



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS  
(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y ELÉCTRICA  
Av. Venezuela s/n, Lima 1 (Perú)  
Teléfono: (51-1) 6197000 Anexo 4202 Fax 4209  
Correo: [secfie@unmsm.edu.pe](mailto:secfie@unmsm.edu.pe)



# **EMISIONES DE RADIACIONES NO IONIZANTES (RNI) DE DE EQUIPOS MÉDICOS**

**Mg. Víctor Manuel Cruz Ornetta**

**Programa de investigación conjunto**

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica- Universidad Nacional Mayor de San  
Marcos**

**Instituto Nacional de Investigación y Capacitación de Telecomunicaciones (INICTEL-  
UNI) – Universidad Nacional de Ingeniería**

**Facultad de Ingeniería Ambiental- Universidad Nacional de Ingeniería  
Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA) – Ministerio de Salud**

**Octubre 2010**



## EMISIONES DE RADIACIONES NO IONIZANTES (RNI) DE DE EQUIPOS MÉDICOS

### I. LA DIATERMIA TERAPÉUTICA ( REHABILITANTE)

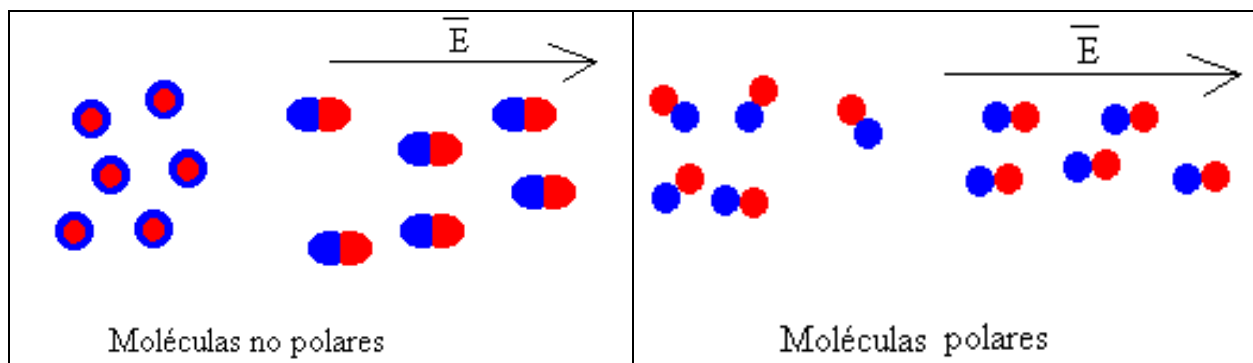
#### I.1 Principio de funcionamiento, interacciones y efectos biológicos

Utilizada para provocar calentamiento, mejoramiento de la irrigación, alivio del dolor. Trabaja en el rango de frecuencias conocidas como radiofrecuencias (RF) en las bandas de 27 MHz (27.12 MHz) en onda corta- Alta Frecuencia (HF) y en 2450 MHz en microondas –Ultra Alta Frecuencia (UHF).

Los efectos biológicos de las radiofrecuencias dependerán básicamente de la estructura de los tejidos que atraviesan, es decir, de las propiedades eléctricas (constante dieléctrica, permeabilidad magnética y conductividad principalmente), contenido de agua y reflexiones entre tejidos contiguos de diferentes propiedades (piel-grasa, grasa- músculo, etc.).

Los campos electromagnéticos utilizados para la diatermia son radiaciones no ionizantes que no producen cambios en la estructura molecular de las sustancias, siendo las moléculas polares del cuerpo como el agua las principales responsables de la transformación en calor de la energía de las ondas de radiofrecuencia.

Los mecanismos de interacción de las radiofrecuencias con la materia son la conducción iónica y la rotación dipolar. Dicha rotación dipolar es originada cuando el dipolo eléctrico, formado por las moléculas de oxígeno (negativas) y de hidrógeno (positivas), es sometido a un campo eléctrico exterior creando un momento de giro en cada molécula y obligándola a rotar. Al mismo tiempo, un campo electromagnético produce un movimiento de iones, produciéndose calor debido a la resistencia eléctrica



que presente el medio a este flujo de iones. La rotación del dipolo eléctrico, debida a las microondas, provoca choques y rozamientos con las moléculas vecinas, aumentando la energía cinética y la temperatura del líquido. Cuando las microondas cesan, las moléculas de los dipolos eléctricos tienden a desordenarse, produciéndose nuevos rozamientos choques, dando lugar nuevamente a energía térmica.



Fig. 1 Orientación de moléculas polares y no polares

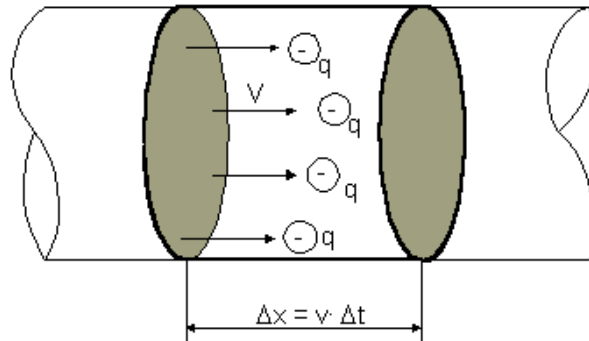


Fig. 2 Movimiento de conducción iónica

Cabe destacar que la rotación dipolar disminuye al aumentar la temperatura, mientras que la conducción iónica aumenta con la temperatura. Esto quiere decir que en primer lugar las microondas provocarán una mayor rotación y a medida que la temperatura se eleva la rotación comienza a disminuir y aumentando la conducción iónica.

Si las moléculas de agua contenidas en el material tratado son sometidas a una radiación de onda corta de 27.12 MHz la rotación de los dipolos se producirá 27.12 millones de veces para alinearse con el campo y 27.12 millones de veces para desalinearse totalizándose 57.23 millones de giros. En cambio para microondas de frecuencia 2450 MHz, el alineamiento y desalineamiento de las moléculas tiene lugar 2,450 millones de veces por segundo, produciéndose 4,900 millones de giros por segundo de cada molécula sometida a una radiación de esta frecuencia, dando lugar, al gran número de colisiones por segundo y por consiguiente a un calentamiento más rápido que en el caso de onda corta.

La onda corta debido a su menor frecuencia y mayor longitud de onda penetra con mayor profundidad por lo que logra un aumento de la temperatura en tejidos más profundos, pudiéndose producir daños en tejidos internos si no se aplican con el debido cuidado.

