

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**ANÁLISIS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE RESONANCIA
MÁGNÉTICA PARA APLICACIONES MÉDICAS Y ANÁLISIS DEL CAMPO
MAGNÉTICO ESTÁTICO GENERADO POR EL IMÁN DEL RESONADOR
MAGNÉTICO**

**INFORME DE SUFICIENCIA
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO ELECTRÓNICO**

**PRESENTADO POR:
WILBER LEONEL MEZA AGUIRRE**

**PROMOCIÓN
1991-I**

**LIMA-PERÚ
2009**

**ANÁLISIS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE RESONANCIA
MAGNÉTICA PARA APLICACIONES MÉDICAS Y ANÁLISIS DEL CAMPO
MAGNÉTICO ESTÁTICO GENERADO POR EL IMÁN DEL RESONADOR MAGNÉTICO**

Dedicado a mis padres quienes forjaron mi educación.

A mi esposa que con su paciencia me permitió

Culminar esta importante etapa de mi vida.

A mis hijos con el amor que les tengo
al ofrecerles este esfuerzo como enseñanza

SUMARIO

El presente informe de suficiencia muestra los criterios empleados en el diseño e implementación de un proyecto de resonancia magnética, donde la calidad de imagen que representa el fin de las aplicaciones de esta tecnología, viene condicionada por diversos factores limitantes como son: una adecuada selección del lugar donde se implementará el proyecto de resonancia, una adecuada instalación del blindaje de radiofrecuencia (RF), factores climatológicos, interferencias electromagnéticas externas y costo de operación.

Asimismo, describe las dos consideraciones más importantes en la planificación de un proyecto de instalación cuando se selecciona el lugar donde se montará el equipo de Resonancia Magnética y son: El campo de borde y la necesidad de que el edificio se encuentre libre del ruido eléctrico de RF.

Dentro del informe podemos ver con mucho detalle toda la planificación para un adecuado montaje del blindaje de radiofrecuencia, pues es justamente en este punto donde se centra la parte previa más importante para la instalación de un Resonador. Cualquier error en su instalación, mal diseño o mala planificación traería consigo por consiguiente problemas técnicos del equipo que sólo serían corregidos con una fuerte inversión adicional que representa sobre costos al proyecto de instalación del resonador.

ÍNDICE

SUMARIO

INTRODUCCION	1
CAPITULO I MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	3
1.1 Principios Físicos de la Resonancia Magnética	3
1.2 Formación de Imágenes por Resonancia Magnética.....	4
1.3 Subsistemas de Resonadores Magnéticos.....	5
1.3.1 El Magneto	7
1.3.2 El Sistema de Gradientes.....	9
1.3.3 Bobinas de Radiofrecuencia	10
1.3.4 Sistema de Control y Adquisición.....	13
1.3.5 Sistema de Reconstrucción.....	13
1.3.6 Computadora Central, Visualización, Almacenamiento e Impresión.....	13
1.3.7 Blindaje Magnético	14
1.3.8 Blindaje de Radiofrecuencia.....	15
1.3.9 Resumen	16
CAPITULO II IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE RESONANCIA MAGNÉTICA ...	17
2.1 Justificación del Informe	17
2.2 Plan de Equipamiento	18
2.2.1 Homogeneidad del Campo Magnético	18
2.2.2 Ruido Inducido Por Fuerzas Vibracionales	22
2.2.3 Distribución del Equipo.....	23
2.2.4 Blindaje.....	25
2.2.5 Detalles del Equipo	39
2.3 Requerimientos de Radiofrecuencia	42
2.3.1 Efectividad del Blindaje RF	42
2.3.2 Material de Blindaje RF	43
2.3.3 Condiciones Ambientales.....	44
2.4 Plan Eléctrico	45
2.5 Resumen	46
CAPITULO III EQUIPOS COMERCIALES Y ANÁLISIS DE COSTOS.....	47
3.1 Equipos Comerciales	47

