

RESONANCIA MAGNÉTICA PARA TÉCNICOS

Conceptos básicos

Eloy Calvo Pérez

Resonancia Magnética para Técnicos

Conceptos básicos

© Eloy Calvo Pérez

e-mail: eloycalvop@gmail.com

<http://tecnicaradiologica-ecp.jimdo.com>

Reservados todos los derechos a favor del autor.

© Producción: LiberLIBRO.com

<http://www.liberlibro.com>

© Fotografía de portada: Eloy Calvo Pérez.

I.S.B.N. y Dep. Legal: en contraportada.

ÍNDICE

CAUSAS Y RAZONES

PRINCIPIOS FÍSICOS Y SECUENCIAS CLÁSICAS

CAPÍTULO 1.- ¿A QUE LLAMAMOS RESONANCIA MAGNÉTICA?

CAPÍTULO 2.- SOBRE EL CAMPO MAGNÉTICO Y LOS GRADIENTES

CAPÍTULO 3.- ¿CÓMO SE COMPORTAN LOS NÚCLEOS DE H BAJO UN CAMPO MAGNÉTICO?

CAPÍTULO 4.- ABSORCIÓN DE ENERGÍA Ó EXCITACIÓN NUCLEAR

CAPÍTULO 5.- LIBERACIÓN ENERGÉTICA Ó RELAJACIÓN NUCLEAR

CAPÍTULO 6.- DIFERENTES POTENCIACIONES DE LA IMAGEN EN RESONANCIA MAGNÉTICA: DP, T1, T2 y T2*

CAPÍTULO 7.- SATURACIÓN RECUPERACIÓN, INVERSIÓN RECUPERACIÓN, SPIN-ECO Y ECO DE GRADIENTE: LAS SECUENCIAS DE PULSOS CLÁSICAS

CAPÍTULO 8.- GRADIENTES MAGNÉTICOS I: SELECCIÓN DEL PLANO Y GROSOR DE CORTE

RECONSTRUCCIÓN DE LA IMAGEN

CAPÍTULO 9.- GRADIENTES MAGNÉTICOS II: CODIFICACIÓN DE LA SEÑAL RECOGIDA EN LA ANTENA Y TRANSFORMACIÓN DE FOURIER

CAPÍTULO 10.- DIGITALIZACIÓN DE LA SEÑAL: CONVERSIÓN DE ANALÓGICO A DIGITAL

CAPÍTULO 11.- EL ESPACIO-K: LLENADO Y PROPIEDADES

LA SANGRE Y EL CORAZÓN EN IRM

CAPÍTULO 12.- EL FLUJO SANGUÍNEO EN RMN

CAPÍTULO 13.- ACERCA DE LA IRM CARDIACA

CONTRASTES

CAPÍTULO 14.- AGENTES DE CONTRASTE EN RMN

SECUENCIAS RÁPIDAS Y AVANCES EN IRM

CAPÍTULO 15.- APROXIMACIÓN A LAS SECUENCIAS RÁPIDAS

CAPÍTULO 16.- ALGUNAS TÉCNICAS AVANZADAS

CAPÍTULO 17.- ERM: ESPECTROSCOPIA POR RMN

CAPÍTULO 18.- TÉCNICAS DE SATURACIÓN GRASA

CALIDAD DE LA IMAGEN EN IRM

CAPÍTULO 19.- INDICADORES DE CALIDAD EN IRM

CAPÍTULO 20.- ARTEFACTOS EN LA IRM

EL EQUIPO DE RESONANCIA MAGNÉTICA

CAPÍTULO 21.- COMPONENTES DE UN EQUIPO DE RMN

EL PACIENTE DE RESONANCIA MAGNÉTICA

CAPÍTULO 22.- CRONOLOGÍA DE UNA EXPLORACIÓN RMN

CAPÍTULO 23.- ATENCIÓN AL PACIENTE EN RMN: PREPARACIÓN, CONSENTIMIENTO INFORMADO Y ENCUESTA DE COMPATIBILIDAD MAGNÉTICA

BIOSEGURIDAD EN RMN

CAPÍTULO 24.- POSIBLES RIESGOS BIOLÓGICOS DE LA RESONANCIA MAGNÉTICA

CAPÍTULO 25.- PROTOCOLOS DE SEGURIDAD EN RMN: PRECAUCIONES, CONTRAINDICACIONES E INCOMPATIBILIDADES

SU USO EN LA PRÁCTICA MÉDICA

CAPÍTULO 26.- APORTACIONES Y DESVENTAJAS

CAPÍTULO 27.- APLICACIONES EN LA PRÁCTICA MÉDICA

CAPÍTULO 28.- SEMIOLOGÍA BÁSICA

ANEXO: BIOGRAFÍAS

AGRADECIMIENTOS Y REFERENCIA

EL EQUIPO DE RESONANCIA MAGNÉTICA

CAPÍTULO 21.- COMPONENTES DE UN EQUIPO DE RMN

Actualmente existen en el mercado una gran variedad de equipos de RMN y, aunque algunas de sus características dependerán del fabricante, la mayor parte de los componentes de software y hardware son comunes a todos ellos.

Para poder obtener una imagen en RMN la instrumentación que se requiere es realmente compleja. Se trata de un conjunto de elementos que, en esencia, ya conocemos y que vamos a desglosar en las páginas que siguen.

Los componentes **fundamentales** de todo equipo de RMN son los siguientes:

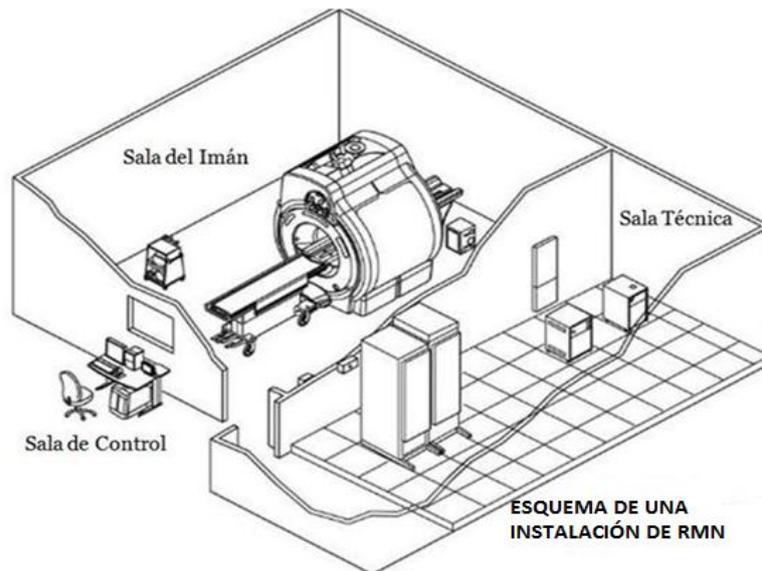
1. El **imán**: Es el responsable de la creación del campo magnético externo.
2. Los **gradientes magnéticos**: Necesarios, entre otras funciones, para seleccionar el plano de estudio y codificar la señal recogida en la antena receptora.
3. El **sistema de radiofrecuencia**: Comprende el conjunto de elementos indispensables para transmitir y recibir los pulsos de RF.
4. El **software para programar** las secuencias.
5. El **software para procesar la señal** y reconstruir la imagen.
6. El **monitor** para observar las imágenes.
7. El **software para realizar el posprocesado** de la imagen.

Todo este conjunto de elementos técnicos, imprescindibles, se van a distribuir en tres zonas:

- a) **Sala del imán**: Es la sala en la que se realiza la exploración a los pacientes. En ella se encuentran situados el imán principal, el sistema de gradientes magnéticos y el sistema de RF.
- b) **Sala de control**: Es la zona donde se ubica la consola de trabajo desde la que se programan las exploraciones. Se trata, por tanto, de la sala del operador. Desde ella se controla visualmente al paciente, se puede establecer contacto oral con él y se trabaja con la imagen.
- c) **Sala técnica**: El nombre hace alusión a que en ella realizan su trabajo, la mayor parte de las veces, los técnicos de la empresa encargada del mantenimiento del equipo. Alberga los armarios desde los que se controlan el imán principal, los gradientes magnéticos y el sistema de radiofrecuencia.

SALA DE EXPLORACIÓN	4,50 X 7,00 m
SALA TÉCNICA	2,50 x 4,50 m
SALA DE CONTROL	4,50 X 3,50 m

Ejemplo de medidas recomendadas en una instalación de RMN



SALA DEL IMÁN

Es el lugar donde se va a realizar la exploración. Debe contar con una superficie aproximada de 35 metros cuadrados para dar cabida al imán y demás elementos y permitir desenvolverse con cierta soltura. El acceso a la misma se realiza a través de una puerta blindada que evita interferencias del exterior.

La puerta de acceso a la sala del imán coincide con la línea de fuerza de los 5 gauss y representa la barrera de seguridad para los marcapasos cardiacos. Cuenta con un detector que nos avisa si no está bien cerrada.

La sala se encuentra aislada del exterior por un recubrimiento de cobre cuya misión es evitar interferencias de RF externas y que recibe el nombre de **Jaula de Faraday**.



Diferentes fases de la construcción de una Jaula de Faraday

La sala se comunica con la sala de control a través de una ventana que cuenta con un grueso vidrio y un fino apantallamiento tipo celda. A través de ella se establece contacto visual con el paciente a efectos de vigilancia y control.

Entre sus características arquitectónicas y de diseño hemos de destacar que en su construcción no pueden utilizarse materiales ferromagnéticos y que ha de contar con interruptores de parada de emergencia del imán, los cuales sólo deberán utilizarse en casos de extrema urgencia (**QUENCH**).

Todas las salas que contienen imanes superconductivos cuentan con un sistema de alarma que se dispararía en el caso de que se produjera un escape de He gas.

Debido a la gran cantidad de calor que se genera en el interior de la sala, y teniendo en cuenta la alta sensibilidad de todos los elementos del equipo, se precisa un sistema de refrigeración que mantenga la sala en torno a los 21º C.

Debe contar con inyector compatible, para los estudios que requieran la utilización de contraste introducido en forma de bolo, y en la medida de lo posible con elementos de sujeción y comodidad para el paciente.



Equipo de RMN Signa 1,5 Teslas de General Electric

Vamos a comentar, a continuación, algunas características de los elementos más importantes de la sala del imán.

IMÁN

Como ya sabemos, **el imán** es el elemento más importante de un equipo de RMN. Es el responsable de la creación del campo magnético principal y su potencia se mide en Teslas (1 Tesla = 10.000 Gauss).

Si nos fijamos en su diseño podemos encontrar imanes **cerrados** e imanes **abiertos**. Éstos últimos representan una alternativa exploratoria para pacientes con ansiedad, claustrofobia o gran obesidad.