Mediante la diatermia por microondas dirigimos un haz de energía de microondas al área de aplicación siendo ésta absorbida por los tejidos con un alto contenido en agua. Esta energía de microondas se refleja entre los límites de tejidos diferentes (músculo/hueso) y rara vez penetra una profundidad de 2 cm. A diferencia de otros métodos de termoterapia, como la onda corta, la energía electromagnética de las microondas puede ser dirigida directamente sobre el tejido que se desea tratar, minimizando de este modo el riesgo de sobrecalentamiento de los tejidos limítrofes. En el caso de una mala aplicación de la diatermia en microondas puede haber quemaduras superficiales.

Los tejidos del cuerpo humano deben mantener una temperatura media de 37°C, por lo que si provocamos un aumento de temperatura, el sistema neurovegetativo lo detectará y provocará los mecanismos de termorregulación.

El mecanismo de termorregulación más inmediato es la vasodilatación de modo que el flujo de sangre aumenta, y mediante la perfusión lleva la sangre caliente a otras zonas de gradiente térmico más bajo. Si este mecanismo no fuera suficiente para mantener la temperatura corporal a 37 °C, el sistema nervioso provocará sudoración para poder refrigerar la piel mediante evaporación, conservando la vasodilatación.



En caso de no conseguirse la termorregulación, puede llegar a producirse una vasoconstricción, la cual va acompañada de una contracción de la musculatura lisa de las glándulas sudoríparas. Por consiguiente, el efecto terapéutico de las microondas está basado en dos aspectos fundamentales:

- La vasodilatación que facilita el movimiento de los agentes de la inflamación y el aporte de agentes reparadores.
- El efecto que estimula la formación de nuevos tejidos.

Existen otros efectos no térmicos que también pueden influenciar los niveles energéticos de los tejidos, pero las investigaciones desarrolladas hasta ahora no han arrojado evidencias ni características terapéuticas, ni efectos colaterales relevantes.

## **I.2 Aplicaciones médicas**

Las aplicaciones médicas incluyen el tratamiento de afecciones y enfermedades como:

- Inflamación cervical no infecciosa
- Artrosis aguda de rodilla
- Tendinitis y esguinces
- Luxaciones
- Varices
- Hemorroides
- Celulitis

## **I.3 Equipamiento**

Una unidad de diatermia es un dispositivo diseñado para generar radiación de radiofrecuencia y transferirla vía cables y aplicadores al área del cuerpo humano a ser tratada. Las unidades pueden ser trabajar con onda continua u onda pulsante.

### **Los sistemas de onda corta**

Básicamente, todos los equipos de diatermia de onda corta están formados por un módulo generador de radiofrecuencia, el módulo de control y el sub-sistema de aplicadores. En HF generalmente se utilizan dos tipos de aplicadores:

- Tipo capacitor: En este caso el calor básicamente se debe al campo eléctrico de radiofrecuencia generado.
- Tipo inductor: En este caso el calor se obtiene por una combinación del campo eléctrico y corrientes inducidas en el tejido por el campo magnético.

Se puede utilizar dos tipos de sistemas de electrodos:

- Unipolar: Que usa un electrodo de retorno con mucha mayor superficie que el electrodo de tratamiento y colocada fuera del área de tratamiento y el electrodo activo generalmente es de menor superficie y su objetivo es aumentar la temperatura en la zona de aplicación del electrodo.



- Bipolar: Que aplica ambos electrodos en la zona de tratamiento por lo que el calor y la energía eléctrica están localizados en un pequeño volumen. Los sistemas bipolares son más seguros, aunque la onda penetra menos, porque solo produce efectos entre los electrodos.

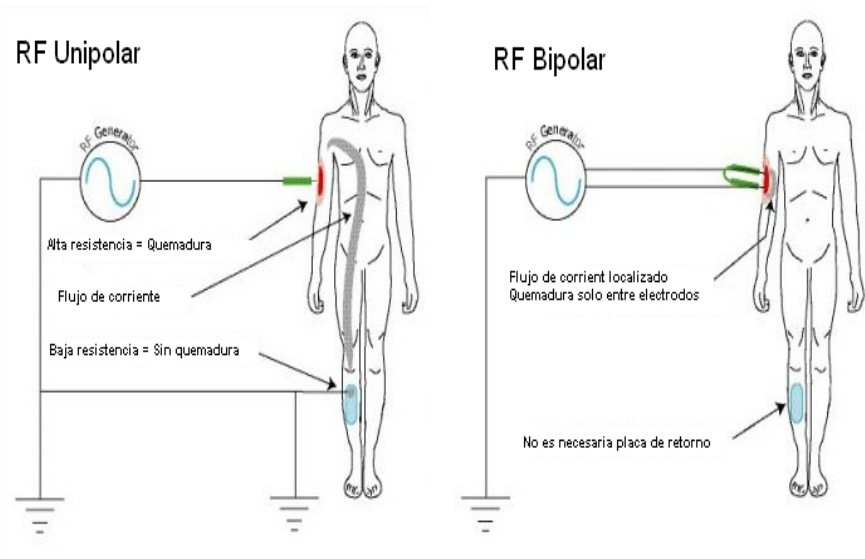


Fig. 3 Diagrama esquemático de la aplicación de Diatermia en Onda Corta



Fig. 4 Equipo para aplicación de diatermia de onda corta

### Los sistemas de microondas

Para los sistemas que trabajan en microondas se tienen aplicadores tipo antenas parabólicas y bocinas que no entran en contacto directo con el cuerpo sino a través de los campos electromagnéticos



Principalmente todos los equipos de diatermia por microondas están formados por un módulo de alimentación, módulo de control, módulo de alta tensión y el magnetrón. El magnetrón es el oscilador capaz de generar la alta frecuencia.

Es el módulo de control el que deberá estar verificado, ya que es el responsable de la radiación electromagnética emitida por el magnetrón, quien a su vez es excitado por el módulo de alta tensión. Mediante el módulo de control el operario selecciona el nivel de potencia de salida para así poder actuar sobre el magnetrón. Es práctica habitual en los fabricantes de equipo de diatermia por microondas, el usar un magnetrón comercial y personalizar el modo de controlar la potencia de salida. Aquí es donde puede radicar uno de los peligros potenciales de estos equipos de diatermia, ya que cada fabricante diseña su propio mecanismo de control para poder regular el aporte de energía. Este mecanismo puede dar lugar a un pequeño error que sumado con las pérdidas de potencia (disipadas en forma de calor) ocasionadas en el cable de unión del magnetrón con el aplicador, pueden dar lugar a una pérdida de la noción del nivel de potencia emitido. De este modo, se puede dar el caso de que programemos en el equipo una potencia de salida de 100 W y en cambio él aplicador sólo radie una energía de 70 W o menos.