3.2	Análisis de Costos.....	50
3.2.1	Estimación del Costo del Resonador Magnético.....	50
3.2.2	Notas Explicatorias.....	51
	Conclusiones y Recomendaciones	53
	Anexo A: Diagrama de Bloques de Resonador Magnético.....	55
	Anexo B: Plano de Distribución de un Resonador Magnético Abierto	57
	Anexo C: Plano de Distribución de un Resonador Magnético Cerrado	59
	Anexo D: Glosario de Términos	63
	BIBLIOGRAFÍA	66

INTRODUCCIÓN

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

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

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

Al principio de los años ochenta comienza la difusión de la RM, que se empieza a imponer en la rutina clínica, primero en los Estados Unidos y después en otros países, de manera que los protocolos de las exploraciones radiológicas cambian mucho más que tras la aparición de las demás técnicas de diagnóstico por imagen.

Más que en el caso de cualquier otra técnica de diagnóstico por imagen, la RM necesita una comprensión mínima de los principios físicos que son necesarios para la realización y, sobre todo, para la interpretación de una exploración.

Dado que la Resonancia Magnética en aplicaciones médicas es una técnica basada en el campo magnético, su comprensión no es fácil pues se debe tener conocimiento de muchos principios físicos. Además la inversión en este tipo de equipamiento es alta por lo que los exámenes de RM son costosos comparados con otras técnicas de imagen.

En el presente informe, en el capítulo I se hace una revisión general de toda la teoría del resonador magnético para aplicaciones médicas. Aquí se describe temas como

los principios físicos de la resonancia magnética, donde se explica el comportamiento atómico del hidrógeno quienes son los protagonistas de esta nueva técnica de formación de imágenes. Así mismo se da una revisión bastante rápida y clara de los conceptos importantes para un buen entendimiento de la Resonancia Magnética. Adicionalmente se revisa al equipo de resonancia magnética y se describe las diferentes partes o subsistemas en los que se compone este equipo. Finalmente se describen los blindajes de radiofrecuencia que requiere una adecuada instalación de estos sistemas de resonancia magnética.

En el capítulo II se desarrolla la justificación del presente informe y se identifica el problema potencial que existe en todo proyecto de instalación de un resonador magnético, y se definen los objetivos. Adicionalmente se desarrolla las diferentes etapas en la que se compone un proyecto de instalación de estos equipos para finalmente hacer un pequeño ejercicio numérico de los costos en los que se incurre cuando se quiere implementar dicho proyecto. Se tiene cuidado de describir paso a paso, los diferentes criterios que se deben de tener en cuenta para una adecuada implementación de la instalación del resonador magnético, teniendo en cuenta que estos equipos son muy sensibles a las perturbaciones de radiofrecuencias externa que podrían provocar los indeseados artefactos en la imagen.

Quiero agradecer a Phillips Peruana S.A. Sistemas Médicos, la empresa donde laboré por más de 10 años y donde completé mi formación en esta importante área de equipamiento médico para el diagnóstico por imágenes.

CAPITULO I

MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

En este capítulo desarrollaremos de una manera simplificada la teoría referente a esta nueva técnica de formación de imágenes para el diagnóstico médico de la resonancia magnética.

1.1 Principios Físicos de la Resonancia Magnética

La RM se basa en la propiedad que representan algunos átomos del organismo con número impar de protones en el núcleo (átomos de hidrogeno, átomos de fósforo, etc) de comportarse como agujas imantadas; al ser sometidas a un campo magnético se alinean con el. Debido a que el cuerpo humano esta fundamentalmente constituido por agua y ésta por átomos de hidrogeno, son estos últimos los que se utilizan en la RM realizada con fines diagnósticos.

