

Resonancia Nuclear Magnética

Nicolás Pebet

Monografía vinculada a la conferencia del Ing. Rafael Sanguinetti sobre "Radiología sin película: una puesta al día de las características de proyecto de sistemas PACS (Picture Archiving and Communication System)" del 27 de abril de 2004.

Resumen - En este artículo se proporciona información sobre una tecnología novedosa, precisa y segura en el área de la medicina, la resonancia magnética nuclear (RMN o RM). Ésta permite realizar diagnósticos por imágenes, sin efectos negativos sobre la salud del paciente. Luego de una breve introducción sobre la historia de esta técnica, se explican detalladamente los principios de funcionamiento de la misma. Esto último incluye el mecanismo de generación y de obtención de las imágenes, así como una descripción de los componentes de los equipos comunmente utilizados. Finalmente, se analizan las ventajas y desventajas de este método, y se nombran las diferentes aplicaciones del mismo.

Palabras Clave - Campo magnético, movimiento precesional, protón, radiofrecuencia.

I. INTRODUCCIÓN

La resonancia nuclear magnética es una técnica de diagnóstico surgida en 1946 (sus creadores, los físicos Edward Purcell de la Universidad de Harvard y Felix Bloch de la Universidad de Stanford obtuvieron el Premio Nobel en 1952). En un principio, el método fue aplicado a objetos sólidos en estudios de espectroscopía, en 1967, J. Jackson comenzó a aplicar los descubrimientos logrados hasta entonces, en organismos vivos, y recién en 1972, P. Laterbur en Nueva York, se dio cuenta que era posible utilizar esta técnica para producir imágenes, llegando por fin a probarlo con seres humanos.

La técnica produce imágenes de altísima calidad de los órganos y estructuras del cuerpo permitiendo estudiar múltiples lesiones y enfermedades, incluso en sus etapas iniciales.

Utiliza un campo magnético intenso, ondas de radio y una computadora para crear imágenes. Si bien los rayos X son muy buenos para visualizar los huesos, la RNM le permite al médico visualizar estructuras de tejido blando, como los ligamentos y el cartílago, y ciertos órganos como los ojos, el cerebro y el corazón.

Manuscrito recibido el 8 de junio de 2003. N. Pebet es estudiante de Ingeniería Eléctrica en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, Montevideo, Uruguay (e-mail: npebet@adinet.com.uy).

II. PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO

A. Magnetismo Nuclear

El átomo consta de un núcleo rodeado por una densidad electrónica. Estos electrones tienen dos componentes de momento angular, el orbital (movimiento alrededor del núcleo) y el intrínseco (spin). Éste último es el que se entiende como giro sobre sí mismo. El núcleo se compone de protones y neutrones, ambos denominados nucleones. Los protones tienen carga positiva, mientras que los neutrones carecen de carga. El movimiento orbital de las cargas dentro del núcleo es equivalente a una pequeña corriente eléctrica que viaja a través de un diminuto aro de alambre que genera un pequeño campo magnético que se asemeja a una barra imantada (dipolo magnético). A este efecto se adiciona el aporte del spin de las partículas constituyentes del núcleo. La dirección del campo magnético producido por los nucleones se expresa en términos de momento magnético.

Los campos magnéticos se miden en unidades conocidas como Tesla. Un Tesla equivale a 10.000 Gauss. El valor del campo magnético de la Tierra es de 0,3-0,7 Gauss.

Los materiales con propiedades magnéticas tienden a alinear sus momentos magnéticos en la dirección de las líneas de campo magnético externo aplicado.

Bloch y Purcell demostraron que al situar determinado tipo de núcleos en campos magnéticos potentes, estos núcleos podían absorber energía de radiofrecuencia (RF) y posteriormente liberarla, también en forma de energía de RF, que podía ser captada por una antena. Denominaron a este fenómeno físico resonancia nuclear magnética y a la frecuencia se le denominó frecuencia de resonancia.

La técnica es útil sólo para aquellos núcleos que no poseen momento magnético nulo, por ejemplo el del átomo de hidrógeno. Éste posee la estructura atómica más simple, estando constituido por un núcleo que contiene un protón y por una corteza en la que hay un electrón. Además, los átomos de hidrógeno son muy abundantes en el organismo humano (constituido por 70% de agua), siendo por lo tanto su núcleo una elección natural para aplicar las técnicas de resonancia magnética en el cuerpo humano. Dentro del cuerpo, los átomos de hidrógeno se orientan de forma aleatoria, de modo que no existe un campo magnético resultante. Sin embargo, si se aplica un campo magnético B_0 , la interacción de éste con los núcleos móviles con carga positiva hará que cada protón empiece a

rotar con un movimiento precesional (movimiento que describe un cono de giro).