En función del tipo de control realizado, este tipo de ondas electromagnéticas pueden ser aplicadas en modo continuo o en modo pulsado, si bien en ambos modos se produce la misma sensación de calor y los mismos resultados. La diferente elección entre un modo y otro vendrá en función de la zona a tratar. En modo pulsado, la energía es emitida en forma de paquetes de corta duración con largas pausas intermedia.

Otro componente muy importante dentro sistema es el aplicador (básicamente se trata de una antena), responsable de la transmisión de la energía de microondas al paciente. Con él aplicador es posible enfocar el haz de microondas, por lo que será un factor a tener en cuenta la forma de dicho aplicador. Así, podemos encontrar aplicadores de forma circular, rectangular, etc.

La elección de un tipo de aplicador vendrá en función de la dolencia y de la zona corporal que se desea tratar.

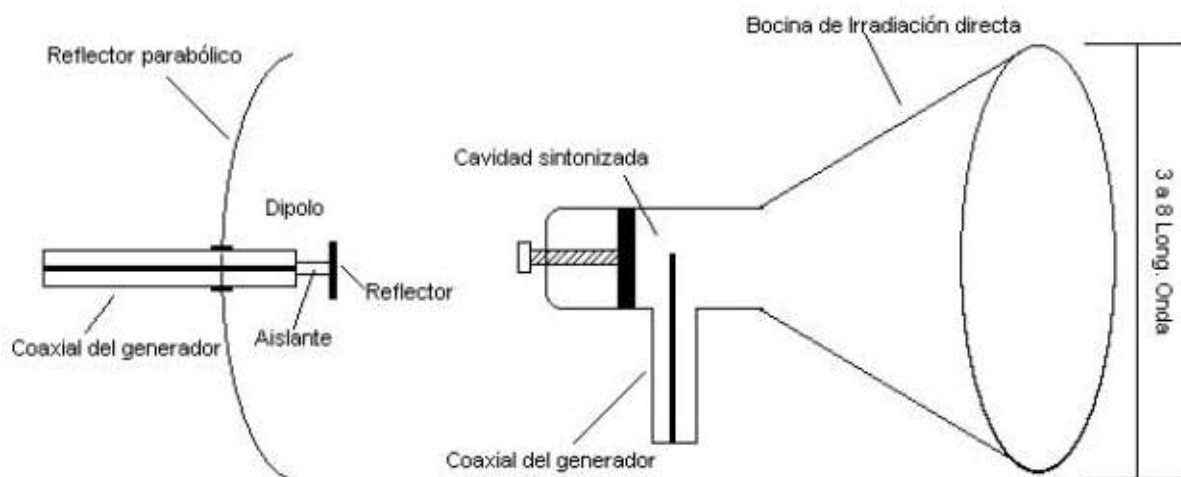




Fig. 5 Aplicadores utilizados para diatermia por microondas



Fig. 6 Equipo para aplicación de diatermia por microondas con aplicador tipo bocina

#### **I.4 Exposición y distancias de seguridad para los sistemas de diatermia terapéutica**

##### **Exposición del paciente**

Estos aparatos son capaces de generar niveles de radiación lo suficientemente altos para causar preocupación respecto de la seguridad de las gonadas y en el caso de pacientes gestantes del feto y el uso inadecuado de los mismos puede conducir a quemaduras y escaldaduras o daños de tejidos profundos u órganos.

##### **Exposición ocupacional**

Siendo que los aplicadores son abiertos puede haber una sobreexposición del staff medico por lo cual se debe mantener una estricta adherencia a las instrucciones de seguridad.

##### **Distancias de seguridad**

En onda corta se recomienda que el operador debe mantener una distancia mínima de 2m de los electrodos para aplicador tipo capacitivo y onda continua, 1.5 m para aplicador tipo capacitivo y onda pulsante, 1 m para aplicador tipo inductivo y 1 m de los cables cuando el equipo esta en operación.

En microondas se recomienda que el operador mantenga una distancia mínima de 2 m con respecto al aplicador y se debe evitar que el trabajador se acerque a grandes objetos metálicos que podrían reflejar los campos.

En ambos casos de superarse los límites recomendados se recomienda la limitación del tiempo cerca al equipo.

Para una definición más exacta de las distancias y tiempos de seguridad debe realizarse una evaluación del ambiente de trabajo.





## II. LA DIATERMIA QUIRÚRGICA

### II.1 Principio de funcionamiento, interacciones y efectos biológicos

La diatermia quirúrgica o electro cirugía es la aplicación de electricidad por medio de radiofrecuencia sobre un tejido para obtener un efecto clínico deseado, principalmente, cortar el tejido. Esta electricidad genera calor en el mismo tejido, es decir, no es necesario aplicar calor desde una fuente externa para calentar el tejido sino que la electricidad hace que el tejido se caliente debido a su propia impedancia. Este método presenta una gran ventaja y es que el paciente sangra en mucha menor cantidad que en las cirugías donde se utilizan instrumentos cortantes tradicionales, implica menor duración de las cirugías y facilidades para el médico que al mantener limpia el área de trabajo puede realizar el procedimiento con mayor facilidad. En la electrocirugía se utiliza corriente alterna y el paciente se incluye en el circuito, es decir, la corriente ingresa en el cuerpo.



Fig. 7 Operación con electrocirugía

Es un procedimiento ampliamente utilizado en procesos quirúrgicos, basado en el uso de corrientes eléctricas suministradas mediante electrodos adecuados al trabajo a realizar (electro sección, electrocoagulación, electro desecación, electro fulguración). Se basa en el principio de que una corriente eléctrica que fluye por el cuerpo para radiofrecuencias genera calor. La frecuencia de estos dispositivos varía entre los 0.2MHz y los 3.3MHz. en comparación con los 60Hz de frecuencia que posee la electricidad normal de la red eléctrica comercial.





El paso de corriente a través del cuerpo es altamente riesgoso, ya que la fibrilación ventricular se puede dar con corrientes de 50 a 500mA a frecuencias de 50 a 60Hz. Sin embargo, en el rango de las radiofrecuencias, el sistema nervioso y muscular es menos sensible al flujo de la corriente, por lo que la utilización de electrocirugía es de gran utilidad ya que se pueden realizar las operaciones necesarias (corte, coagulación y otras) en el tejido de acuerdo con las necesidades médicas sin crear un shock eléctrico.

Los equipos de electrocirugía aprovechan del calor generado por la disipación de la corriente, de manera que pueda ser utilizado para fines terapéuticos o de tratamiento clínico. El calentamiento del tejido con radiofrecuencia se puede dar por medio de dos mecanismos: calentamiento ohmico o calentamiento dieléctrico. El calentamiento óhmico, producido a menos de 500MHz incrementa el movimiento traslacional mediante conducción iónica de las partículas. El calentamiento dieléctrico producido a más de 500MHz, básicamente se da para moléculas polares como el agua e incrementa el movimiento vibratorio y rotacional de las partículas.