Ateniéndonos a la intensidad del campo magnético los imanes pueden ser de **bajo campo** (< 0,5 T), de **campo medio** (0,5-1,0 T) y de **alto campo** (1,0-3,0 T).

En cuanto a su composición los imanes pueden dividirse en **permanentes** y **electroimanes**. Como ya sabemos, los electroimanes generan el campo magnético a partir de una corriente eléctrica y, a su vez, podemos diferenciarlos como **resistivos** y **superconductivos**, según que la refrigeración se lleve a cabo con agua o con helio líquido, respectivamente. Los permanentes no requieren ningún tipo de refrigeración.



Si agrupamos diseño, intensidad y composición podemos reducir todos los imanes a dos tipos, que son los que podemos encontrar en el mercado:

1. Abiertos, de bajo campo, resistivos o permanentes.
2. Cerrados, de alto campo, superconductivos.

El imán no sólo es el elemento más importante del equipo de RMN; es también el más voluminoso y el más pesado. Un imán superconductor pesa en torno a los 4.000 kilos y es un elemento condicionante a la hora de su ubicación, tanto por los problemas de transporte e instalación como por la fiabilidad que tiene que ofrecer el sustrato sobre el que se asiente.

Una de las características más importantes en lo que respecta a la calidad del imán es la homogeneidad o uniformidad de su campo magnético. Imperfecciones en la fabricación, columnas de acero cercanas y el propio paciente, por poner ejemplos fáciles de entender, pueden producir distorsiones del campo magnético que es necesario corregir antes de realizar el estudio.

En la actualidad, todos los equipos permiten la realización de **shimming** activos para corregir estas distorsiones (inhomogeneidades).

Ya es sabido que los imanes superconductivos consiguen campos magnéticos más elevados y mucho más uniformes que los imanes resistivos. Ello es debido, precisamente, a la propiedad que presentan estos conductores de no ofrecer resistencia al paso de la corriente eléctrica. Pero para ello requieren ser refrigerados por criógenos.

Los **criógenos** son sustancias que realizan su función a temperaturas próximas al cero absoluto (-273°C). El más utilizado en la actualidad es el **Helio líquido**.

Si se produjera una pérdida de superconductividad el helio líquido pasaría a **helio gas** y aumentaría de forma considerable su volumen (del orden de las 760 veces). Si esto ocurriera habría que evacuar el helio de forma rápida.

Este fenómeno, del que nos ocuparemos más adelante, recibe el nombre de **QUENCH**.

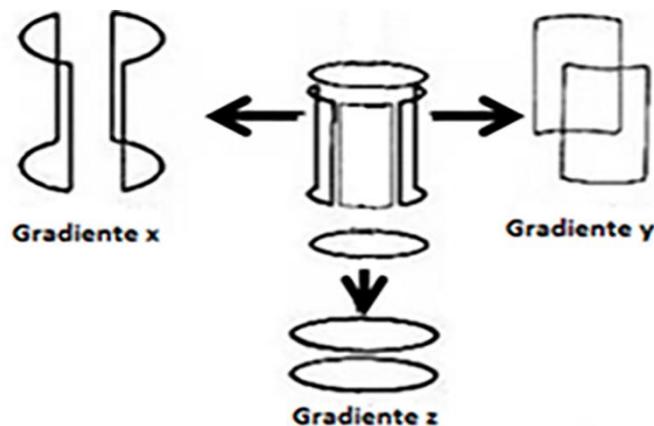
Pues bien, todos los equipos de RMN dotados de un imán superconductor tienen que tener previsto la posibilidad de un *quench* y permitir la salida del helio gas hacia arriba al exterior.

BOBINAS DE GRADIENTE

Los gradientes magnéticos son electroimanes resistivos que se superponen al imán principal (están incluidos en el túnel del imán) creando un campo magnético variable que se suma o resta al campo magnético principal.

Su potencia va a oscilar entre los 200 y 400 Gauss y dependerá de la corriente que circule por cada una de las bobinas.

Se utilizan para producir variaciones lineales de campo magnético en cualquiera de los 3 ejes del espacio. Actúan en la selección del corte y en la codificación espacial de la señal, además de utilizarse para refasar los núcleos de H en las secuencias GRE.



Bobinas de Gradiente para cada una de las 3 direcciones del espacio

Por sustituir al pulso de 180° , en las secuencias GRE, colaboran en minimizar el depósito calórico. Pero, por la misma razón, son los responsables de que las secuencias GRE sean más ruidosas que las SE.

Cuanto más eficaces sean o, lo que es lo mismo, cuanto menor tiempo empleen en instaurarse y desactivarse menores TR y TE podrán utilizarse, lo que disminuirá el tiempo de adquisición de las secuencias.

SISTEMA DE RADIOFRECUENCIA

El sistema de radiofrecuencia va a ser el responsable de la generación, transmisión y recepción de los pulsos de RF.

Aunque suelen recibir distintos nombres en función de los autores y de las empresas tecnológicas, reuniremos sus elementos más importantes en 3 grandes grupos:

1. **Unidad de señal de RF:** Se va a encargar de generar los pulsos de radiofrecuencia y de procesar el eco recogido en la antena receptora.
2. **Amplificador de potencia:** Amplifica la energía de los pulsos que van a ser enviados y la señal de los ecos recogidos en la antena receptora.
3. **Sistema de antenas:** Las antenas van a ser las encargadas de transmitir los pulsos de energía y de recoger los ecos.

ANTENAS

De forma general podemos decir que los equipos de RMN cuentan con tres tipos diferentes de antenas:

1. **Antenas de transmisión-recepción:** Son las antenas que pueden realizar la doble función de emitir los pulsos de RF, que excitarán a los núcleos de H, y de recoger las señales emitidas por éstos.
La antena o bobina de cuerpo, que se encuentra en el interior del imán, y la antena de cabeza pertenecen a este tipo de antenas.
2. **Antenas de transmisión:** Son las antenas que sólo se utilizan para enviar pulsos excitadores.
3. **Antenas de recepción:** Su función exclusiva es recoger las señales emitidas durante la relajación de los núcleos de H.
La forma y el tamaño de las antenas receptoras varían dependiendo del fabricante pero su campo de recepción efectivo debe ser perpendicular al campo magnético principal (B_0).
Son antenas receptoras las **antenas de superficie** y las **antenas internas**.

Las antenas van a recoger una señal que, como ya hemos comentado, es muy débil. Ello obliga a seleccionar, en cada caso, aquella que resulte más adecuada. En la práctica clínica, lo

que va a determinar la elección de la antena será la zona anatómica que se desee visualizar y la morfología del paciente.

Algunas antenas son específicas para determinadas estructuras anatómicas (por ejemplo, cabeza, rodilla, hombro). Pero, en otros casos habremos de “agudizar el ingenio” y elegir la antena que mejor se adapte a la anatomía del paciente (codo, muñeca, dedo...).

La antena ha de ser colocada de forma que la zona a explorar quede englobada por ella pero, cumplida esta misión, es importante también que no sea más grande de lo necesario para garantizar una buena resolución espacial de la imagen (téngase en cuenta que cuanto mayor sea el campo de visión, FOV, más grande será el pixel y, por tanto, menor será la resolución espacial de la imagen).



En lo relativo a la forma, las antenas suelen clasificarse en antenas de volumen y antenas de superficie.

Las **antenas de volumen**, como su nombre indica, van a envolver la zona a estudiar. Son antenas rígidas, que no resultan fáciles de colocar a pacientes muy gruesos, pero proporcionan una intensidad homogénea en todo el corte. Presentan un gran poder de penetración.

Las **antenas de superficie**, como su nombre indica, se van a colocar sobre la superficie de la zona a explorar. Su intensidad no es homogénea, disminuyendo a medida que aumenta la distancia a la antena y su poder de penetración es más pequeño resultando proporcional al diámetro de la antena, en una proporción de 2 a 3 (aproximadamente el 70%). Se utilizan para el estudio de pequeños volúmenes de tejido.

Las antenas de volumen, en función de la forma en que reciben la señal, se pueden clasificar en:

- a) **Antenas lineales:** De diseño muy simple, detectan la señal en una sola dirección y no son capaces de extraer toda la información de la señal recibida.
- b) **Antenas de cuadratura:** De diseño algo más complejo, detectan la señal en dos direcciones ortogonales y aprovechan toda la información contenida en la señal que recogen.

Mencionaremos, por último, las antenas **Phased-Array**. Se trata de varias antenas de superficie (receptoras), colocadas en un mismo soporte, que van a sumar sus señales para reconstruir la imagen. Cada uno de los elementos de la antena puede ser seleccionado en función de las necesidades del estudio. Su gran ventaja es que permite trabajar con FOV mayores a la par que lo hace sin perder la resolución espacial que tendría cada antena trabajando por separado.

Cuando se trabaja con antenas *phased-array* hay que mostrar especial cuidado en seleccionar exclusivamente las partes de la antena que sean necesarias para cubrir el campo que se desea estudiar. En caso contrario se originará el **artefacto por mal uso**, que estudiamos en el capítulo anterior.

SALA DE CONTROL

Se encuentra situada al lado de la sala del imán y está comunicada con ésta por medio de una ventana de vidrio apantallado. Requiere una superficie aproximada de 10 metros cuadrados para albergar a todos sus elementos y al operador del equipo.

Recibe este nombre la zona de trabajo del técnico de RMN y alberga una serie de componentes, entre los que podemos destacar:

1. **La consola de trabajo:** Desde ella se realiza la programación de las exploraciones; en ella se recogen los datos, y a través de ella se puede mantener contacto oral con el paciente.
2. **El ordenador de control del sistema:** Aunque muy condicionado por el continuo desarrollo informático, podemos decir que comprende como mínimo dos equipos. Uno de ellos, el ordenador principal, permite ejecutar el software de interface con el usuario y por tanto ejecutar todas las funciones del equipo; es decir, seleccionar y modificar parámetros, visualizar imágenes, archivarlas en distintos soportes, enviarlas a un PACS, a una impresora láser o a diferentes estaciones de trabajo remotas y realizar trabajos de posprocesado con la imagen. El segundo es un potente ordenador, con varios microprocesadores, que se va a encargar de realizar todos los cálculos matemáticos de la transformación de Fourier, a partir de los datos recogidos en la antena receptora.
3. **Los dispositivos de archivo:** Las imágenes obtenidas se van a ir almacenando temporalmente en el disco duro del equipo, pero para su almacenamiento permanente se utilizan diferentes soportes de imagen (CD, DVD, MOD).

