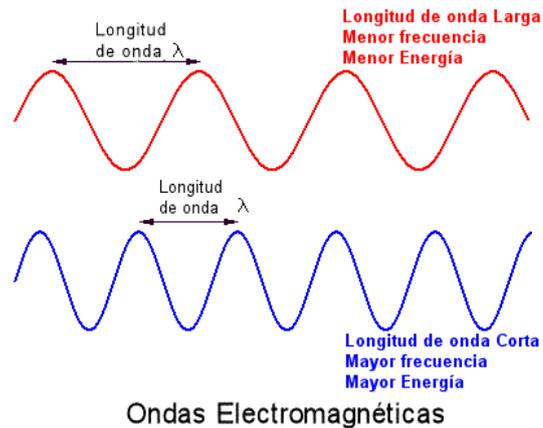


Figura 23: Onda de RF: Longitud de onda y Energía

La unidad de energía es el Watt (**W**), sin embargo, en la práctica la energía que transporta y deposita una onda de RF se mide en milivatios (**mW**). Cuando se necesita cuantificar el depósito de energía de una onda de RF sobre una persona sometida a un campo de RF, la unidad de medida es el **SAR** (Coeficiente específico de absorción de RF), en donde importa la energía (en W) que se deposita por Kg de peso corporal.

En RM, el rango de frecuencias utilizadas dependerá de la frecuencia de los espines en el campo magnético principal, la cual, depende de la Ecuación de Larmor. En el fenómeno de resonancia, el proceso de Excitación Nuclear es realizado a través de la emisión de RF, que debe tener una frecuencia igual a la frecuencia de precesión de los espines que se quiere excitar. Según la ecuación de Larmor, a 1.5T la frecuencia de precesión de los espines será igual a 63,87 MHz (42,58 MHz/T * 1.5T). A 3T la frecuencia de precesión de los espines será de 127,74 MHz (42,58 MHz/T * 3T). De esto se infiere que a 3T, como la frecuencia es mayor, la longitud de onda debe ser menor, por lo que su depósito energético será mayor que las ondas de RF que se utilizan en RM con campos de potencia de 1.5T