Cuando un campo eléctrico es aplicado sobre la materia, los dipolos absorben parte de la energía del campo y la otra parte es disipada en la impedancia del cuerpo (calentamiento óhmico). El calentamiento óhmico es el mecanismo utilizado por los dispositivos de electrocirugía mientras que el calentamiento dieléctrico es el utilizado por los hornos microondas.

Se debe tener presente que la corriente que fluye en uno de los electrodos debe ser igual a la corriente que fluye en el otro electrodo. Por lo tanto debido a que el electrodo activo tiene un área de sección transversal muy pequeña, la densidad de corriente es muy alta. Debido a la diferencia de densidad de corriente entre los dos electrodos, el tejido en contacto con el electrodo de dispersión se calienta lentamente mientras que el que está en contacto con el electrodo activo se calienta hasta destruirse.

Si el calentamiento fuera lento y débil el calor producido provocará la evaporación del agua y la disminución del volumen celular, constituyendo el efecto terapéutico de coagulación; Por otro lado si el calentamiento fuera rápido y fuerte ocurrirá una explosión de la membrana celular, constituyendo el efecto terapéutico de corte.

La electrocirugía se puede utilizar como técnica de incisión, como técnica de afeitado que producen el retiro del parcial grueso de lesiones superficiales, y para quitar lesiones vasculares como hemangiomas o granulomas piógenos, la energía de la salida determina el efecto deseado (destrucción, coagulación o corte. Un angioma de hasta 1 cm. aproximadamente puede ser electrocoagulado ligeramente.

Angiomas mayores a una cereza pueden ser más fáciles de tratar afeitándolos primero, después electrocoagulando o disecando la base. La porción elevada de un granuloma piógeno se puede afeitar con un scalpelo o un electrodo del lazo usando una corriente de corte/coagulación. La base de la lesión se curetea para quitar el tejido fino restante y después se electrodiseca. Las complicaciones tales como quemaduras, choques y transmisión de infecciones se pueden prevenir por el uso cuidadoso y el mantenimiento adecuado del equipo de electrocirugía.

También existen los dos tipos de sistemas: El monopolar y el bipolar.

Los tipos de ondas utilizados son:



- Corrientes puramente sinusoidales, que producen el efecto terapéutico de corte, con propiedades hemostáticas bajas. Una corriente con potencia de 50 W produce un voltaje aproximado de 1000V.
- Corrientes pulsátiles, que producen el efecto de coagulación. El ciclo de trabajo es un quinto o un décimo de la onda, por lo que para una potencia de 50 W el voltaje generado es 5000 V.
- Corrientes mixtas, en las cuales el ciclo de trabajo es mayor. Para una potencia de 50 W el voltaje es de alrededor de 2000 V.

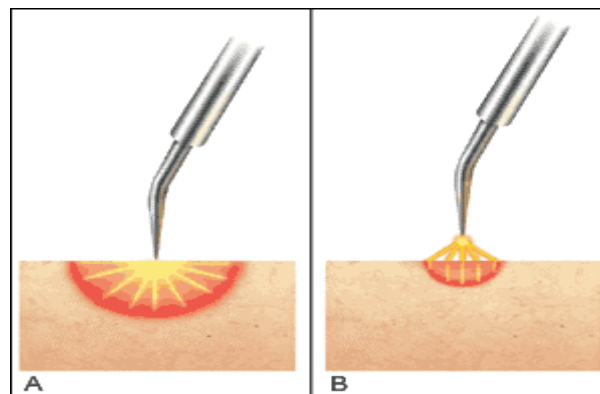


Fig. 8 Electrodesecación

## II.2 Aplicaciones

La electrocirugía ha permitido realizar un gran número de procedimientos médicos ya existentes de una forma más rápida y segura y ha permitido realizar procedimientos que hasta el momento eran de cierta forma imposibles por la dificultad en el acceso a un tejido determinado.

Alguna de estas aplicaciones son:

- Ablación de tumores en el hígado: permite realizar la ablación del tumor causando el menor daño posible al parénquima hepático, lo que presenta una ventaja debido a que en el hígado, solo un 15% de los tumores pueden ser extirpados. La destrucción del tumor se hace mediante la aplicación de una corriente alterna de alta frecuencia originada de un dispositivo de electrocirugía y que va hacia el electrodo dispersivo, que actúa como una resistencia y convierte la corriente eléctrica en calor lo que hace que se deseque el tejido del tumor. Sin embargo, esta técnica se ve limitada espacialmente ya que la efectividad del tratamiento solo se aplica para tumores a ubicados a una distancia máxima de 2cm del electrodo.
- Tratamientos de la Piel: la electrocirugía puede ser utilizada para remover lesiones en la piel tanto superficiales como vasculares y más importante aún, para remover tumores en la superficie de la piel.
- Procedimientos quirúrgicos de histeroscopia en la cavidad uterina
- Cortar tejido y coagular durante operaciones abiertas.
- Sellar vasos sanguíneos.
- Cirugía máximo-facial para evitar el sangrado excesivo y realizar cortes precisos.
- Cortes de próstata a través de la uretra, y en general procedimientos donde los métodos de corte mecánico son difíciles de aplicar.



### II.3 Equipamiento

- Generador electroquirúrgico de radio frecuencia: Es la fuente de la corriente de electrones y el voltaje.
- Una estructura de alimentación que interconecta al generador con los electrodos
- Electrodo activo: Tiene un área de sección transversal muy pequeña. Está diseñado en forma de herramienta para que pueda ser manipulado por el cirujano.
- Electrodo de retorno del paciente: Su función es remover corrientes desde el paciente de manera segura. El calor debe ser disipado por el tamaño y la conductividad del electrodo. Generalmente es una superficie metálica pero actualmente se está reemplazando por un electrodo adhesivo desechable.



Fig. 9 Equipo de electrocirugía

### II.4 Ejemplo de equipamiento comercial

- Equipo para Electrocirugía General, con 250 watts de potencia en corte y 140 watts en coagulación.
- Apto para prácticamente todo tipo de cirugía a cielo abierto, endoscópicas y laparoscópicas.\*
- Control de funcionamiento en base a un microprocesador de alto poder. Su generador a mosfet de potencia, permite su utilización aún en condiciones severas.
- Fabricado según normas internacionales IEC-601, argentinas IRAM 4220 y específicas para electrobisturías IEC, asegura al profesional la máxima confiabilidad, continuidad de prestaciones y seguridad en el uso.
- Control de potencia por potenciómetros continuos.
- Activación por pedal doble (antiexplosivo y estanco) o por mango portaelectrodos.
- Siete tipos de corrientes: corte puro, tres cortes con hemóstasis (blend), coagulación normal, coagulación spray, bipolar.
- Control independiente de la potencia en bipolar.
- Se provee de serie con mango monopolar con controles, monopolar sin controles, juego de puntas, pinza bipolar, placa paciente reusable de acero inoxidable con cable, pedal doble antiexplosivo y



estanco, manual de uso, manual técnico en diskette, certificado para cada equipo de cumplimiento de normas de seguridad IEC 601, (electrodos LEEP opcionales).