A medida que se han ido implantando los Sistemas de Archivo y Comunicación de Imágenes (**PACS**), estos dispositivos han ido perdiendo utilidad con excepción de los casos en los que el paciente requiere aportar sus estudios de imagen para ser tratado en otro centro médico o precisa una segunda opinión. Cuando esto ocurre el soporte más utilizado es el CD o el DVD.

4. **La consola del inyector:** En ella se van a programar los volúmenes de contraste y las velocidades de perfusión en todos aquellos estudios en los que la inyección de contraste requiera la utilización de un inyector.
5. **La impresora láser:** Aunque cada vez más en desuso desde la universalización de los PACS, se utiliza en aquellos casos en los que las imágenes quieran ser registradas en soporte de acetato.
6. **Las estaciones de trabajo:** Aunque lo normal es que se encuentren en una sala distinta (sala de lectura o sala de informes) y próxima a la sala de control, hay centros en los que en ella podemos encontrar estaciones de trabajo para consultar estudios o realizar trabajos de posprocesado.



Equipo Signa 1,5 Teslas de General Electric

Podemos por tanto decir, a modo de resumen, que desde la consola de trabajo se controla todo el proceso de un estudio de RMN:

- a) Se registran los datos y el **peso** del paciente.
- b) Se monitorizan sus constantes.
- c) Se mantiene contacto oral con él.
- d) Se programan y envían las secuencias del estudio.
- e) Se visualizan las imágenes obtenidas.
- f) Se graban los estudios/se fotografían/se envían a un PACS u otros destinos.

SALA TÉCNICA

La sala técnica suele estar situada al lado de la sala del imán. Recibe este nombre porque es el lugar en el que se encuentran los **armarios técnicos**.

Requiere una superficie aproximada entre 10 y 12 metros cuadrados.

Es una zona de trabajo reservada, casi en exclusiva, a los Técnicos de Mantenimiento de los equipos. No obstante hay determinados controles que, aunque de manera esporádica, pueden ser realizados en ella por el operador del equipo de RMN (verificación de los valores de volumen y de presión del helio o comprobación de las temperaturas de entrada y salida del agua del circuito de refrigeración del compresor de helio, por ejemplo).



Presión y nivel del Helio en un equipo Signa de General Electric (GE)

¿Por qué es importante comprobar periódicamente los valores de presión y volumen de helio? A temperatura normal el helio se encuentra en estado gaseoso; pero en los equipos de RMN se mantiene en estado líquido gracias a un compresor que está funcionando permanentemente. Si el compresor se parara el helio comenzaría a evaporarse e iría saliendo al exterior a través de la chimenea de evacuación, situada en la parte superior del equipo de RMN. Sabríamos que el compresor ha dejado de funcionar porque dejaríamos de escuchar el ruido rítmico que se produce durante su funcionamiento.

La presión idónea del helio se mantiene estable gracias a que el compresor, en condiciones normales, no deja de funcionar en ningún momento. Si, debido a una avería, el compresor dejara de trabajar el helio se iría evaporando y sería evacuado al exterior. Si la avería fuera permanente habría que avisar al servicio técnico.

Si la presión llegara a descender por debajo del valor indicado por el fabricante habría que suspender las exploraciones. Por ejemplo, en el modelo Signa 1,5 Teslas de G.E. los valores

normales son entre 2 y 4 unidades PSI (una Atmósfera de presión equivale a un Bar y un Bar a 14,50 PSI).

El volumen de helio se expresa en tantos por ciento. Con el tiempo es normal que el valor del mismo vaya disminuyendo; ahora bien, si bajara por debajo del 50 % no se debería trabajar ya que disminuiría la superconductividad de la bobina del imán y podría producirse una explosión del tanque que contiene el helio. Si se llegara a producir esta situación, el helio se liberaría de manera brusca y se distribuiría con rapidez por la sala de exploración. Sabemos que el helio no es inflamable pero se produciría un desplazamiento del oxígeno y el paciente podría fallecer por anoxia si no fuera sacado rápidamente de la sala del imán.

Los componentes más importantes que alberga la sala técnica son los siguientes:

1. **Armario de control:** Controla el imán principal y desde él se accede también al control del *shim*.
2. **Armario de los gradientes:** Contiene los elementos electrónicos para producir los gradientes magnéticos.
3. **Armario de radiofrecuencia:** Controla todos los elementos que participan en el sistema de RF.
4. **Armario del compresor:** Controla el correcto funcionamiento del compresor de Helio.
5. **Sistema de refrigeración del compresor de Helio:** Es un sistema de entrada y salida de agua, de tal forma que el agua entra y enfría el sistema y, a continuación, sale del mismo tras haber aumentado unos grados su temperatura.

La sala técnica, al igual que ocurría con la sala del imán, tiene unos requerimientos muy exigentes de control de la temperatura. Para garantizar un correcto funcionamiento de los componentes electrónicos que alberga, no debería superar los 21°C.

En las fotografías que se acompañan se pueden observar las rejillas de ventilación presentes en la parte posterior de los armarios y en el suelo.



Vamos a finalizar el capítulo con una relación de las características técnicas de un equipo concreto de RMN. Corresponden al modelo 1,5 T Signa de G.E. y su elección se debe, única y exclusivamente, a que es el equipo instalado en la Unidad del HUGU a la cual yo pertenezco:

1. Imán superconductor de 1,5 T.
2. Sistema de refrigeración por Helio.
3. *Shielding* activo con una intensidad de gradiente de 23mT/m.
4. Antena de cuadratura de transmisión-recepción.
5. Sistema digital de RF con posibilidad de conectar antenas en *Phased-Array*.
6. Abertura del *gantry* de 55 cm.
7. Peso de 3.863 kg.
8. Ordenador *Octane Workstation* de *Silicon Graphics*.
9. Estándar de grabado de imágenes DICOM 3.0.

EL PACIENTE DE RESONANCIA MAGNÉTICA

CAPÍTULO 22.- CRONOLOGÍA DE UNA EXPLORACIÓN RMN

El objetivo de este pequeño capítulo es establecer los pasos sucesivos que acontecen en cualquier exploración de RMN. Haremos referencia a “lo que se ve” y a “lo que sabemos que ocurre”. Con alguna pequeña variante, ésta podría ser una cronología sintetizada de lo que ocurre desde el momento en que un paciente acude a la unidad de RMN:

1. Recepción del paciente y valoración del tipo de exploración solicitada.
2. Confirmación de la cita en el Sistema de Información de Radiodiagnóstico (**RIS**).
3. Revisión del cuestionario de compatibilidad magnética y del consentimiento informado.
4. Información al paciente sobre todo aquello que se considere importante para la correcta realización de la exploración y, si fuera preciso, aclaración de las dudas que pudiera tener.
5. Selección del paciente en la *work list* (lista de trabajo) del equipo e introducción de sus datos en la consola.
Hay que mostrar un especial cuidado en introducir el **peso exacto** del paciente, pues el equipo lo tendrá en cuenta para calcular la tasa de energía que puede absorber (**SAR**).
6. Selección, en la consola, del protocolo de estudio.
7. Selección de la antena que se va a utilizar.
8. Preparación del paciente: a) Desvestirse y despojarse de cualquier elemento metálico; b) Colocación de vía endovenosa si fuera preciso; c) Proveerle de tapones o cascos para reducir el ruido típico de las secuencias.
9. Colocación del paciente, con la antena situada en el isocentro del imán. Si fuera preciso para la realización del estudio se le colocarían los electrodos cardiacos o la membrana del *gating* respiratorio. Indicarle que se coloque los protectores acústicos y recordarle las instrucciones más importantes.
10. Alineación de los protones, paralelo y antiparalelo, con el campo magnético principal y precesión de los mismos a la frecuencia de resonancia o frecuencia de Larmor.
11. Ajuste automático del sistema.
12. Discriminación del pico del agua.
13. Sintonización de las antenas emisora y receptora (*Tuning*).
14. Ajuste de la frecuencia de transmisión y de la amplitud de RF (*Frequency*).
15. Ajuste del receptor (*Receiver*).
16. Envío de la secuencia localizadora 3 planos y obtención de las imágenes.
17. Sobre las imágenes obtenidas, planificación de la primera secuencia de estudio que estará potenciada en D, T1, T2, T2*...
18. Envío de la primera secuencia de estudio.
19. Estimulación de los protones y absorción de energía por parte de los mismos.
20. Emisión de energía durante la relajación de los núcleos de H.
21. Inducción de la señal en la bobina receptora /recogida del eco en la antena.

22. Almacenamiento de los datos crudos (*Raw data*) en el Espacio-K, transformación de Fourier y obtención de las imágenes.
23. Comprobación de la calidad de las imágenes: contraste, resolución, S/R, movimiento y otros artefactos.
Si no tuviera la calidad deseada repetición de la secuencia tras haber modificado los parámetros necesarios y/o haber dado al paciente las instrucciones precisas.
24. Envío del resto de secuencias necesarias, en los distintos planos y potenciaciones, hasta completar la exploración.
25. En el caso de que se precisaran secuencias con contraste, inyección del mismo y envío de las nuevas secuencias.
26. Finalizado el estudio, retirar la vía intravenosa, recordarle que se retire los protectores acústicos y prestarle ayuda para incorporarse con suavidad y salir de la sala del imán.
27. Valoración de su estado, y si fuera preciso, acompañarlo al vestuario donde dejó la ropa y sus efectos personales.
28. Fotografiado de las imágenes, si así está establecido.
29. Archivo de las imágenes si, de igual manera, forma parte del protocolo del centro.
30. Envío del estudio al PACS y a otros destinos remotos, cuando se disponga de ellos.
31. Posprocesado de las imágenes desde una estación de trabajo.
32. Comprobación de que el estudio llegó al PACS, antes de borrar las imágenes del disco local.

CAPÍTULO 23.- ATENCIÓN AL PACIENTE EN RMN: PREPARACIÓN, CONSENTIMIENTO INFORMADO Y ENCUESTA DE COMPATIBILIDAD MAGNÉTICA

Antes de prescribir un estudio por RMN, el médico peticionario deberá tener un conocimiento exacto de aquellas circunstancias en las que la exploración puede estar contraindicada o requiera adoptar medidas de precaución. Esto ocurre en determinados estados fisiológicos, en algunas patologías y en pacientes portadores de materiales exógenos no compatibles con el campo magnético.

El facultativo ha de realizar una valoración especial en las siguientes situaciones:

- En casos de embarazo y lactancia.
- En pacientes con insuficiencia renal, cuando se trate de estudios con contraste.
- Cuando exista alergia al contraste, en estudios previos.
- Cuando el paciente porte prótesis y, en general, cualquier dispositivo metálico implantado

Por la misma razón, el médico peticionario no debe prescribir la exploración cuando el paciente sea portador de algún dispositivo que pueda ver alterado su funcionamiento por efecto del campo magnético. Como **norma general**, en los siguientes casos el uso de la resonancia magnética estaría contraindicado:

- Marcapasos cardiaco.
- Implantes cocleares.
- Clips de aneurismas cerebrales.