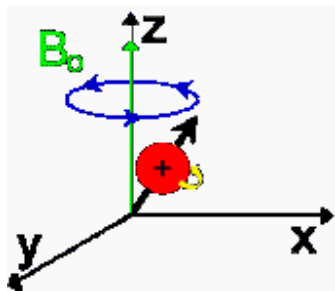


Fig. 1. Movimiento precesional del protón.
Fuente: Bioingenieros on the net

retornarán naturalmente después de cualquier perturbación (como una absorción de energía).

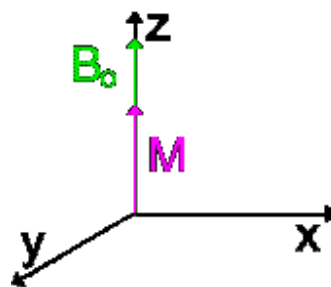


Fig. 3. Magnetización neta resultante.
Fuente: Bioingenieros on the net

Los protones se inclinarán suavemente respecto de la línea de acción de B_0 , pero el eje de rotación será paralelo a B_0 . La frecuencia de precesión está dada por la ecuación de Larmor: $\omega_0 = \gamma \cdot B_0 / (2\pi)$, donde ω_0 es la frecuencia de Larmor en MHz, B_0 es la magnitud del campo magnético que actúa sobre el protón en Tesla y γ se denomina "relación giromagnética", que para el hidrógeno toma el valor de $2.675 \times 10^8 \text{ S}^{-1}\text{T}^{-1}$. Los protones, por poseer un momento angular intrínseco, siempre precesan ante la aplicación de un campo magnético externo.

Además, al aplicar el campo, se obtienen dos estados de energía, paralelo y antiparalelo según los dipolos estén alineados con el campo o formando un ángulo de 180° . Como la orientación paralela a B_0 es la de menor energía, habrá más núcleos en esta orientación que en la antiparalela. La desigualdad de núcleos entre las posiciones paralela y antiparalela se traduce en una magnetización neta en el tejido, con un valor M . La dirección y el sentido de este vector de magnetización son los mismos que los de B_0 y serán constantes con respecto al tiempo (siempre que B_0 permanezca también constante).

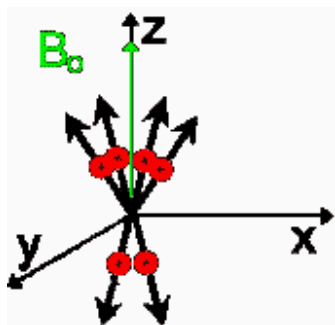


Fig. 2. Protones de hidrógeno ante la presencia de un campo magnético externo.
Fuente: Bioingenieros on the net.

Esta configuración con M alineado paralelo al campo magnético es la configuración de equilibrio de los núcleos. Es la configuración de mínima energía, a la que los núcleos

Si se aplica un impulso de RF que tenga la misma frecuencia que la frecuencia de precesión de los protones (ω_0), se provoca una energética entre los dos estados permisibles de energía del sistema. Cuando un núcleo es irradiado con energía de la frecuencia correcta (ω_0), cambiará desde la orientación de baja energía hacia la de alta energía. Al mismo tiempo, un núcleo del nivel de alta energía, cambiará su orientación para ubicarse en la dirección de baja energía. Este proceso se denomina resonancia. Es importante notar que sólo la energía suministrada a la frecuencia ω_0 estimulará las transiciones entre los estados de alta y baja energía. Esta frecuencia se conoce como "frecuencia de resonancia".

Durante este proceso de resonancia, los protones del cuerpo absorben energía y pasan a un estado de excitación. Al cesar el pulso de radiofrecuencia, los protones previamente excitados tienden a regresar a su situación original, liberando la energía previamente absorbida.

B. Generación de las imágenes

La generación de imágenes mediante resonancia magnética se basa en recoger las ondas de radiofrecuencia procedentes de la estimulación de la materia sometida a la acción de un campo electromagnético. La energía liberada por los protones (que tiene la misma frecuencia que la del pulso de RF recibido) al volver al estado de equilibrio, es captada por un receptor y analizada por un ordenador que la transforma en imágenes. Estas imágenes son luego impresas en placas.