En ausencia de un campo magnético los spines o protones de hidrogeno están orientados al azar, describiendo un giro o movimiento de precesión alrededor de su eje, que genera un campo magnético individual y que es neutralizado por los campos producidos por otros protones. Al aplicar un primer campo magnético (campo magnético principal) los protones se van a alinear en la dirección de este campo y van a describir un giro o movimiento de precesión con una frecuencia que dependerá de la intensidad del campo magnético principal y que será diferente en cada instalación de RM, según sea 0.2 Tesla, 1 Tesla, 1.5Tesla, 3Tesla, etc., pero en una posición o fase diferente para cada protón o spin según el tejido en que se encuentre.

Si aplicamos un segundo campo magnético, esta vez perpendicular al principal, creados por ondas de radiofrecuencia de 90° , de la misma frecuencia que de la precesión de los protones, estos van a alinearse en la dirección del nuevo campo y todos los protones van a rotar en la misma posición o fase. Decimos entonces que se excitan o magnetizan. Cuando las ondas de radiofrecuencia dejan de actuar los átomos vuelven a alinearse en la dirección del campo magnético principal y a dejar de estar situados en la misma posición o fase. Decimos entonces que se ha producido una relajación. La relajación conlleva una liberación de energía que podemos recoger en forme de eco o señal.

1.2 Formación de Imágenes por Resonancia Magnética

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

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

Entonces, al campo principal (espacialmente uniforme), se le superpone un segundo campo magnético más débil que varía de posición de forma controlada, creando lo que se conoce como gradiente de campo magnético. En un extremo de la muestra, la potencia del campo magnético graduado es mayor, y se va debilitando con una calibración precisa a medida que se acerca al otro extremo. Dado que la frecuencia de resonancia de los núcleos en un campo magnético externo es proporcional a la intensidad del campo, las distintas partes de la muestra tienen distintas frecuencias de resonancia. Por lo tanto, una frecuencia de resonancia determinada podría asociarse a una posición concreta. Además, la fuerza de la señal de resonancia en cada frecuencia indica el tamaño relativo de los volúmenes que contienen los núcleos en distintas frecuencias y, por tanto, en la posición correspondiente. Las variaciones de las señales se utilizan entonces para representar las posiciones de las moléculas y crear una imagen. La intensidad del elemento de la imagen, o pixel, es proporcional al número de protones contenidos dentro de un volumen elemental, o voxel.

Actualmente, los dispositivos de obtención de imágenes por resonancia magnética utilizan tres conjuntos de bobinas de gradientes electromagnéticos sobre el sujeto para codificar las tres coordenadas espaciales de las señales.

Para formar imágenes por resonancia magnética nuclear es necesario distinguir las componentes de la señal de resonancia nuclear que procede de distintas zonas de la muestra. Para ello se superpone al campo magnético fundamental y homogéneo un gradiente de campo magnético con ayuda de bobinas adicionales por las que circula corriente. De esta forma resulta constante la frecuencia de la resonancia magnética en planos perpendiculares a la dirección del gradiente.

Si se analiza el espectro de la señal de la resonancia nuclear medida, la amplitud espectral de una frecuencia corresponde en cada caso a la aportación a la señal de todos los espines nucleares en un plano perpendicular al gradiente de campo aplicado.

Todo el espectro de resonancia nuclear constituye así la proyección de la densidad de los espines nucleares sobre la dirección del gradiente del campo.

De forma distinta a la tomografía axial computarizada por rayos X, que solamente permite formar imágenes a partir de proyecciones, en la resonancia nuclear formadora de imágenes existen métodos de captación alternativos.

En primer lugar se han de mencionar aquí los métodos planos, caracterizados porque siempre se registra simultáneamente la señal de resonancia nuclear a partir de una capa completa. Además también existen métodos para la exploración por puntos y líneas de un estrato así como métodos de reconstrucción tridimensional, en los que la señal de resonancia nuclear se registra desde todo el objeto, es decir, simultáneamente desde todas las capas examinadas.