Aviso de seguridad en la puerta de entrada a la sala del imán

La excepción a la norma general viene de la mano de los avances en el uso de materiales compatibles con el campo magnético. Por ello, ciertos implantes en el oído interno y determinados clips cerebrales no suponen una incompatibilidad absoluta para los estudios de RMN.

Lo mismo cabe decir para algún modelo de marcapasos cardiaco. Los portadores de estos modelos pueden ser sometidos a la acción del campo magnético siempre que la exploración se realice bajo vigilancia cardiológica.

Los estudios de Resonancia Magnética no requieren de una **preparación** especial, pero si hay que seguir unas pautas que el paciente debe conocer. Aunque las normas pueden variar de unos centros a otros vamos a indicar las más importantes:

1. El paciente puede tomar su medicación habitual, previa a la exploración.
2. Cuando sea preciso que acuda a la exploración en ayunas se le indicará en el momento de facilitarle la cita.
No es fácil ofrecer una pauta rígida, en cuanto al tiempo de ayuno previo a la exploración, habida cuenta de la variabilidad de estudios que pueden ser realizados. Ésta podría ser válida:
 - Estudios sin contraste: No requieren preparación.
 - Estudios contrastados: Ayuno durante las 4-6 horas anteriores al estudio.
 - Exámenes pélvicos y abdominales: Ayuno durante las 6 horas anteriores a la realización de la prueba.
3. Teniendo en cuenta la larga duración del estudio, entre 30 y 60 minutos, puede resultar conveniente que el paciente realice sus necesidades fisiológicas antes del comienzo de la exploración.
4. En los estudios que precisen el uso de contraste, o sean realizados bajo sedación o analgesia, el paciente deberá firmar un consentimiento informado.

ATENCIÓN AL PACIENTE

La **atención al paciente** en un estudio de RMN variará a lo largo de la misma y deberá ir dirigida a informarle y tranquilizarle antes de la exploración, durante la misma y después de haber concluido ésta.

ANTES DE LA EXPLORACIÓN

Vamos a resumir las actuaciones más importantes que conformarían la atención al paciente de RMN, previas a la realización del estudio:

1. Ofrecerle una hoja o folleto explicativo en el que se describa con lenguaje comprensible el objetivo y las características de la exploración que se le va a realizar.
Es muy importante cerciorarse de que el paciente entiende todo el proceso.
2. Darle la posibilidad de que formule las preguntas que le permitan despejar cualquier duda acerca del procedimiento a seguir.
3. Debe rellenar un cuestionario de seguridad sobre compatibilidad magnética y firmarlo como prueba de veracidad.
Incluirá información acerca de su estado general, sobre si es portador de algún implante u objeto metálico, si ha sido sometido a cirugía, etc.
Ser portador de un marcapasos cardiaco supone incompatibilidad absoluta para la realización de este tipo de exploración (con la excepción anteriormente mencionada).
Clips para aneurismas cerebrales, implantes cocleares, neuroestimuladores cerebrales o viejos *stents* vasculares pueden representar también una incompatibilidad absoluta.

Dependerá de que el material implantado sea o no compatible con el campo magnético.

Resulta importante, también, detectar si el paciente trabaja con materiales metálicos o ha estado expuesto a pequeños fragmentos metálicos, en especial en los ojos. En caso afirmativo conviene realizar, previamente, una radiografía de la órbita para descartar o confirmar la presencia de los mismos.

4. Tras haber sido convenientemente informado sobre los beneficios y riesgos del procedimiento y acerca de las alternativas diagnósticas al mismo, debe firmar el consentimiento informado para someterse a la exploración.
5. Conviene valorar su aspecto general, tanto física como psicológicamente, a fin de detectar las necesidades del paciente: si tiene autonomía de movimientos, si requiere ser acompañado durante la exploración, si presenta signos de ansiedad, si va a colaborar o no...
6. Se le debe proporcionar la intimidad necesaria para que pueda desprenderse de toda la ropa y de los objetos personales. Debe conservar, únicamente, la ropa interior y ponerse la bata que se le facilite.

Es muy importante que se le advierta que debe despojarse de todos los objetos metálicos, sean o no ferromagnéticos, como anillos, cadenas, relojes, audífonos, prótesis dentales removibles u horquillas, por poner algunos ejemplos. La misma advertencia debe realizarse para cualquier soporte que contenga datos magnéticos, como es el caso de las tarjetas de crédito, pues por efecto del imán se perderían todos los datos.

Sería recomendable que el paciente acudiera a la cita sin cosméticos, rímel o sombra de ojos que pueden contener metales y, por tanto, artefactar la imagen e incluso ocasionar quemaduras leves por efecto del depósito energético en la cara.

7. Por último, se le acompañará a la sala donde se va a realizar la exploración.

DURANTE LA EXPLORACIÓN

Mientras dura la exploración de RMN, y en función de cada paciente, convendrá estar atento a una serie de detalles:

1. Posicionar al paciente lo más cómodamente posible, lo que le ayudará a sobrellevar mejor la exploración y garantizará ausencia de movimientos durante la misma. Es muy importante recordar al paciente la necesidad de permanecer quieto mientras dura la exploración.
Conviene indicar al paciente que desde el puesto de control se puede tener, en todo momento, contacto oral y visual con él.
2. Mantenerle informado sobre ciertos aspectos como, por ejemplo, el tiempo que resta para finalizar la exploración o el momento en que se procederá a inyectarle el medio de contraste.
3. Mantener con él comunicación visual y oral, mientras dure la exploración, para valorar su estado. Esta comunicación se torna más importante en los estudios con contraste

intravenoso, una vez administrado, a fin de descartar cualquier reacción alérgica como prurito o dificultad respiratoria.

4. En pacientes claustrofóbicos o en estado de ansiedad y en pacientes pediátricos conviene adoptar medidas particulares, como permitir la presencia a su lado de un acompañante.

DESPUÉS DE LA EXPLORACIÓN

La atención al paciente en la Unidad de RMN no debe finalizar hasta que el paciente abandona la misma. Por esta razón conviene:

1. Prestarle ayuda para incorporarse de la mesa de exploración, pues debido a la larga duración del estudio puede presentar hipotensión postural, y para salir de la sala.
2. Ofrecerle ayuda para vestirse, proporcionándole en todo momento la intimidad necesaria.
3. Responder a cualquier pregunta sobre el desarrollo de la exploración y facilitarle la información que precise acerca del plazo en el que podrá disponer del informe del estudio.

ENCUESTA DE COMPATIBILIDAD MAGNÉTICA Y CONSENTIMIENTO INFORMADO

Como ya hemos indicado y debido a las características del potente campo magnético creado por el imán, antes de someterse a una exploración de RMN es conveniente tener una idea exacta de cualquier circunstancia que obligue a adoptar precauciones especiales o incluso a desaconsejarla.

Un primer filtro debería ser realizado por el facultativo que solicita el estudio. La presencia de marcapasos, el estado de gestación o patologías como la insuficiencia renal desaconsejarían, en una primera valoración, la solicitud de la exploración.

Pero no son estas las únicas situaciones que deben ponernos en “estado de alerta”. Por esta razón, siempre que se realice una exploración de este tipo el paciente debe rellenar una encuesta, que podemos denominar de compatibilidad, cuya finalidad será confirmar o descartar la existencia de circunstancias que puedan poner en riesgo su salud y/o reducir la calidad de las imágenes obtenidas.

Los **formularios de compatibilidad** varían de unos centros a otros, pero el objetivo de todos ellos es el que hemos reseñado. Estas son las preguntas que no suelen faltar en ninguno de ellos:

- Si es portador de marcapasos cardiaco.
- En el caso de ser mujer, si está o no embarazada.
- Si sospecha si tiene virutas metálicas, especialmente en los ojos.
- Si es portador de elementos metálicos como metralla, clips cerebrales, clips aórticos o carotideos, neuroestimuladores cerebrales o prótesis.

- Si ha sido intervenido quirúrgicamente.
- Si es alérgico a algún medicamento o al contraste.
- Si padece insuficiencia renal.
- Si se le ha colocado alguna válvula cardíaca.
- Si porta prótesis de oído o prótesis oculares.
- Si utiliza dentadura postiza o audífono.
- Si tiene colocados tornillos, prótesis o placas.
- Si es portador de una bomba de insulina.
- Si presenta suturas metálicas.
- Si lleva tatuajes.
- En el caso de ser mujer, si lleva colocado un DIU.

La encuesta de compatibilidad ha de ser firmada por el paciente como prueba de que lo que ha reseñado en ella es veraz.

CUESTIONARIO (marcar con una cruz la respuesta que corresponde):	SI	NO	TIPO
Ha sido lesionado por un objeto/cuerpo extraño metálico (por ejemplo, bala, balín, metralla)			
Ha sufrido alguna vez una lesión causada por la introducción de un objeto metálico en el ojo (astillas o virutas metálicas, otros objetos metálicos)			
Tiene suturas metálicas o ganchos en piel??			
Marcapaso Cardíaco (o si lo tenido anteriormente)			
Un implante electrónico, mecánico o magnético de cualquier tipo			
Desfibrilador cardíaco implantado			
Pinza(s) para aneurisma (Clips)			
Válvula cardíaca artificial (prótesis)			
Neuroestimulador			
Bioestimulador			
Electrodo(s) o alambre(s) interno(s)			
Implante coclear, audífono o cualquier tipo de implante en el oído			
Cualquier tipo de espiral (coil), filtro o endoprótesis vascular, uretral o de otro tipo (stent)			
Bomba implantada de medicamentos (por ejemplo, insulina, Baclofen, quimioterapia, medicina para el dolor)			
Cualquier acceso intravenoso (por ejemplo, Broviac, Port-a-Cath, Hickman, PIC)			
Shunt intraventricular – espinal			

Algunas preguntas comunes de un cuestionario de compatibilidad magnética

Por otro lado, y desde luego siempre que la exploración se realice con contraste, el paciente deberá firmar el correspondiente **consentimiento informado (C.I.)**.

Hay autores que consideran que no es necesario realizar C.I. en RMN, incluso si se administra contraste intravenoso, debido al bajo riesgo de esta técnica. En todo caso es práctica habitual su realización.

El C.I. consiste en una explicación, al paciente, de los beneficios y riesgos del procedimiento recomendado para seguidamente solicitarle su autorización para ser sometido al mismo.