## II.2 Exposición ocupacional y recomendaciones de seguridad para la diatermia quirúrgica

Para diatermia quirúrgica (electrocirugía) también se utilizan electrodos no aislados y los campos son relativamente intensos por lo que se debe poner especial atención para cumplir con los límites de exposición ocupacional. La exposición de la mano siempre existe, pero también otras áreas del cuerpo como resultado del contacto con cables p. ej. la cabeza o el torso. El cirujano usualmente está expuesto a un campo eléctrico no homogéneo.

Los objetos metálicos en el teatro de operaciones influyen en la distribución espacial del campo E. El nivel de exposición del staff de salud puede cambiar en el de 2 a 3 veces como consecuencia de cambios de ubicación de dichos objetos.

En el peor de los casos (uso de un electrodo monopolar y cables no aislados con aproximadamente 100-150 W de potencia) la mano del cirujano puede estar expuesta a campos que exceden los 1000 V/m mientras la cabeza y el torso a campos de solamente del orden de 10 V/m.

Cuando los cables tocan el torso del cirujano la exposición del torso es más fuerte pudiendo alcanzar la exposición de la mano que sostiene el electrodo. El campo magnético usualmente está por debajo de 1 A/m (el límite ocupacional varía entre 0.32 hasta 6.4 A/m) para distancias de 5-10 cm de los electrodos y cables, por lo que se podría estar sobrepasando los límites. Los niveles y formas de onda dependen del modo de operación de los dispositivos de electrocirugía.

La ejecución de electrocirugía mediante uso de arco eléctrico producido por un electrodo activo da lugar a un incremento significativo de del campo eléctrico que afecta al staff. el nivel de exposición durante cirugía de arco puede ser 4 veces más alto en comparación con la operación sin arco visible.

Como resultado la exposición a campo eléctrico y acoplamiento capacitivo entre dispositivos de electrocirugía y el cuerpo del trabajador fluye en el cuerpo del trabajador de manera similar a las corrientes que penetran en los tejidos del paciente.

En consideración de la necesidad de sostener el electrodo activo en la mano del cirujano no es posible una completa eliminación de la exposición del cirujano, en el caso de otras personas del staff es relativamente débil si no tienen contacto con los cables. Por lo tanto la reducción de la exposición de los trabajadores puede obtenerse cuando la disposición de los cables que alimentan el electrodo monopolar es la apropiada (p. ej. Cuando los cables se mantienen entre el generador y la mano del cirujano sin contactar en el cuerpo de algún trabajador) . Se avizora una reducción radical del nivel de exposición a los CEM si se podría aplicar el uso de electrodo bipolar a alguna intervención quirúrgica en particular, por lo que se recomienda mantener la mayor distancia posible del cable.

La exposición ocupacional por diatermia quirúrgica no reviste mayores peligros sin embargo se recomienda que los fabricantes de aparatos de diatermia deban indicar las distancias mínimas seguras y direcciones que deben mantenerse por los terapeutas, aunque el cirujano generalmente no puede mantener distancias seguras. Se recomienda como distancia segura de aparatos aquella en la cual el valor la densidad de potencia es menor a 5.0 mW/cm<sup>2</sup> (137 Voltios/m).



Tener presente las siguientes recomendaciones:

- Alinear adecuadamente el aplicador. Una alineación diferente puede provocar campos de fuga que pueden afectar al operador.
- Asegurarse que el paciente se haya retirado todos los objetos metálicos (anillos, relojes, anteojos, etc.).
- Asegurarse que el cable coaxial este correctamente conectado a la maquina y al aplicador.
- No dejar caer el aplicador o el cable sobre superficies metálicas.
- No dirigir el aplicador hacia las unidades de control.
- Tener cuidado a la hora de operar el aplicador ( el daño de las mismas puede resultar en una alteración de su propiedades direccionales.

### III. HIPERTERMIA

La hipertermia es una técnica de tratamiento de tumores cancerigenos cuyo objetivo es incrementar la temperatura en el volumen del tumor por encima de 43°C.

Para ello el sistema trabaja con un arreglo de antenas que forman un haz muy directivo debido a la suma coherente de los campos individuales de las antenas sobre el volumen del tumor y de manera incoherente en los tejidos adyacentes.

A la temperatura de 43°C durante 1 hora conduce a la muerte del 20 a 50 % de las células comparable a una dosis única de 2 Gy. No se observa muerte celular significativa a 42 ° C aún después de horas de exposición. El cerebro es el órgano más sensible a las temperaturas elevadas (40.5 a 41 ° C como máximo).

Para la hipertermia de cuerpo entero se podría tolerar temperaturas de hasta 42° C. Para elevación local de temperatura la tolerancia de los tejidos normales es hasta 44 ° C. Para la hipertermia se utilizan Tasas de Absorción Especifica (SAR) de hasta 100 W/kg con el objetivo de lograr la elevación de la temperatura sobre el tejido tumoral, el valor límite ICNIRP es 0.4 W/kg para exposición

La exposición laboral por tratamiento con hipertermia no reviste mayor peligro; pero en el caso de los pacientes tiene que haber un control estricto para no afectar órganos no objetivos.

Se considera como distancia mínima de seguridad 1 m, de ser necesario limitar el tiempo de exposición

### III. RESONANCIA MAGNÉTICA

La imaginología por resonancia magnética es una técnica de diagnostico médico por imaginología en la cual:

- Se introduce al paciente en un campo magnético creado por un gran imán para alinear los protones del cuerpo humano con dicho campo
- Mediante la aplicación de campos magnéticos de radiofrecuencia se consigue la resonancia de los núcleos de los átomos del cuerpo recogiendo la energía liberada en forma de señal cuando cesa el campo de radiofrecuencia que tratada adecuadamente se transforma en imagen topográfica.
- Las imágenes digitales son obtenidas gracias a la asociación de tres tipos de campos electromagnéticos a los cuales se expone al paciente a:
  - Un campo magnético estático ( $B_0$ )



- Un campo magnético variable en el espacio (gradiente de campo magnético)
- un campo electromagnético de radiofrecuencia ( $B_1$ )

El campo estático orienta los núcleos de hidrogeno o los protones del cuerpo del paciente paralelamente a las líneas del campo. Dicho campo puede ser generado por un imán permanente (material paramagnético) o resistivo (electro-imán) . Los modelos mas recientes generan campos del orden de 3 teslas (T) gracias a materiales superconductores refrigerados con helio.