Los exámenes de resonancia nuclear en seres vivos tienen fijados unos límites por la relación señal-ruido definitiva. La señal de alta frecuencia inducida por la magnetización nuclear de precesión en la bobina de medición que rodea el objeto sometido a medición se ha de comparar con la tensión de ruido que es provocada por el movimiento térmico de los portadores de cargas en el objeto medido y en la bobina. Se ha de aspirar por lo tanto a un método de medición lo más eficaz posible.

Realmente la máxima sensibilidad se alcanza siempre que se registre la señal procedente de todo el objeto tridimensional. No obstante se ha conseguido aplicar un método que mide sucesivamente estratos paralelos, ya que parece ser más ventajoso tener disponible inmediatamente una imagen después de la medición de un estrato que tener que esperar hasta el final de toda la exploración en que sin embargo se hallarán disponibles todas las tomografías.

1.3 Subsistemas de Resonadores Magnéticos

Un estudio de formación de imágenes por resonancia magnética usa una combinación de un campo magnético estático con variaciones locales de este campo magnético (gradientes de campo magnético) y con pulsos de RF (aplicados por medio de un sistema de generación de pulsos de radiofrecuencia) los que permiten codificar la información espacial del núcleo del tejido del cuerpo humano para generar una señal.

Un sistema receptor RF detecta la energía re-emitida y transporta esta señal a un sistema de computadora para su procesamiento digital y para la visualización de la

imagen en un monitor. Para lograr estas metas, un sistema de formación de imágenes por resonancia magnética debe incluir los siguientes componentes o subsistemas:

- Magneto para la generación de un campo magnético estático.
- Sistema de gradiente de campo magnético, consistente de un amplificador de gradiente y de bobinas de gradiente.
- Amplificador RF y una bobina transmisora RF para la producción de los pulsos para excitar el núcleo.
- Bobina receptora y amplificador RF para detectar la señal re-emitida desde el núcleo (La bobina transmisora y la bobina receptora podrían estar integradas tanto física como electrónicamente).
- Sistema de adquisición y control para el procesamiento de la señal digital, el procesamiento de la imagen y el control de adquisición de datos.
- Equipamiento de fisiología para medir los ciclos respiratorios y electrocardiograma del paciente, necesarios para algunos tipos de exámenes (equipamiento auxiliar).
- Sistema de reconstrucción de imagen.

Consola de operación y visualización para mostrar las imágenes y para el control del ingreso de parámetros de los exámenes y datos del paciente.

- Sistema de almacenamiento.
- Blindaje magnético para minimizar los efectos del campo magnético de borde sobre las áreas circundantes al equipo RM (externas y viceversa).
- Blindaje RF para proteger al sistema de interferencias RF (externas y viceversa).
- Mesa para el paciente, donde se coloca el paciente mientras se le realiza el examen.
- Equipo de monitoreo del paciente para supervisar el estado del paciente durante el examen (equipamiento auxiliar).

En la Figura 1.1 se muestra una vista en perspectiva de una sala de RM.

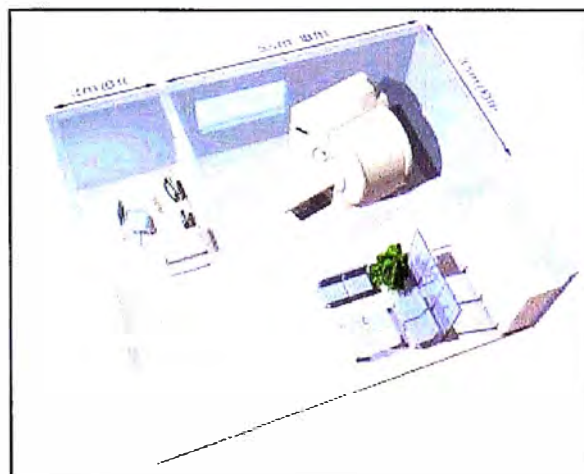


Figura 1.1 Vista en Perspectiva de Sala de Resonancia Magnética (RM)

1.3.1 El Magneto

Este es el componente básico de un sistema de imágenes por resonancia magnética. Al magneto también se le conoce como Imán. La consideración primaria en lo que respecta a la calidad del imán es la homogeneidad o uniformidad de su campo magnético.