El C.I. que se realiza en RMN presenta las mismas características que los utilizados en otras exploraciones diagnósticas o terapéuticas:

- Debe ser voluntario.
- Debe contener información suficiente en cantidad y en calidad.
- El paciente debe tener capacidad para comprender la situación a la que se enfrenta, así como conocer las alternativas diagnósticas posibles.
- Se ha de entregar al paciente con tiempo suficiente para que pueda meditar su decisión o consultarla con sus allegados.
- Debe poder ser revocado, si el paciente así lo decide, con anterioridad a ser sometido a la exploración.

Las situaciones en las que podríamos prescindir del C.I. están reguladas normativamente:

- Urgencia vital.
- Grave peligro para la salud pública.
- Incompetencia del enfermo.
- Imperativo legal.
- Rechazo explícito de toda información por parte del paciente.

Muchas Unidades de Resonancia Magnética Nuclear, entre ellas la del Hospital Universitario de Guadalajara a la que yo pertenezco, utilizan un formulario que cumple una triple función:

1. Ofrece información al paciente sobre las características y circunstancias más relevantes de la exploración, así como las indicaciones que el paciente ha de seguir durante la misma.
2. Incluye la encuesta de compatibilidad.
3. Actúa, también, de consentimiento informado.

Al final del documento se requiere la firma de la persona que va a ser sometida a la exploración. Se trata de una práctica bastante extendida.

The image shows two forms side-by-side. The left form is titled '9. Declaración de consentimiento' and contains fields for patient and representative information, a declaration section, and signature lines. The right form is titled '10. Revocación del consentimiento' and contains a revocation statement, date, and signature lines for both doctor and patient.

9. Declaración de consentimiento

Don/Doña _____ de _____ años de edad, con domicilio en _____, DNI _____ y nº de SIP _____

Don/Doña _____ de _____ años de edad, con domicilio en _____ en calidad de (representante legal, familiar o allegado de la paciente) _____, con DNI _____

Declaro:

Que el Doctor/a _____ me ha explicado que es conveniente/necesario, en mi situación la realización de _____

y que he comprendido adecuadamente la información que me ha dado.

En _____ a _____ de _____ de 2 _____

Fdo: Don/Doña _____ DNI _____

Fdo: Do/Doña _____ DNI _____

Colegiado nº: _____

10. Revocación del consentimiento

Revoco el consentimiento prestado en fecha _____ de _____ de 2 _____ y no deseo proseguir el tratamiento que doy con esta fecha por finalizado.

En _____ a _____ de _____ de 2 _____

Fdo. el médico _____ Fdo. el/la paciente _____

Colegiado nº: _____

Izquierda: Consentimiento Informado
Derecha: Revocación de C. I.

CAPÍTULO 24.- POSIBLES RIESGOS BIOLÓGICOS DE LA RMN

A pesar de no emitir radiaciones ionizantes, la RMN no está exenta de riesgos. Por desgracia, la literatura específica ha documentado algunas muertes y muchas lesiones graves producidas por la interacción del campo magnético con marcapasos, clips de aneurismas, balas de oxígeno o sillas de ruedas, por poner algunos ejemplos.

Como hemos visto a lo largo de estas páginas, en RMN son muchos los “elementos” que intervienen en el proceso y que en algunos casos interaccionan con el paciente. Todos ellos, manejados de forma correcta, pueden minimizar los hipotéticos riesgos biológicos que comportan, no sólo para el paciente sino para cualquier persona que intervenga en el mismo.

Estos son los elementos a los que hacemos referencia:

1. El campo magnético estático.
2. El campo magnético de los gradientes.
3. Los pulsos de radiofrecuencia.
4. El Helio (refrigerante).
5. El Gadolinio (medio de contraste).

En el caso de los tres primeros, a la hora de considerar el riesgo, es importante separar los efectos biológicos directos, producidos por su efecto sobre el organismo, de los efectos indirectos, debidos a accidentes.

Nosotros vamos a hacer mayor hincapié en los efectos directos pero dejando claro que, permanentemente, están sufriendo constantes revisiones por parte de diferentes organismos internacionales y sociedades científicas.

RIESGOS RELACIONADOS CON EL CAMPO MAGNÉTICO ESTÁTICO

1. Los campos magnéticos estáticos son los responsables de los denominados **potenciales de flujo**.

Los campos magnéticos estáticos desvían las cargas eléctricas en movimiento en direcciones opuestas en función de su signo. Debido a ello, en los vasos los iones positivos y los negativos se desplazan en sentidos contrarios dando lugar a una diferencia de potencial entre las paredes del vaso. Este mismo fenómeno podría afectar a la conducción nerviosa. Aunque los estudios no son concluyentes y muchos de ellos se han realizado en animales, podríamos situar en campos mayores de 3-4 Teslas el umbral para la aparición de cualquier tipo de anormalidad.

En efecto, en este tipo de campos magnéticos se han descrito leves alteraciones del electrocardiograma sin alteraciones hemodinámicas y mínimas afectaciones neurológicas.

2. El campo magnético atrae a los objetos ferromagnéticos, siendo la fuerza de atracción directamente proporcional a la inversa de la distancia al imán.

Por tanto, hay que mostrar un especial cuidado no sólo con los objetos metálicos que pueda portar el paciente, sino con todos aquellos que puedan ser introducidos en la sala del imán.

El término “**efecto misil**” describe muy gráficamente lo que ocurre cuando, por descuido o negligencia, un objeto con susceptibilidad magnética positiva es introducido en la sala del imán.



Efecto misil: Por descuido o negligencia pueden producirse situaciones, como la de la imagen, en la que un objeto voluminoso (silla de ruedas) bloquea el orificio de entrada al imán.

3. El campo magnético estático va a producir, también, alteraciones en el funcionamiento de dispositivos electrónicos.

Hay que tener cuidado de no introducir en la sala ningún dispositivo que pueda quedar alterado en su funcionamiento o inutilizado. Es el caso, por ejemplo, de los audífonos o las tarjetas de crédito.

Las formas de prevenir estos efectos ya han sido comentadas:

- Realizar una encuesta de compatibilidad magnética.
- Despojar al paciente de todo el material magnético.
- Usar siempre material compatible en el interior de la sala del imán.
- No realizar la exploración cuando exista cualquier duda acerca de la compatibilidad del material.

RIESGOS RELACIONADOS CON EL CAMPO MAGNÉTICO DE LOS GRADIENTES

Por tratarse de variaciones de campo magnético en el espacio y en el tiempo, los gradientes magnéticos pueden producir efectos biológicos.

Las variaciones en el espacio, según todos los estudios, carecen de interés cuando la acción es sobre cuerpos diamagnéticos como es el caso del organismo humano.

Sí son reseñables los efectos, de los campos magnéticos variables, en el tiempo pues pueden dar lugar a corrientes eléctricas inducidas, denominadas **corrientes de Eddy**. Esta sería la primera consecuencia de los campos magnéticos variables.

Las corrientes de Eddy producen variaciones locales de campo magnético y terminan por artefactar la imagen (artefactos de Eddy). Cuando la corriente inducida es lo suficientemente alta puede dar lugar, asimismo, a potenciales de acción.

Conviene advertir a los pacientes para que no crucen los brazos y los pies durante la exploración, para evitar formar circuitos en el propio cuerpo (**body loops**).

El efecto más importante de las corrientes inducidas, por bobinas de gradiente, es la estimulación de nervios periféricos que puede llegar a producir **contracciones musculares**.

En secuencias EPI, con valores de *Slew Rate* muy altos, pueden producirse palpitaciones y **hormigueos**.

En campos magnéticos superiores a los utilizados en la práctica clínica se ha descrito la aparición de sensaciones luminosas en la retina (**magnetofosfenos**) y sensaciones de vértigo y náuseas.

Una segunda consecuencia de los campos magnéticos variables son las **fuerzas electromotrices inducidas**, producidas por la entrada y salida de los gradientes.

Estas fuerzas generan vibraciones que son las responsables del típico **ruido** de las secuencias de RMN. La intensidad normal oscila entre los 65 y los 95 decibelios, pero pueden alcanzarse intensidades próximas a los 130 dB (aproximadamente, el nivel de ruido que produce un avión cuando despegue).

Se han descrito algunos casos de sordera transitoria, por lo que resulta recomendable el uso de protectores para los oídos (tapones o auriculares) en todos los estudios de RMN.

RIESGOS RELACIONADOS CON LOS PULSOS DE RF

La emisión de pulsos de RF supone la absorción de energía por parte del tejido biológico. Por esta razón, el primero y más importante efecto biológico producido por los pulsos de RF es el **depósito calórico**.

La tasa de absorción de energía por unidad de peso, como consecuencia de los pulsos de radiofrecuencia, recibe el nombre de **SAR** (*Specific Absorption Rate*). Se expresa en W/kg.

Los equipos de RMN, durante una exploración, tienen en cuenta dos valores de SAR. Por un lado, la media de SAR en todo el organismo y por otro, el valor máximo de SAR en un tejido.



Durante un estudio RMN el equipo ofrece información de los valores medio (izquierda) y máximo (derecha) del SAR.

La absorción de energía, y en definitiva el SAR, va a depender de la intensidad del campo magnético. Cuanto mayor sea éste mayor será la frecuencia de precesión de los núcleos de H, mayor la frecuencia de los pulsos emitidos y mayor la absorción de energía y el depósito calórico.

Normalmente se admite que, en cualquier exploración de RMN, el depósito calórico nunca debe sobrepasar el equivalente al metabolismo basal en reposo (1,5 W/kg).

No se han detectado aumentos de temperatura superiores a 0,5°C.

Conviene tener en cuenta, también, la posibilidad de que se produzcan quemaduras en pequeñas zonas de contacto con el cuerpo, como por ejemplo en las manos. Son los denominados “**puntos calientes**”. Se pueden prevenir separando las manos del cuerpo utilizando para ello, si fuera necesario, almohadillas no conductoras; no cruzando los pies y las manos, y separando los muslos.

A la hora de limitar el SAR siempre será más fácil lograrlo en secuencias GRE que en secuencias SE. Recordemos que en las secuencias SE además de los pulsos de excitación se utilizan pulsos de RF para refasar los núcleos de H y obtener los ecos, y en muchos casos para saturar la grasa (secuencias FAT-SAT).

Todos los equipos de RMN disponen de un sistema automático de limitación del depósito calórico que impide programar una secuencia si ésta sobrepasa el SAR.

Aunque el equipo pueda “prohibir” la realización de alguna secuencia, porque se haya superado el valor de SAR recomendado, existen situaciones en las que el valor máximo de SAR nunca debería ser sobrepasado. Entre ellas destacaremos los casos en los que el paciente presente fiebre, falta de consciencia o cardiopatía severa.