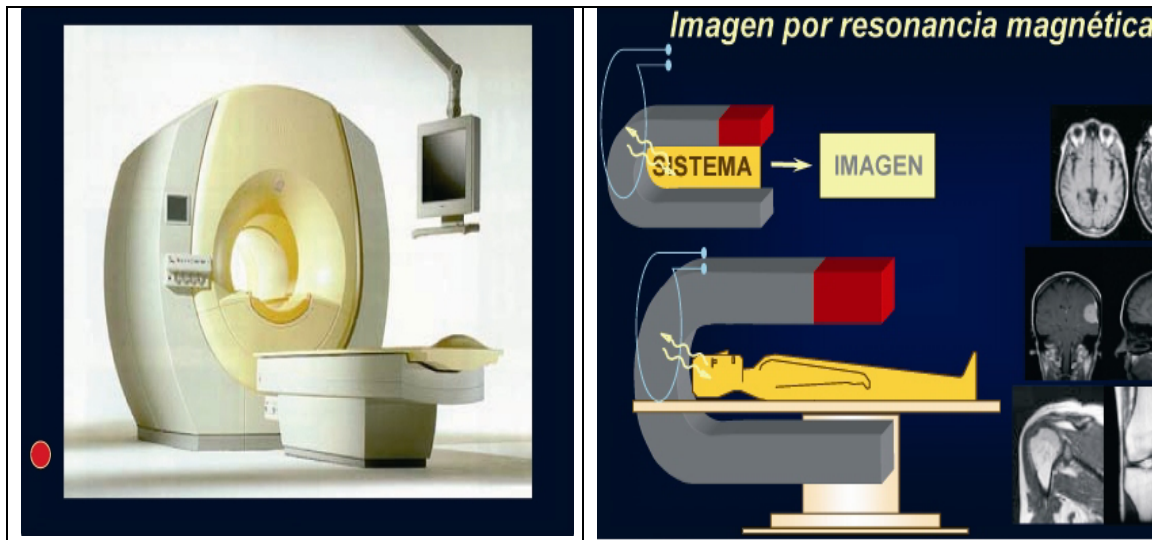


Fig. 10 Magneto, su representación esquemática y sus imágenes

Los efectos biológicos y las limitaciones que plantean dependen del tipo de campo

Tabla 1. Efectos de los campos de la IRM

Tipo de Campo	Limitación física en la exposición humana
Campo estático $B_0$	Desconocida
Radiofrecuencia $B_1$	Calentamiento del tejido
Gradiente de encendido	Estimulación nerviosa

### III. 1 Campo magnético estático $B_0$

Aunque la Directiva no impone un límite de exposición per se, los trabajadores que se mueven en el gradiente espacial variable del campo estático cerca del escáner experimentarían un campo variable en el tiempo de baja frecuencia (típicamente algunos Hz, lo que induciría campos eléctricos y como resultado una densidad de corriente dentro del cuerpo. Ya que el campo magnético  $B_0$  está activo constantemente





los ingenieros de servicio, las enfermeras que atienden a los pacientes, el personal de limpieza y los radiólogos también estarán expuestos a estos campos.

### Interacciones con las personas

- Efecto proyectil
- Magnetofosfenos
- Vértigo y náuseas
- Sabor metálico
- Efectos sobre los implantes

### Recomendaciones internacionales sobre límites de exposición

Tabla 2. Recomendaciones de Límites de Exposición a Campos Magnéticos Estáticos- ICNIRP 1994

	Ocupacional	Público en general
Promedio diario ponderado en el tiempo	200 mT	
Cuerpo entero	2 T	40 mT
Extremidades	5 T	

Tabla 3. Recomendaciones de Límites de Exposición a Campos Magnéticos Estáticos- ICNIRP 2009

	Ocupacional	Publico en general
Cabeza y tronco	2 T	
Extremidades	8 T	
Cualquier parte del cuerpo		400 mT

- ICNIRP recomienda que estos límites deberían ser entendidos como límites de exposición pico espaciales.
- Para aplicaciones ocupacionales específicas, exposiciones hasta 8T pueden ser justificadas si el ambiente es controlado y las prácticas de trabajo apropiadas son palicadas para controlar los efectos de la inducción por movimiento.
- No hay suficiente información disponible sobre la cual basar los límites de exposición por encima de 8 T.
- Debido a los potenciales efectos adversos, ICNIRP reconoce que se necesitan implementar políticas prácticas para implementar exposición dañina inadvertida de las personas con dispositivos médicos electrónicos implantados e implantes con contenido de material ferromagnético y los peligros de objetos voladores que pueden dar lugar a niveles de restricción menores tales como 0.5 mT



### Monitoreo de exposición ocupacional $B_0$

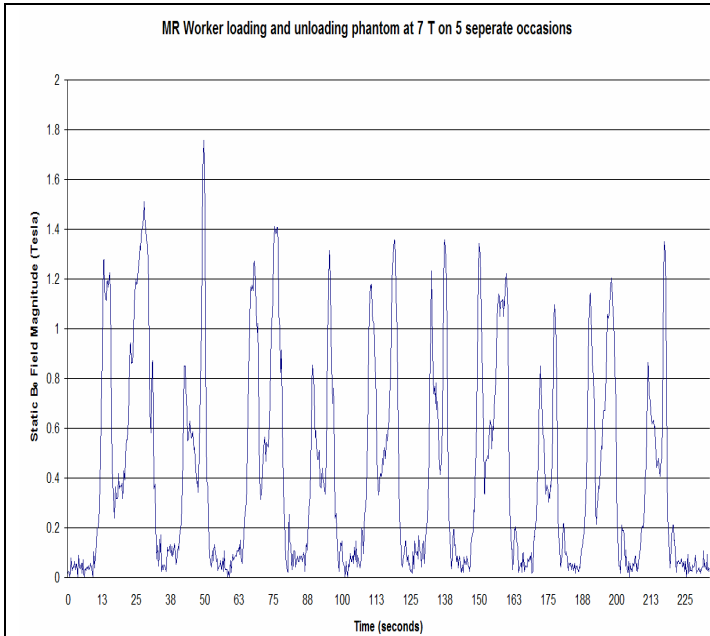


Fig. 11 Cargado y descargado de fantoma durante 5 ocasiones en campo magnético de 7 Tesla (Universidad de Nottingham- Reino Unido)