Los sistemas de magneto comerciales se encuentran disponibles en el mercado en diversos valores de intensidad de campo, que van actualmente desde 0.01 a 7 tesla. Para comparación: el campo magnético de la tierra varía entre 0.2 y 0.7 gauss (1 gauss es 0.0001 tesla). La elección de la intensidad del campo magnético depende de varios criterios propios de cada centro de imágenes.

Las imágenes del protón generalmente han sido adquiridas con valores de intensidad campo que se encuentran en el rango de 0.4 a 4.0 tesla. Intensidades de campo más altas originan mayores valores de magnetización y por lo tanto señales con mayor potencia, aunque el contraste de la imagen puede disminuir con el incremento de la intensidad de campo.

El uso de magnetos con mayor intensidad de campo ha estado limitado por varias consideraciones. La consideración más importante es la frecuencia de resonancia y además la absorción RF se incrementa con el incremento de la intensidad de campo. Como resultado se mejora la relación señal-ruido generado por la mayor intensidad de campo que es compensado por pérdidas debido a la atenuación RF en el cuerpo. Además, los altos niveles de energía RF requeridos para la operación en intensidades de campos altos pueden, en algunas circunstancias, exceder los lineamientos de corriente para pérdida de potencia en el paciente.

En adición a la intensidad de campo magnético, la homogeneidad del campo magnético (la medida del campo uniforme dentro del área de medición del magneto) es un parámetro importante en el sistema del magneto. La homogeneidad del campo óptima es crucial para la generación de imágenes libres de distorsión y con el máximo posible de relación señal-ruido.

La homogeneidad debe ser lograda sobre un volumen sustancial. En la práctica, es común especificar la homogeneidad del campo de aproximadamente 2 ppm sobre 25 cm de volumen esférico localizado en el isocentro del sistema de magneto, o aproximadamente 5 ppm sobre el tamaño del cuerpo.

Tres tipos de magnetos pueden ser destacados: magnetos resistivos, magnetos permanentes y magnetos superconductores.

a. Magnetos Resistivos

Consisten de bobinas a través de las cuales fluye una gran cantidad de corriente eléctrica, creando así un campo magnético. Sin embargo la combinación de una intensidad de campo constante y de alta homogeneidad es difícil de encontrar.

b. Magnetos Permanentes

No necesitan una fuente de alimentación para crear un campo magnético. pero solo son usados con una intensidad máxima de campo de 0.3T. Estos sistemas son estables sólo si la temperatura esta muy bien controlada. Además, los magnetos permanentes son muy pesados, a mayor intensidad de campo corresponde un mayor peso. Los costos iniciales y de operación durante su funcionamiento (determinados por los costos del equipo de aire acondicionado) pueden ser relativamente bajos.

c. Magnetos Superconductores

Son los más habituales. Se basan en el fenómeno de la supraconducción o particularidad que poseen algunas aleaciones metálicas (por ejemplo niobio-titanio) de presentar una resistencia eléctrica nula a temperaturas próximas al cero absoluto (del orden de -269°C o 4°Kelvin). Son usados para intensidades de campo magnético mayores. Tienen sus bobinas sumergidas en fluidos criogénicos (helio líquido). Algunas veces nitrógeno líquido rodea el reservorio de helio líquido. Tanto el nitrógeno como el helio se evaporaran lentamente por lo que deberán de ser rellenados regularmente.

A la temperatura del helio líquido, el devanado de la bobina se vuelve superconductor, por lo que una vez que una corriente inductiva ha sido introducida en la bobinas del magneto, el sistema puede ser desconectado de la fuente de poder o alimentación externa, mientras la corriente se mantiene en el tiempo así como el campo magnético.