En los casos descritos y, en todos aquellos en los que queramos alejarnos de los valores máximos, tenemos la posibilidad de disminuir el SAR. Para ello, podemos aumentar el TR, disminuir el número de cortes, disminuir el ángulo de inclinación, no colocar bandas de saturación o aumentar el espesor del corte, entre otras actuaciones posibles.



Quemaduras por contacto durante una exploración de columna lumbar. Durante la misma, el borde interno de la mano permaneció pegado al borde externo del muslo.

RIESGOS RELACIONADOS CON LOS REFRIGERANTES

Los imanes superconductivos utilizan He líquido como refrigerante para que la corriente eléctrica circule sin resistencia por el hilo conductor.

El helio realiza esta función a una temperatura de 0°K (-273°K). A dicha temperatura el helio permanece en estado líquido.

El punto de ebullición del helio líquido se encuentra a 4,14 °K (aproximadamente a -269°K) por lo que por encima de esta temperatura pasaría a He gas aumentando su volumen unas 760 veces.

En el caso de que este hecho se produjera la presión del gas, en el recipiente que lo contiene (**criostato**), sería tan alta que sería preciso liberar gas rápidamente hasta descomprimir el recipiente. La salida del helio gas se realizaría a través de una válvula de seguridad.

Cuando tiene lugar una evaporación brusca del helio y su evacuación al exterior, a través de una válvula de seguridad, se dice que se ha producido un **QUENCH**.

Todos los equipos de RMN refrigerados por He tienen previsto un dispositivo para la salida del gas hacia arriba y al exterior. El diseño arquitectónico de estos imanes incluye una chimenea acoplada al equipo que dirige el gas al exterior y hacia el punto más alto del edificio en el que se encuentra instalado.

El **Quench** puede ocurrir de forma accidental o puede ser provocado:

1. Si se produjera un descenso significativo del nivel de helio líquido, el helio no realizaría correctamente su función y el conductor comenzaría a calentarse. Se produciría, por ello, una pérdida de la superconductividad. Además, el calor generado

aumentaría la temperatura del helio, de manera que si superara su punto de ebullición se transformaría en gas y aumentaría de volumen, haciendo necesaria su evacuación. Estaríamos ante una situación de **quench accidental** en el que la evacuación del helio vendría provocada por una pérdida brusca de la superconductividad.

2. Desgraciadamente se producen situaciones en las que, por no seguir los protocolos de trabajo establecidos y los procedimientos de seguridad, un objeto pesado o voluminoso puede quedar pegado al imán resultando imposible su retirada debido a la fuerza de atracción ejercida por el imán sobre el objeto. Pero podría ser más grave todavía si el objeto atraído atrapara a cualquier persona contra el imán u obstruyera el orificio del mismo.

En este caso habría que provocar una pérdida de la superconductividad; es decir, habría que bajar el campo magnético.

En el primero de los casos, objeto pegado al imán, se realizaría una bajada del campo gradual hasta que el objeto pudiera ser retirado sin problemas. El proceso sería realizado por personal cualificado de la empresa tecnológica fabricante del equipo.

En el segundo caso, en el que existe riesgo para las personas, habría que bajar el campo magnético de manera brusca y sin ningún tipo de control. Bastaría con pulsar una de las “**setas**” de bajada de campo que se encuentran en las paredes del interior de la sala. Interruptores que están protegidos por una tapa para que no puedan ser accionados de forma accidental.

En ambos casos estaríamos ante un **quench provocado**.



QUENCH: 1.- Objeto obstruyendo el orificio del equipo de RMN; 2.- Salida del Helio por la chimenea tras provocar un Quench.

En caso de incendio habría que provocar un *quench* siempre que existiera riesgo de propagación del mismo a la sala del imán. Todas las unidades de RMN disponen de extintores antimagnéticos para este fin.

Con el fin de evitar algún tipo de accidente, siempre que se produzca un *quench* habrá que proceder a evacuar la sala del imán.

Después de un *quench* hay que reponer el nivel de He en su contenedor y realizar una valoración del estado de homogeneidad del campo magnético.

El helio es incoloro, inodoro e insípido y puede producir, por contacto e inhalación, congelación y asfixia.

Nunca habría que descartar la posibilidad de que el helio gas entrara en la sala del imán. Si esto llegara a ocurrir, al ser menos pesado que el aire, el helio ascendería a la parte alta de la sala desplazando al oxígeno.

La mayoría de las salas con imanes superconductivos cuentan con un detector, situado en el techo, que mide la concentración de oxígeno en la sala y que se dispararía en cuanto disminuyera su concentración.

El desplazamiento del oxígeno por el helio se produciría antes de que éste pudiera respirarse, por lo que a la mayor brevedad habría que sacar al paciente de la sala y proceder a ventilar ésta.



Chimenea de evacuación del helio gas: 1.- Conexión de la chimenea en la jaula de Faraday; 2.- Equipo con la chimenea acabada; 3 y 4.- Aspecto exterior de la chimenea Se trata de un equipo Signa 1,5 T de G. E.

RIESGOS RELACIONADOS CON EL GADOLINIO

Hasta hace poco menos de una década los únicos riesgos asociados al uso del gadolinio, como medio de contraste utilizado en RMN, eran las reacciones alérgicas, generalmente, de carácter leve como vómitos o náuseas.

Las reacciones alérgicas se ha demostrado que son más frecuentes en pacientes que han presentado, previamente, algún episodio de alergia a los contrastes iodados. Estos pacientes junto a pacientes con asma y a pacientes alérgicos, en general, se considera que tienen mayor probabilidad de sufrir una reacción adversa. En ocasiones se les somete a una premedicación antes de realizar la exploración.

Además de su eliminación normal, los contrastes de gadolinio se eliminan por las secreciones de la mama durante las 24 horas siguientes a su inyección. Este hecho debe ser tenido en cuenta en las exploraciones realizadas a mujeres lactantes.

Está demostrado, asimismo, que los contrastes de gadolinio atraviesan la placenta. Por esta razón, si se realizara un estudio de RMN a una mujer en estado de gestación no se le debería introducir contraste.

De unos años a esta parte, las reacciones alérgicas han dejado de ser el único riesgo de los agentes de contraste que contienen gadolinio pues se los vincula con una enfermedad nueva denominada **Fibrosis Sistémica Nefrogénica**, que se manifiesta en pacientes con historia previa de insuficiencia renal. Como ya dijimos, cuando estudiamos los contrastes, la **FSN** provoca cicatrización o fibrosis de la piel y de los órganos y al día de hoy no existe un tratamiento efectivo para ella.



Edema, induración, eritema y engrosamiento de la piel en pacientes afectados de FSN

EMBARAZO Y RESONANCIA MAGNÉTICA

No existen evidencias de que la RMN incida de forma negativa en el embarazo (provocando abortos o acortando el periodo de gestación) o en el feto (produciendo malformaciones).

A pesar de ello, la RMN a mujeres gestantes se debe realizar exclusivamente cuando su estado de salud no permita esperar a realizarla después del parto o cuando se sospechen malformaciones o patologías en el feto. En estos casos la decisión se deberá tomar tras haber realizado un **balance riesgo/beneficio** y resultaría aconsejable obtener un consentimiento firmado por la paciente en el que, conociendo los beneficios y riesgos de la exploración, manifieste su deseo expreso de someterse a la misma.

En cuanto a las trabajadoras, de una Unidad de RMN, que se encuentren embarazadas el criterio general es que pueden desarrollar todas sus funciones a excepción de permanecer en el interior de la sala del imán mientras se produce la adquisición de la imagen.

Si no existe riesgo, ¿porqué tantas precauciones? Existe un consenso a nivel mundial de no abusar de pruebas innecesarias durante el embarazo, por precaución ante posibles efectos aún no conocidos.

En el caso de mujeres lactantes, como ya hemos comentado, la única precaución ha de ser la no utilización de gadolinio al realizar el estudio. Si no fuera posible y se inyectara contraste, se recomienda suspender la lactancia el día siguiente de la exploración.

La conclusión que deberíamos obtener sería que en las exploraciones por RMN se debe actuar con la misma precaución que lo hacemos en exploraciones radiológicas; es decir, mostrar un especial cuidado durante el primer trimestre del embarazo.

CAPÍTULO 25.- PROTOCOLOS DE SEGURIDAD EN RMN: PRECAUCIONES, CONTRAINDICACIONES E INCOMPATIBILIDADES

En el capítulo anterior hemos valorado los posibles riesgos biológicos asociados a las técnicas de RMN. En éste vamos a estudiar los riesgos que conllevan este tipo de técnicas y más concretamente, su efecto sobre los objetos metálicos.

Las instalaciones de RMN representan un **riesgo potencial** no sólo para los pacientes, sino también para los acompañantes, el personal sanitario y cuantas personas tengan contacto con el equipo de manera ocasional.

Los protocolos o los procedimientos de trabajo tienen como objetivo evitar lesiones y accidentes a las personas que entran en contacto con el equipo de resonancia. Para ello, es imprescindible conocer los efectos de los campos magnéticos y de los campos de radiofrecuencia con ciertos objetos metálicos y seguir unos procedimientos de seguridad.

ZONAS PERMITIDAS Y RESTRINGIDAS EN RMN

Para garantizar la seguridad en una Unidad de RMN se necesita la implicación y participación activa de todo el personal adscrito a la misma. Esta participación requiere, en primer lugar y fundamentalmente, un conocimiento preciso de las distintas zonas y de las restricciones de paso y permanencia en las mismas.

Generalmente se admite que en toda instalación de RMN existen cuatro zonas:

1. **Zona I:** Es una zona que no requiere control, por lo que podríamos clasificarla como de libre acceso.
Por ella, podría circular cualquier persona. Incluiría por ejemplo, salas de informe, salas de espera o aseos.
2. **Zona II:** Sería una zona intermedia entre la de libre acceso y aquellas otras que requieren un control estricto (Zonas III y IV).
Por ella se podría mover el paciente siempre bajo el control del personal de RMN. Podríamos incluir en ella, las cabinas donde se desvisten los pacientes y las salas de preparación (cuestionario, vía...).
3. **Zona III:** Se trata de una zona controlada y de acceso restringido.
Existe riesgo de interacción del imán con las personas y debe estar prohibido el acceso al público incluyendo al personal administrativo y al personal sanitario que no pertenezca a la Unidad. Su control debe ejercerlo el personal de RMN.
La **línea de 5 Gauss** marcará la separación entre esta zona y la zona IV.
4. **Zona IV:** Es la sala de exploración en la que está situado el imán. Es una zona controlada y de acceso restringido al personal que va a realizar el estudio (Técnico) o va a participar en él (Celador, DUE, Radiólogo, Anestésista).
Debe de estar señalada como potencialmente peligrosa y debe existir una luz permanentemente encendida como indicador de que el imán está funcionando (conviene recordar que en los imanes superconductivos el campo magnético siempre está presente aunque no se esté realizando una exploración).