Pero, ¿cómo se obtiene la imagen de la zona que se quiere estudiar? La clave está en ser capaz de localizar la ubicación exacta de una determinada señal de resonancia magnética nuclear en una muestra. Si se determina la ubicación de todas las señales, es posible elaborar un mapa de toda la muestra.

Entonces, al campo principal (espacialmente uniforme), se le superpone un segundo campo magnético más débil que varía de posición de forma controlada, creando lo que se conoce como gradiente de campo magnético. En un extremo de la muestra, la potencia del campo magnético graduado es mayor, y se va debilitando con una calibración precisa a medida que se acerca al otro extremo. Dado que la frecuencia de resonancia

de los núcleos en un campo magnético externo es proporcional a la intensidad del campo, las distintas partes de la muestra tienen distintas frecuencias de resonancia. Por lo tanto, una frecuencia de resonancia determinada podría asociarse a una posición concreta. Además, la fuerza de la señal de resonancia en cada frecuencia indica el tamaño relativo de los volúmenes que contienen los núcleos en distintas frecuencias y, por tanto, en la posición correspondiente. Las variaciones de las señales se utilizan entonces para representar las posiciones de las moléculas y crear una imagen. La intensidad del elemento de la imagen, o pixel, es proporcional al número de protones contenidos dentro de un volumen elemental, o voxel. Actualmente, los dispositivos de obtención de imágenes por resonancia magnética utilizan tres conjuntos de bobinas de gradientes electromagnéticos sobre el sujeto para codificar las tres coordenadas espaciales de las señales.

C. Componentes de un equipo de RM

Los componentes fundamentales son:

- **Imán creador del campo electromagnético.** Este es el componente básico de un sistema de imágenes por resonancia magnética. La consideración primaria en lo que respecta a la calidad del imán es la homogeneidad o uniformidad de su campo magnético.
- **Sistema de radiofrecuencia.** El sistema transmisor de RF es responsable de la generación y transmisión, por medio de una bobina transmisora (antena), de la energía de radiofrecuencia utilizada para excitar los protones.
- **Sistema de adquisición de datos.** Es el encargado de medir las señales provenientes de los protones y digitalizarlas para su procesamiento posterior. Todos los sistemas de resonancia magnética utilizan una bobina receptora para detectar los voltajes inducidos por los protones luego del pulso de RF. Para estudios de grandes volúmenes de tejido (como en imágenes del cuerpo o la cabeza), la bobina transmisora normalmente sirve también como receptora.
- **Ordenador para analizar las ondas y representar la imagen.** Además permite controlar todas las funciones del scanner. Se pueden seleccionar o modificar parámetros, visualizar o guardar las imágenes de los pacientes en distintos medios, y realizar procesos posteriores sobre las imágenes (como zoom en regiones de interés).
- **Equipo de impresión para imprimir la placa.**

Además de afectar la carga positiva de los protones, el electromagnetismo también genera una gran cantidad de calor, por lo que estos equipos cuentan con potentes sistemas

refrigerantes. Esta refrigeración se logra introduciendo, en tuberías especiales, sustancias criogénicas como el helio o el nitrógeno líquido.

El equipo de resonancia magnética se encuentra dentro de un cuarto forrado de cobre en su interior para evitar interferencias de ondas que pudieran llegar del exterior. A esto se le llama "Jaula de Faraday".

D. Proceso de obtención de las imágenes

El paciente se acuesta sobre una camilla acolchonada que se desplaza dentro de un imán en forma de túnel, abierto en ambos extremos. Durante este tiempo, se debe permanecer sumamente quieto para que las imágenes no salgan borrosas. Durante la toma de las imágenes, el paciente escucha un fuerte golpeteo y un zumbido. Para no molestarlo o perturbarlo, se le colocan taponos en sus oídos o se le hace escuchar música a través de auriculares.

Cuando la prueba finaliza, el paciente puede continuar con sus actividades normales.