Este diseño proporciona una excelente estabilidad y homogeneidad del campo. Después de fabricado, el magneto debe de ser homogenizado (shimmed) colocando piezas de hierro dentro del túnel del magneto o imán (Homogenización pasiva del campo magnético) para optimizar la homogeneidad.

Los nuevos equipos pueden también incorporar un software que permite una homogenización dinámica del campo de visión, el cual permite un ajuste de la homogeneidad del campo a través de la sintonización de las bobinas de gradiente con el paciente colocado dentro del magneto.

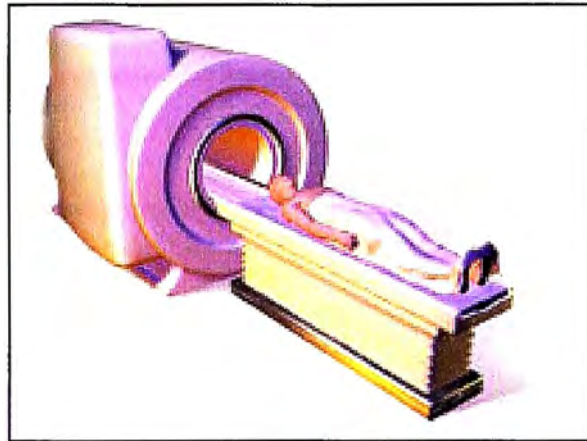


Figura 1.2 Resonador Magnético (RM)

1.3.2 El Sistema de Gradientes

La generación de imágenes de resonancia magnética utiliza gradientes de campo magnético para crear diferenciación espacial de las señales emitidas desde la región de interés en un paciente. Una gradiente de campo magnético es un campo magnético débil, que cambia linealmente con la posición y se superpone sobre el campo magnético principal. Las gradientes de campo magnético en las direcciones x, y, y z requeridas para un estudio de generación de imágenes son producidas por tres conjuntos de bobinas ortogonalmente posicionadas.

Cada conjunto de bobinas esta conectado a una fuente de alimentación independiente. Adicionalmente a la producción de gradientes orientados a lo largo de los ejes x, y, ó z, al energizar las bobinas de gradiente en combinación, es posible generar gradientes de campos magnéticos en cualquier orientación. Los gradientes generados por estas bobinas deben ser lineales sobre el volumen de la formación de imágenes, y deben ser estables para la duración del gradiente aplicado.

Un factor complicado es la ocurrencia de corrientes eddy. Estas corrientes eddy son generadas por los cambios de las gradientes en las partes conductoras tal cómo el blindaje metálico de los magnetos. A su vez las corrientes eddy también producen un campo de gradiente no deseado en el lugar de interés, el cual causa problemas, cómo artefactos en las imágenes, y consumo adicional de helio.

Los efectos de las corrientes eddy son minimizados por los blindajes activos de las bobinas de gradiente, en donde el efecto de las corrientes eddy es contrarestanda por un campo generado por una bobina adicional que rodea la bobina de gradiente original.

Las corrientes a través de las bobinas de gradiente están en el orden de varios cientos de Amperios. Consecuentemente, grandes fuerzas actúan sobre las partes

mecánicas de tal forma que estas fuerzas comiencen a oscilar durante la variación de la gradiente, esto origina el ruido acústico característico durante las tomas de imágenes de resonancia magnética.

1.3.3 Bobinas de Radiofrecuencia

El sistema transmisor de RF es responsable de la generación y transmisión por medio de una bobina transmisora (antena), de la energía de radiofrecuencia utilizada para excitar los protones. Dado que la señal de Resonancia es extremadamente débil, la antena de recepción debe ser de excelente calidad para obtener la mejor relación señal-ruido posible.