CLASIFICACIÓN DE LOS OBJETOS EN RMN

La restricción a la zona IV hay que hacerla extensiva a los materiales que entran en la sala.

Hasta hace unos pocos años cuando analizábamos los materiales, desde el punto de vista de su interacción con el campo magnético del imán, los clasificábamos en **compatibles** y **no compatibles**.

Pero, objetos seguros (compatibles) en campos bajos pueden no serlo en campos más elevados o tener comportamientos diferentes cuando se utilizan gradientes distintos. Debido a ello, la “vieja” clasificación ha sido revisada y actualmente se distinguen tres tipos distintos de materiales:

1. Objetos que ofrecen una completa seguridad o **MR-Seguros**: No presentan componentes metálicos y por tanto no son conductivos. Serían los materiales plásticos.
2. Objetos que ofrecen una seguridad condicionada o **MR-Condicionales**: Son seguros en determinadas condiciones que han sido testadas.
3. Objetos no seguros o **MR-No Seguros**: Incluiría todos los materiales que en presencia de un campo magnético pueden provocar lesiones debido a su peligrosidad. Serían los materiales ferromagnéticos.

Centrándonos en la seguridad de los materiales metálicos hay que tener en cuenta que éstos, en el entorno de la RMN, además de ser atraídos o desplazados de su ubicación por efecto del campo magnético principal, pueden inducir corrientes eléctricas a causa de los gradientes magnéticos y sufrir calentamiento por efecto de los pulsos de RF.

Hacemos hincapié en ello porque existe una tendencia a considerar la compatibilidad de un material metálico en función, únicamente, de que sea o no atraído por el imán. Debemos, por tanto, tener en cuenta las tres características que hemos mencionado.

Debido a los apantallamientos (*shielding*) activos de los modernos equipos de RMN, el efecto de atracción del imán queda reducido a distancias muy cortas al mismo. Aún así multitud de objetos metálicos, pequeños y grandes, suponen un riesgo importante si se introducen por olvido o negligencia en la sala del imán. Podríamos ofrecer múltiples ejemplos, pero bastará con citar algunos de fácil comprensión como tijeras, fonendos, sillas de ruedas, balas de oxígeno o camillas.

La buena práctica consistirá, por tanto, en que todo el personal sanitario que entre a la sala del imán se despoje previamente de todos los elementos metálicos que porte, incluidos los diamagnéticos. Este hecho, que no suele suponer ningún problema para los trabajadores de la Unidad, adquiere una mayor importancia cuando se trata de personal sanitario ajeno a la misma. En estos casos habrá que explicarles detalladamente todas las normas de seguridad de RMN y verificar que las entienden y las siguen. En particular, *exponerles concienzudamente que en los imanes superconductivos el campo magnético siempre está activo aunque “no escuchemos ruido”*. El mismo proceder habrá que seguir cuando se trate de personal no sanitario (mantenimiento, personal de limpieza, familiares de pacientes).

Obviamente el material diamagnético podría entrar en la sala del imán pero, para evitar cualquier tipo de accidente, es mucho más efectivo adquirir el hábito de dejar fuera de la sala de exploración todo el material metálico, independientemente de su susceptibilidad magnética.

En muchas unidades de RMN, se suele utilizar un imán “casero” para comprobar si el material metálico es o no compatible. Este método no deja de ser aproximativo, puesto que el campo magnético del imán es muchísimo mayor y el comportamiento de los materiales metálicos puede no ser el mismo ante el imán manual y el imán del equipo.

SEGURIDAD DEL PACIENTE

El acceso de los pacientes a la sala del imán o zona IV se controlará a partir de los datos del cuestionario de compatibilidad que previamente habrán rellenado. No nos vamos a detener en el contenido del mismo, pues ya lo conocemos por capítulos precedentes. Dicho cuestionario nos aportará información sobre los elementos metálicos que pueda portar y sobre su compatibilidad. Con ello descartaremos que sea portador de algún elemento metálico que pueda ser atraído o desviado por el campo magnético.

Pero no debemos olvidar los posibles efectos adversos de los gradientes magnéticos y de los pulsos de radiofrecuencia.

Para evitar las corrientes inducidas, producidas por efecto de los campos magnéticos variables, habremos de tener mucho cuidado con la colocación del paciente y deberemos darle instrucciones precisas para que evite formar circuitos corporales. Será importante, también, comprobar que los cables de las antenas están en perfecto estado, a la vez que separados del paciente.

El calentamiento producido por los pulsos de RF, al incidir sobre materiales metálicos, sólo se producirá cuando el elemento metálico se encuentre incluido en el campo de acción de la antena emisora.

En el caso de que el paciente fuera portador de materiales de esta naturaleza podría producirse calentamiento de la zona e incluso, como ya sabemos, llegar a sufrir quemaduras. En tal situación habría que reducir el SAR, por cualquiera de los métodos que hemos estudiado. Una buena manera sería sustituir, en la medida de lo posible, secuencias SE por secuencias GRE para reducir la cantidad de energía absorbida por el material metálico. Pero, como las secuencias GRE son más sensibles a los artefactos de susceptibilidad magnética, se trata más de una solución teórica que práctica.

Por todo ello, y aunque todos los efectos adversos no pueden ser evitados, es muy importante recordar al paciente una serie de pautas que debe seguir encarecidamente mientras dura el estudio. Colocarse los protectores acústicos y no quitárselos durante la exploración, no tocar las paredes del imán y no cruzar las manos ni las piernas, deberían formar parte de ellas.

Aunque en capítulos anteriores ya hemos hecho referencia a cómo ha de ser la actuación en RMN ante la presencia de material no compatible, vamos a analizar ahora con más detalle cual ha de ser el comportamiento ante la posibilidad de que el paciente sea portador de material biomédico:

1. **Neuroestimuladores cerebrales:** Muchos pacientes con trastornos del movimiento son sometidos a exploraciones de RMN tras sufrir un infarto o una hemorragia cerebral o para comprobar la ubicación de los electrodos.

Desde el punto de vista de la seguridad, el problema estriba en el calentamiento de los electrodos debido a los pulsos de RF. Si se siguen los consejos de la guía de seguridad para neuroestimuladores y las instrucciones del fabricante, y se utiliza la antena de cabeza como transmisora y receptora en lugar de la antena de cuerpo, estos pacientes pueden ser estudiados por RMN.

2. **Prótesis valvulares cardíacas:** Todas las existentes en el mercado han sido testadas en equipos de alto campo (1,5 y 3 Teslas) con resultado positivo. Está demostrado que la atracción ejercida sobre ellas por el campo magnético es mucho menor que la fuerza que ejerce el corazón. Esto las convierte en seguras en los estudios de RMN.
3. **Filtros y stents:** Suelen estar contruidos con materiales metálicos diamagnéticos, como el platino o el titanio, o con materiales débilmente ferromagnéticos.

Cuando se trata de material diamagnético el paciente puede ser estudiado inmediatamente tras su colocación.

En el caso de materiales con susceptibilidad magnética positiva conviene esperar un par de meses desde su colocación hasta la realización de la exploración.

4. **Marcapasos:** Es el ejemplo típico de contraindicación absoluta en RMN. Como norma general, sigue siendo válida. Pero, como ya hemos indicado, existe algún tipo de marcapasos que permite la exploración en altos campos magnéticos, siempre que se realice bajo el estricto control de un cardiólogo.
5. **Clips aneurismáticos cerebrales:** Los pacientes portadores no deben someterse a estudios de RMN salvo que se tenga absoluta certeza de la compatibilidad del material. Si existen dudas de si el paciente porta un clip de estas características, antes de someterle al campo magnético, conviene realizarle primero una radiografía de cráneo.

Tanto la seguridad como los efectos biológicos de la RMN han recibido, fundamentalmente en la última década, un extenso tratamiento en la literatura médica. También es posible encontrar información relacionada en algunas web, de las que daremos cuenta en la bibliografía que cerrará el libro. En todo caso, siempre resulta recomendable disponer de guías sobre materiales compatibles así como consultar los informes médicos que pueda aportar el paciente. Por último, siempre aplicar la máxima de que ante la duda de compatibilidad no se debe realizar la exploración.

ANEXO: BIOGRAFÍAS

Son muchos los nombres propios que han ido apareciendo a lo largo del texto. Unidades de medida, teoremas, leyes, análisis matemáticos, fenómenos físicos e, incluso, artefactos llevan su nombre.

Al estructurar los contenidos del libro me pareció interesante incluir una pequeña biografía de algunos de ellos como una forma de vincular un nombre o un apellido con el extraordinario legado que, en el cien por cien de los casos, hay detrás de los mismos. Con toda seguridad otros muchos deberían, también, ser reseñados. Pido disculpas, de antemano, por ello.

Han sido ordenados siguiendo, exclusivamente, un criterio alfabético.



Félix Bloch
(1905-1983)

BLOCH, FELIX: De origen judío, nació en Suiza (Zúrich) en 1905. En esta misma ciudad cursó estudios de ingeniería y de física. A partir de 1927 continuó con los estudios de física en la Universidad de Leipzig en la cual se doctoró en 1928. Permaneció en Alemania hasta 1933. Durante estos años estudió con Heisenberg, Pauli, Fermi y Bohr.

Con la llegada al poder del Tercer Reich emigró a EEUU y comenzó a trabajar en la Universidad de Stanford en 1934. Unos años después (1939) obtuvo la nacionalidad norteamericana y durante la segunda guerra mundial trabajó en el programa nuclear en el Laboratorio Nacional de Los Álamos. Tras dimitir del mismo colaboró en la Universidad de Harvard en los trabajos de desarrollo del radar.

Sus trabajos con campos magnéticos le llevaron a determinar el **momento magnético del neutrón** y a ser considerado uno de los padres de la Resonancia Magnética Nuclear.

Como reconocimiento a estos trabajos obtuvo el Nobel de Física en 1952, premio que compartió con el físico Edward Purcell de la Universidad de Harvard.

Falleció en 1983.



Michael Faraday
(1791-1867)

FARADAY, MICHAEL: Nacido en Newington, Gran Bretaña, en 1791 se trata, sin ningún género de dudas, de uno de los físicos más importantes de la historia de la ciencia.

Nació en el seno de una familia muy humilde y desde muy pequeño trabajó como repartidor de periódicos, primero, y como encuadernador en una librería, después. Este último trabajo le llevó a leer determinados artículos científicos que le pondrían en la senda de lo que sería su futuro. Éste comenzó cuando fue contratado como ayudante por el químico Humphry Davy.