III. APLICACIONES

Entre sus aplicaciones tenemos:

- **Neurológicas.** Proporciona imágenes de mayor resolución que la tomografía computada (TC) para las estructuras nerviosas. Permite detectar edemas cerebrales, tumores, trombosis venosas, placas de desmielinización (esclerosis múltiple) e infartos cerebrales. Casi todas las anomalías cerebrales presentan alteraciones en el contenido de agua, que se consigue registrar con la RM. Una diferencia en el contenido acuoso de menos del uno por ciento es suficiente para detectar los cambios patológicos.
- **Cardiovasculares.** A veces, en colaboración con la radiografía, la TC o el ecocardiograma. Se puede estudiar el corazón así como las arterias y las venas.
- **Otorrinolaringología.** Alteraciones de oídos, senos paranasales, boca y garganta.
- **Oftalmología.**
- **Tumorales.** Permite detectar alteraciones tumorales de cualquier tipo y en cualquier órgano.
- **Aparato locomotor.** Permite localizar lesiones óseas o musculares de todo tipo y en cualquier región del organismo. Es el único procedimiento que permite ver los ligamentos.

En general, puede ser utilizada para visualizar estructuras como corazón, pulmones, glándulas mamarias, hígado, vías biliares, bazo, páncreas, riñones, útero, ovarios, próstata, etc.

IV. VENTAJAS Y DESVENTAJAS

Entre las ventajas que presenta, encontramos que:

- No utiliza radiación ionizante, reduciendo riesgos de mutaciones celulares o cáncer.
- Permite cortes muy finos (1/2 mm o 1mm) e imágenes muy detalladas permitiendo observar detalles anatómicos no apreciables con otro tipo de estudio.
- Permite la adquisición de imágenes multiplanares (axial, sagital, coronal), simplificando por ejemplo el estudio tridimensional del encéfalo, sin necesidad de cambiar de postura al paciente.
- Detecta muy rápidamente los cambios en el contenido tisular de agua.
- No causa dolor.
- El paciente tiene en todo momento comunicación con el médico.

La calidad de las imágenes obtenidas se puede mejorar utilizando medios de contraste paramagnéticos por vía intravenosa (se suministran previo al estudio, inyecciones de un fluido llamado gadolinio). Esto hace que las áreas anormales se iluminen en la RNM y sean más fáciles de distinguir luego.

Por otro lado, la utilidad de la RNM se ve limitada por:

- La larga duración del examen (la mayor parte de las RNM llevan entre 30 y 60 minutos).
- El costo económico (superior a los de otros estudios similares).
- Los problemas planteados en lo que respecta a dispositivos de soporte vital (apoyo ventilatorio mecánico, marcapasos), materiales ferromagnéticos presentes en el paciente (proyectiles de arma de fuego, material de osteosíntesis) y sistemas de tracción esquelética o de inmovilización, que pueden interferir en la calidad de la imagen o incluso conllevar riesgo para la vida del paciente por movilización de dichos componentes.
- Sensación de claustrofobia cuando se está adentro del túnel. El mayor porcentaje de imposibilidad para realizar la exploración se debe a este tipo de problemas, llevando a la necesidad de sedar al paciente en algunas ocasiones.

V. EQUIPOS COMERCIALES Y COSTOS

Existen actualmente varias empresas que fabrican equipos de resonancia magnética. Algunas de las más reconocidas son: Philips, General Electric, y Siemens.

En cuanto a los costos, estos son muy variables ya que siempre existe una negociación de por medio y muchos accesorios sobre los que decidir. De cualquier manera, se podría decir que lo que hace la diferencia mayor es la magnitud del campo magnético que son capaces de emitir. Esta característica es muy importante ya que afecta directamente la

calidad de las imágenes y la duración del estudio. Cuanto mayor es el campo magnético, mayor calidad de imágenes se obtiene y menor el tiempo que se requiere para adquirirlas.

Normalmente, se puede tomar como regla aproximada US\$ 1.000.000 por Tesla.



Fig. 4. Resonador magnético General Electric.

En el presente existen también equipos de resonancia magnética abierta, lo que presenta una opción para pacientes claustrofóbicos. Se trata de equipos abiertos en forma de C cuya característica más novedosa es la posibilidad de realizar procedimientos intervencionistas, como cirugía de la epilepsia, del Parkinson, biopsias intracraneales, etc. Con los equipos de diseño cilíndrico es necesario sacar al paciente del aparato, realizar la intervención y volver a introducirlo. Con algunos equipos de resonancia magnética abierta, los especialistas pueden actuar sin necesidad de movilizar al paciente y utilizar material quirúrgico convencional. La resonancia magnética abierta genera un campo magnético de 0,2T de potencia mientras que el otro equipo, de diseño convencional, generalmente tiene una potencia de 1 a 1,5 Tesla (aunque en el mercado existen desde 0,2T hasta 4T los más modernos). Sin embargo, los equipos abiertos de última generación disponen de un sistema informático optimizado que permite realizar exploraciones de alta calidad. Al disponer de un campo magnético menor que el equipo cilíndrico, la resonancia abierta reduce las limitaciones para realizar estudios en pacientes portadores de estructuras metálicas no ferromagnéticas, prótesis, etc.