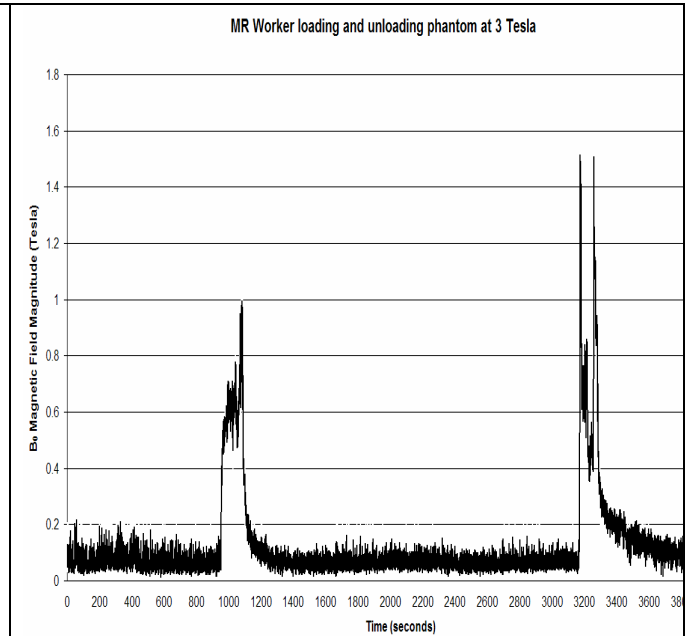


Fig. 12 Cargado de voluntario en un campo magnético de 3 Tesla de un escaner de IRM (Universidad de Nottingham- Reino Unido)

### III. 2 Gradientes de campo magnético

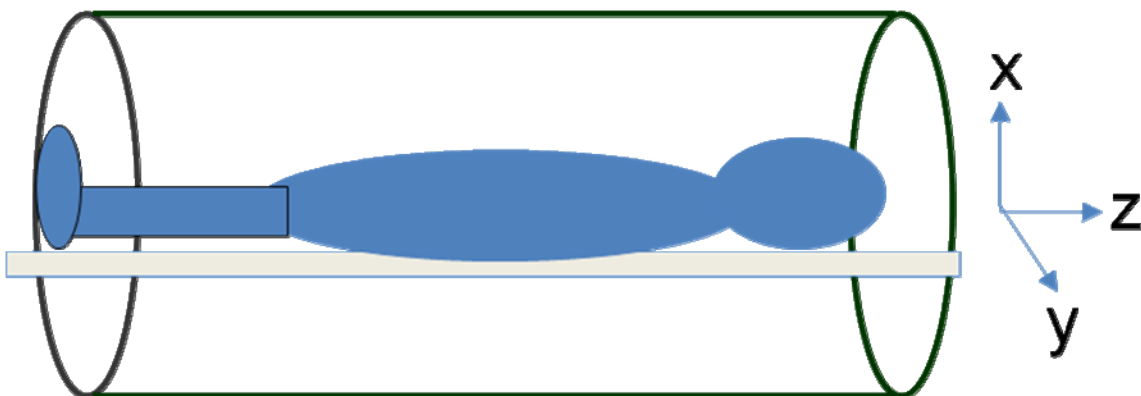


Fig. 13 Gradientes de campo magnético

Es necesario aplicar un campo magnético que varía según el eje  $z$  (gradiente  $B_z$ ), para poder escanear el cuerpo. Este campo a su vez genera otros campos  $B_x$  y  $B_y$ .

#### Efectos de los gradientes de campo & SNP

-  $B_x$  y  $B_y$  son conocidos como campos concomitantes .



- La gradiente deseada o gradientes concomitantes pueden dar origen a la Estimulación Nerviosa Periférica (SNP).

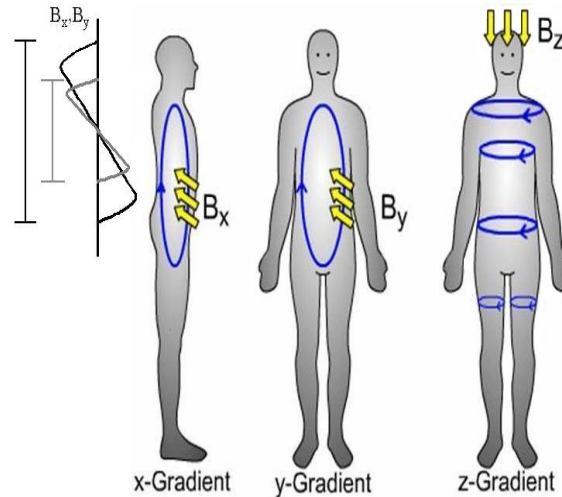


Fig. 14 Los tres gradientes de campo magnético

De acuerdo a la Ley de Faraday o Ley de Inducción se producen campos eléctricos inducidos en los cuerpos conductores proporcionales a  $dB/dt$ .

$$fem = \frac{d\phi}{dt}$$

Estimulación nerviosa = sensación, espasmos musculares

### Límites de exposición

Los valores dados en la directiva para el límite de exposición asume la exposición a campo eléctrico o magnético con variación sinusoidal de la amplitud, sin embargo los gradientes de campo son secuencias pulsantes no sinusoidales complejas.

Tabla 4 Límites de Exposición para Gradientes de Campo Magnético - Directiva 2004/40/EC

Frecuencia (Hz)	Densidad de corriente RMS ( $\text{mA}/\text{m}^2$ ) (en tejidos del sistema nervioso promediados sobre $1 \text{ cm}^2$ normal a a la dirección de flujo de la corriente)
< 1	40
1-4	$40/f$
$4 \cdot 10^3$	10
$10^3 \cdot 10^6$	$f/100$



Estos límites implican un límites para la tasa de cambio del campo de 0.22 T/s hasta la frecuencia de 1 kHz y luego se incrementa como función de la frecuencia

Tabla 5 Valores de acción para Gradientes de Campo Magnético- Directiva 2004/40/EC

Rango de frecuencia	Intensidad de Campo Magnético H (A/m)	Densidad de Flujo de Campo Magnético B ( $\mu$ T)
8-25 Hz	$20 \times 10^3 / f$	$25 \times 10^3 / f$
0.025 -0.820 kHz	$20 / f$	$25 / f$
0.820 kHz -65 kHz	24.4	30.7

1. f en la frecuencia señalada en la columna del rango de frecuencias

### Ruido acústico

Las alteraciones rápidas de los gradientes de las bobinas producen fuerzas de Lorentz que generan vibraciones de audio-frecuencia, produciendo sonidos muy fuertes.

-La protección de los oídos es recomendado a los pacientes cuando los niveles de ruido exceden los 80 dB.