Trabajando con hidrocarburos **descubrió el benceno** y las primeras reacciones de sustitución orgánica, desconocidas hasta entonces.

Basándose en los descubrimientos de *Oersted*, sobre campos magnéticos generados por corrientes eléctricas, desarrolló el primer motor eléctrico y descubrió el fenómeno de la **inducción electromagnética**. A partir de las observaciones de que un imán en movimiento a través de una bobina induce, en ella, una corriente eléctrica describió matemáticamente la ley que expresa la producción de energía eléctrica por un imán.

Introdujo el **concepto de líneas de fuerza** para representar los campos magnéticos.

Falleció en Londres en 1867.



Jean-Bernard-Leon Foucault
(1819-1868)

FOUCAULT, JEAN BERNARD LÉON: Físico francés nacido en 1819. Ha pasado a la historia de la ciencia por su demostración científica de la rotación de la tierra mediante el denominado “**péndulo de Foucault**”.

La demostración más importante la realizó en el Panteón de París el 23 de marzo de 1851. Utilizó como péndulo una bala de cañón de 26 kilos colgada de la bóveda mediante un cable de 67 metros de largo.

Pero no fue ésta su única contribución a la ciencia puesto que **midió la velocidad de la luz**, inventó el giróscopo y realizó las primeras fotografías del sol.

Descubrió, también, que la fuerza que se requería para que un disco de cobre girara era mayor cuando el disco era situado entre los polos de un imán y que el disco se calentaba como consecuencia de las corrientes inducidas en el metal.

A estas corrientes inducidas se las denomina **Corrientes de Foucault** o corrientes de Eddy.

Falleció en París en 1868 y está enterrado en el cementerio de Montmartre de esta ciudad.



Jean Baptiste Joseph Fourier
(1768-1830)

FOURIER, JEAN BAPTISTE JOSEPH: Nació en Auxerre, Francia, en 1768. Fue educado por los benedictinos y, debido a su buena posición familiar, pudo acceder en el ejército a una cátedra de matemáticas.

Participó junto a Napoleón en la expedición oriental de 1798 y fue nombrado gobernador del Bajo Egipto. Tras regresar a Francia comenzó sus experimentos sobre la propagación del calor que culminaron en 1822 con la publicación de la **Teoría analítica del calor**, basándose parcialmente en la ley del enfriamiento de Newton.

Sus trabajos más importantes versaron sobre la descomposición de funciones periódicas en series trigonométricas convergentes denominadas **Serie de Fourier**.

Ingresó en la Academia Francesa en 1817 y desde 1822 hasta su muerte fue secretario de las secciones de matemáticas y física.

Falleció en París en 1830 y dejó sin concluir su trabajo sobre resolución de ecuaciones que se publicó al año siguiente y contenía una demostración de sus estudios sobre la forma de calcular las raíces de una ecuación algebraica.

La **transformada de Fourier** recibe este nombre en su honor y su nombre se encuentra grabado en el listado de setenta y dos científicos que figura en la *Tour Eiffel*.



Carl Friedrich Gauss
(1777-1853)

GAUSS, JOHANN CARL FRIEDRICH: Matemático, físico y astrónomo alemán nació en Brunswick en 1777. Dicen que fue un niño prodigio; aprendió a leer solo y sus primeros y muy importantes descubrimientos los hizo siendo todavía adolescente.

A los 21 años ya había terminado su gran obra, “**Disquisiciones Aritméticas**”, con varias secciones dedicadas a la **Teoría de los Números**.

En 1831 predijo con exactitud el comportamiento orbital del asteroide Ceres, utilizando el método de los mínimos cuadrados que él mismo había desarrollado en 1794 y que, aún hoy, sigue siendo una herramienta de trabajo en muchos cálculos astronómicos.

Se puede afirmar que contribuyó, de manera muy importante, en campos tan diferentes como el análisis matemático, la teoría de los números, el álgebra, la geometría, la óptica y el magnetismo.

En 1807 aceptó el puesto de profesor de astronomía en el Observatorio Astronómico de Gotinga, cargo que ocupó hasta su muerte. Durante todo este tiempo se dedicó a afianzar sus postulados sobre geometría, prescindiendo de los postulados de Euclides, y profundizó en el estudio de ecuaciones diferenciales y secciones cónicas.

Falleció en Gotinga en 1855.



Josiah Willard Gibbs
(1839-1903)

GIBBS, JOSIAH WILLARD: Físico estadounidense nacido en 1839 en New Haven considerado uno de los padres de la termodinámica teórica.

Estudió en Yale y fue la primera persona que obtuvo el doctorado en ingeniería por esta universidad. Tras un periplo de tres años por distintas capitales europeas, en 1871, regresó a Yale donde fue nombrado profesor de física matemática en esta prestigiosa universidad. Dedicó su trabajo al estudio de la termodinámica y a la utilización del cálculo vectorial en la física.

A él debe su nombre el **fenómeno de Gibbs**, que explica como a medida que aumenta el número de términos de una serie de Fourier ésta se va aproximando a una onda cuadrada puesto que las oscilaciones se vuelven más rápidas y más pequeñas pero los picos no desaparecen.

Este fenómeno explica la existencia de artefactos en anillo en procesamiento de imágenes digitales, también denominados **artefactos de truncación o artefactos de Gibbs**.

Falleció en 1903.



Joseph Larmor
(1857-1942)

LARMOR, JOSEPH: Físico y matemático norirlandés nacido en 1857. Trabajó sobre todo en física matemática, relatividad, mecánica celeste y electrodinámica.

Entre sus aportaciones figura la demostración de que el electrón tenía masa y sentó los cimientos de la electrónica en la obra "**Éter y materia**".

En dicha obra sostenía que la materia estaba formada por partículas elementales moviéndose en el éter.

Explicó, también, la división de las líneas espectrales en un campo magnético por la oscilación de los electrones.

En 1896 publicó "**La influencia de un campo magnético sobre la radiofrecuencia**".

Falleció en Irlanda del Norte en 1942.



Heinrich Rudolf Hertz
(1857-1894)

HERTZ, HEINRICH RUDOLF: Físico alemán, nacido en Hamburgo en 1857, descubridor del efecto fotoeléctrico así como de la producción, detección y propagación de las ondas electromagnéticas. Ingeniero de profesión abandonó la misma para dedicarse a la investigación física.

Confirmó experimentalmente las teorías de Maxwell respecto a la identidad entre ondas luminosas y ondas electromagnéticas. **Calculó la velocidad de propagación de las ondas en el aire** aproximándose mucho a la velocidad de 300.000 kilómetros por segundo establecida por Maxwell. Consiguió transmitir ondas electromagnéticas dando lugar a la telegrafía sin hilos. Marconi utilizó una de sus publicaciones para construir un emisor de radio y Popov adaptó un descubrimiento de Hertz para el registro de tormentas eléctricas.

De su nombre derivan las denominadas **ondas hertzianas**, utilizadas en la radio, y el **hertzio**, unidad de frecuencia que equivale a un ciclo por segundo.

Descubrió el **efecto fotoeléctrico**, explicado después por Einstein, al observar que un objeto cargado eléctricamente perdía su carga al ser iluminado por luz ultravioleta.

Falleció en 1894 cuando sólo contaba 36 años.



Harry Nyquist
(1889-1976)

NYQUIST, HARRY: Nacido en Suecia en 1889 emigró a EEUU, con su familia, a la edad de 8 años. Estudió ingeniería eléctrica en la Universidad de Dakota del Norte y física en la Universidad de Yale.

Trabajó en el departamento de investigación de *AT&T* y continuó en dicha empresa cuando ésta pasó a denominarse *Bell Telephone Laboratories*. Trabajó en la estabilidad de amplificadores de retroalimentación, fax, telegrafía, televisión y en otros campos de la comunicación. Colaboró en el desarrollo del primer fax de *AT&T*.

Sus trabajos fueron muy importantes para el desarrollo de la **Teoría de la Información**. Su aportación consistió en determinar que el número de pulsos independientes por unidad de tiempo que pueden ser transmitidos por un canal de telégrafo está limitado al doble del ancho de banda del canal y es lo que se denomina **Teorema de muestreo de Nyquist-Shannon**.

Falleció en 1976.



Edward Purcell
(1912-1997)

PURCELL, EDWARD MILLS: Físico norteamericano, nacido en 1917, se doctoró en Harvard en 1938.

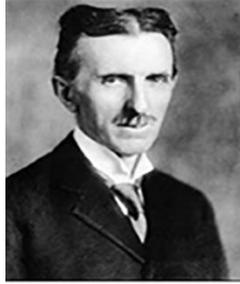
Entre 1941 y 1945 trabajó en la construcción de un radar de microondas en el *Massachusetts Institute of Technology*.

Al año siguiente, en 1946, obtuvo la cátedra de física en la Universidad de Harvard.

Fue quién demostró la **existencia del hidrógeno en el espacio interestelar** y logró detectar las microondas emitidas por el hidrógeno en este espacio.

Sus investigaciones sobre los campos magnéticos en el núcleo atómico posibilitaron el **desarrollo de la RMN** y por ellas se le concedió el Nobel de Física en 1952, junto a Felix Bloch (otro de los padres de la Resonancia Magnética) cuyos trabajos le habían llevado a determinar el momento magnético del neutrón.

Falleció en Cambridge en 1977.



Nikola Tesla
(1856-1943)

TESLA, NIKOLA: Nació en Smiljan, actual Croacia, en 1856. Estudió física en las universidades de Graz y Praga y, a los 26 años, tras trabajar en distintas empresas eléctricas en Francia y Hungría se trasladó a EEUU donde trabajó con Thomas Alba Edison, partidario de la corriente eléctrica continua. Tras discutir con éste, se asoció con G. Whestinghouse y ganaron la batalla de la **distribución de energía eléctrica** a favor de la corriente alterna.

Dedicó parte de su vida al estudio del fenómeno del electromagnetismo. Fruto de estos trabajos fue el descubrimiento del principio del campo magnético rotatorio y la creación del primer motor eléctrico de inducción de corriente alterna. Posteriormente inventó el motor de inducción de corriente trifásica.

A él se debe la constatación de que el cuerpo humano es capaz de conducir corrientes de alta frecuencia sin sufrir ningún daño.

Debido a sus afirmaciones, aparentemente increíbles e inverosímiles, fue considerado un científico “loco” y ello terminó condenándolo al ostracismo.

La unidad de inducción magnética en el Sistema Internacional fue llamada Tesla en su honor.

Falleció en Nueva York en 1943.