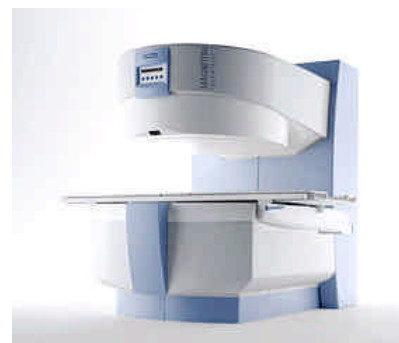


Fig. 5. Resonador magnético abierto Siemens.

Uruguay cuenta con equipos de resonancia magnética

desde el año 1993 y actualmente existen en el país cuatro resonadores, de 0,2T, de 0,5T, de 1T y de 2T.

VI. CONCLUSIÓN

Se puede decir que el estudio de resonancia magnética es una herramienta muy potente de la medicina. Es un método moderno, que presenta muchas ventajas y pocas desventajas y es cada vez más utilizado en muchas ramas de la medicina. Quizás la traba más grande que se encuentra en Uruguay para su uso es el costo económico elevado que representa el adquirir el equipo y hacer el estudio.

Se puede prever que la resonancia magnética sustituirá poco a poco a otras técnicas de imagenología. La principal razón de esto es que cada vez más están siendo dejados de lado métodos que utilizan radiaciones ionizantes, como por ejemplo la TC. Además, con vistas a futuro, se piensa que con esta tecnología, sería posible observar directamente la acción química de los medicamentos sobre el cuerpo

AGRADECIMIENTO

Se agradece la colaboración del Dr. Andrés de Tenyi (Profesor de Radiología, Facultad de Medicina, Montevideo, Uruguay y Director del Departamento de Imagenología del Hospital Británico, Montevideo, Uruguay) por haber permitido y guiado la visita al resonador magnético del Hospital Británico y al Ing. Químico Ricardo Faccio (Asistente de la Cátedra de Física de la Facultad de Química, Montevideo, Uruguay) por sus aportes.

REFERENCIAS

- [1] "Resonancia Magnética Abierta". Revista on-line *Línea de Consulta*, ACUNSA, España, 2002. Visitada el 20 de mayo de 2004. Disponible en: <http://www.acunsa.es/textos/revista.html>
- [2] Pierre Rouzier, MD, "Magnetic Resonance Imaging (MRI)", Documento on-line publicado por McKesson Health Solutions LLC, 2003. Visitada el 20 de mayo de 2004. Disponible en: http://www.med.umich.edu/1libr/aha/aha_mriimage_sma.htm
- [3] "La Resonancia Magnética Nuclear". Redactado y publicado por Aurasalud.com, España, 2001. Visitada el 22 de mayo de 2004. Disponible en: <http://www.aurasalud.com/qqs/diagnosis/rmn.htm>
- [4] "Diagnóstico Por Imagen, Resonancia Magnética Nuclear", Documento on-line del Instituto Químico Biológico (IQB), Organización Médica Colegial de España (OMC). Visitada el 22 de mayo de 2004. Disponible en: <http://www.iqb.es/diagnostico/rmn/toc01.htm>.
- [5] "El Desarrollo De La Resonancia Nuclear Magnética". Publicado por la National Academy of Sciences, Washington, DC, 2003. Visitada el 22 de mayo de 2004. Disponible en: http://www7.nationalacademies.org/spanishbeyonddiscovery/bio_007590-05.html#TopOfPage
- [6] "Resonancia Magnética". Publicado en Bioingeniería On The Net, Argentina, 2001. Visitada el 15 de junio de 2004. Disponible en: http://www.bioingenieros.com/biomaquinas/resonancia_magnetica/index.htm

- [7] Página web de General Electric Healthcare – Magnetic Resonance Imaging. Visitada el 20 de mayo de 2004. Disponible en: <http://www.gehealthcare.com/rad/mri/products/prod.html>
- [8] Página web de Philips. Visitada el 20 de mayo de 2004. Disponible en: <http://www.medical.philips.com/main/products/mri/products>
- [9] Página web de Siemens. Visitada el 20 de mayo de 2004. Disponible en: <http://www.siemens.com>