- Es mandatorio usar siempre protección cuando los niveles son mayores a 85 dB.

- Los tapones de oídos y otros protectores reducen la intensidad del ruido alrededor de 30 dB.

- La pérdida transitoria del oído puede ocurrir a >100 dB.

- 120 – 130 dB pueden causar daños internos al oído requiriendo varias semanas de recuperación.

### III. 3 Campos de radiofrecuencia

Sistemas IRM

1.5 Tesla = 64 MHz

3.0 Tesla = 128 MHz

7.0 Tesla = 298 MHz

### Efectos de los campos de radiofrecuencia

Exposición de cuerpo completo – no se esperan efectos adversos si la temperatura corporal sube hasta 1°. El calentamiento no es dañino en áreas exteriores de la superficie corporal– se enfrían rápidamente. El calentamiento puede afectar seriamente áreas de bajo flujo sanguíneo (ojos, centro del cerebro).

La energía (RF > 10 MHz) depositada en el cuerpo durante procedimientos RM se convierte en calor .El calor puede ser distribuido a través del flujo sanguíneo. Algunas partes del cuerpo tienen baja concentración sanguínea = problemas para liberar este calor.



En EE.UU. se han reportado más de 30 incidentes por excesivo calentamiento han sido reportados en pacientes bajo procedimientos de IRM.

Contacto directo con las bobinas de los campos de radiofrecuencia (RF) u otras bobinas de transmisión de RF de los sistemas de IRM.

### Límites de exposición para campos de radiofrecuencia

Tabla 6 Límites de exposición para campos mayores a 10 MHz

SAR de cuerpo completo	$2 - 4 \text{ Wkg}^{-1}$ , $> 4 \text{ Wkg}^{-1}$ tiempo limitado
SAR de cabeza	Depende del peso corporal
SAR de cuerpo parcial	Depende del peso corporal

### III.4 Exposiciones de trabajadores proveniente de equipos IRM

La exposición a radiaciones no ionizantes de la imaginología por resonancia magnética tiende a hacerse cada vez mayor debido a la necesidad de mayor sensibilidad de los equipos para mejorar el diagnóstico, lo cual a su vez implica un incremento de los campos  $B_0$ .

La resonancia magnética intervencional es muy requerida en la actualidad para el apoyo de las cirugías por lo que la exposición del cirujano es una preocupación constante.



Fig. 15 Resonancia magnética intervencional



La decisión de la Unión Europea de hacer de cumplimiento forzoso las Recomendaciones ICNIRP para la exposición ocupacional de trabajadores a los campos electromagnéticos (Directiva EU 2004/40/EC), llevo a los expertos de IRM a afirmar que la directiva innecesariamente restringiría los actuales y futuros desarrollos en le campo de la tecnología de IRM y en los procedimientos médicos e intervenciones llevadas acabo con usando equipos de IRM.

Como resultado la Unión Europea encargo el Estudio “Una investigación sobre la Exposición Ocupacional a Campos Electromagnéticos para Personal Trabajando en y alrededor de Equipos de Imaginología por Resonancia Magnética Médica” el cual dio como resultado el EC Report, VT/2007/017

### **A. Reporte EC VT/2007/017**

#### Hipótesis

Los efectos agudos provenientes de los sistemas de IRM podrían ser:

- La estimulación nerviosa producida por las corrientes de baja frecuencia causadas por los gradientes de campo y los movimientos en los campos estáticos.
- El daño térmico de los tejidos producto de la exposición a los campos de radiofrecuencia. La Directiva EU 2004/40/EC) esta destinada a proteger a los trabajadores de los efectos agudos.

#### Resultados

- Las corrientes producidas por los gradientes de campo magnético en la mayoría de sistemas analizados excedían significativamente las restricciones básicas ICNIRP ( $10 \text{ mA/m}^2$  a 1kHz) para todos los tejidos del cuerpo así como para los tejidos nerviosos llegando al orden de  $220 \text{ mA/m}^2$  tanto para cirujanos, tecnólogos y en general una persona parada en la entrada del bore del solenoide. También se excedían los gradientes que deberían tener un máximo de 0.22 T/s hasta 1 kHz llegando a 11.6 T/s
- También en el caso de movimiento en los campos estáticos también se exceden los límites llegando a  $330 \text{ mA/m}^2$
- En el caso de la exposición a radiofrecuencia el SAR para trabajadores generalmente esta por debajo de los límites de exposición

### **B. Reporte de Investigación de HSE**

#### Descripción

Investigaciones Numéricas usando los modelos matemáticos HPA (NORMAN/NAOMI)

Estudio de corrientes inducidas en trabajadores que se mueven cerca del magneto que genera el campo magnético  $B_0$

Exposición de los trabajadores a los gradientes de campos pulsantes de la bobinas de escaneo

Los resultados fueron comparados con IEEE, ICNIRP and EC/40/2004

#### Resultados

##### a) Movimiento dentro de un campo estático

Las corrientes inducidas calculadas para el movimiento a 1m/s (3.6 km/h) dentro de campos cercanos a magnetos de 1.5 a 7 T están por debajo de las restricciones básicas ICNIRP entre 0.5 y 1 m del alojamiento del magneto. Un movimiento más rápido induce corrientes más elevadas.





#### Gradientes de campo magnético

Los trabajadores deberán permanecer a distancias  $\sim >1$  m axialmente alejados de los extremos de las bobinas de gradientes para permanecer dentro de los valores de las recomendaciones

#### IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La diatermia rehabilitante y quirúrgica y la hipertermia no plantean mayores riesgos ocupacionales. En el caso de la resonancia magnética hay una serie de posibles efectos que son materia de investigación como:

- El efecto proyectil que exige protocolos muy estrictos para poderse evitar.
- Los efectos de vértigo y vómito sobre los cirujanos que utilizan IRM intervencional podría afectar el trabajo de los mismos
- Los efectos del movimiento en los campos magnéticos y de los gradientes de campo magnético pueden sobrepasar las restricciones básicas existiendo la posibilidad de afectación del sistema nervioso central y periférico
- Las áreas potenciales de preocupación para la IRM
  - Unidades con  $B_0$  altos
  - Prácticas de Imaginología por Resonancia Magnética Intervencional
  - Exposición femenina en estado de gravidez
- Se recomienda la realización de una evaluación nacional de los sistemas de resonancia magnética y otras aplicaciones médicas que generan RNI
- Se recomienda el entrenamiento del personal para comprender cuando se generan situaciones de exposiciones pico y como minimizar la exposición
- Desarrollar procedimientos de evaluación estándares así como mejorar las técnicas de evaluación incluyendo instrumentos de medición.