Las bobinas RF, en un equipo de resonancia, son usadas para la excitación del núcleo y para la detección de la señal. Las bobinas deben ser capaces de producir un campo uniforme (o bien definido) a través de la región de la que se está obteniendo imágenes. En cualquier caso, lo que se requiere es una bobina con una gran sensibilidad. Las bobinas deben de estar sintonizadas para hacer coincidir la frecuencia de resonancia del tipo del núcleo que está siendo observada. En sistemas antiguos, la fuente RF y la bobina transmisora deben también coincidir en impedancia, para así evitar la reflexión de energía la cual podría dañar el amplificador de la fuente.

Cuando un paciente es colocado dentro de la bobina RF, se añade resistencia al circuito de la bobina. Esto es referido como carga de la bobina. En intensidades de campos típicos de un sistema de resonancia magnética (0.5 T a 1.5 T), el ruido introducido por el paciente domina el ruido inherente producido por los circuitos RF.

Para una detección de señal óptima, el objeto del cual se está obteniendo las imágenes debería de cubrir la mayor parte de la bobina de detección. Típicamente, es deseado un factor de 70% o más. Por lo tanto una bobina de superficie usualmente brinda una mejor relación señal-ruido que una bobina de cuerpo estándar. Usando las bobinas de superficie se logra una mejora en la relación señal-ruido equivalente a un factor de 3 a 5.

Las bobinas de superficie flexibles (Figura 1.3) permiten una máxima facilidad para su colocación y aseguran una mejor comodidad para el paciente. Por otro lado, para imágenes abdominales, la bobina de cuerpo podrían ser aceptables, pero la relación señal-ruido podrían ser mejoradas usando una bobina envolvente de cuerpo. Para la obtención de imágenes de la cabeza o extremidades, se usa una bobina más pequeña colocada cerca a la región de interés.



Figura 1.3 Bobinas de Superficie Flexible

El uso de la bobina RF de cuadratura (Figura 1.4) proporciona una mejora adicional en la relación señal-ruido. Una bobina transmisora en cuadratura reduce la potencia RF requerida y por lo tanto la energía disipada dentro del paciente. Una bobina en cuadratura es hecha de un arreglo de dos bobinas con sus ejes en ángulo recto. Mientras ambas bobinas recogen una idéntica señal, los voltajes de ruido inducidos casi no están correlacionados.



Figura 1.4 Bobinas de Cabeza en Cuadratura

Para una apropiada combinación de las señales de salida, es posible lograr una ganancia por un factor de 1.4142 (raíz cuadrada de 2) en la relación señal-ruido. Esto podría intercambiarse contra imágenes de tiempo muy corto y una mayor flexibilidad en las aplicaciones. Aunque la homogeneidad RF de la bobina de cuadratura de volumen es mejor que una bobina envolvente, el factor de contacto de una bobina flexible es a menudo mayor, especialmente en imágenes con campo de visión pequeño, resultando algunas veces en una favorable relación señal-ruido con una bobina flexible.

El concepto de una bobina de sinergia explota las ventajas de la relación señal-ruido de una bobina pequeña y de la detección en cuadratura, pero lo hace aplicable para campos de visión grandes. Una bobina de sinergia es hecha de un arreglo de bobinas en cuadratura recibiendo todas ellas la señal de resonancia magnética en forma simultánea, por ello el tiempo de escaneo no se incrementa.

Cada tipo de bobina cubre una parte diferente del cuerpo, por ejemplo, una columna y después de su medición, las imágenes de todos los elementos de bobina pueden ser combinadas en un gran campo de visión, por ejemplo 45 cm. En esta imagen, la relación señal-ruido es mejor en aproximadamente 50% en comparación a las imágenes obtenidas por de bobinas de superficie flexible del tamaño de un elemento de bobina.

En la Figura 1.5 se aprecia los tipos de bobinas que se encuentran disponibles en un resonador magnético. Las bobinas ilustradas son bobinas especiales o bobinas dedicadas para determinados tipos de estudio.

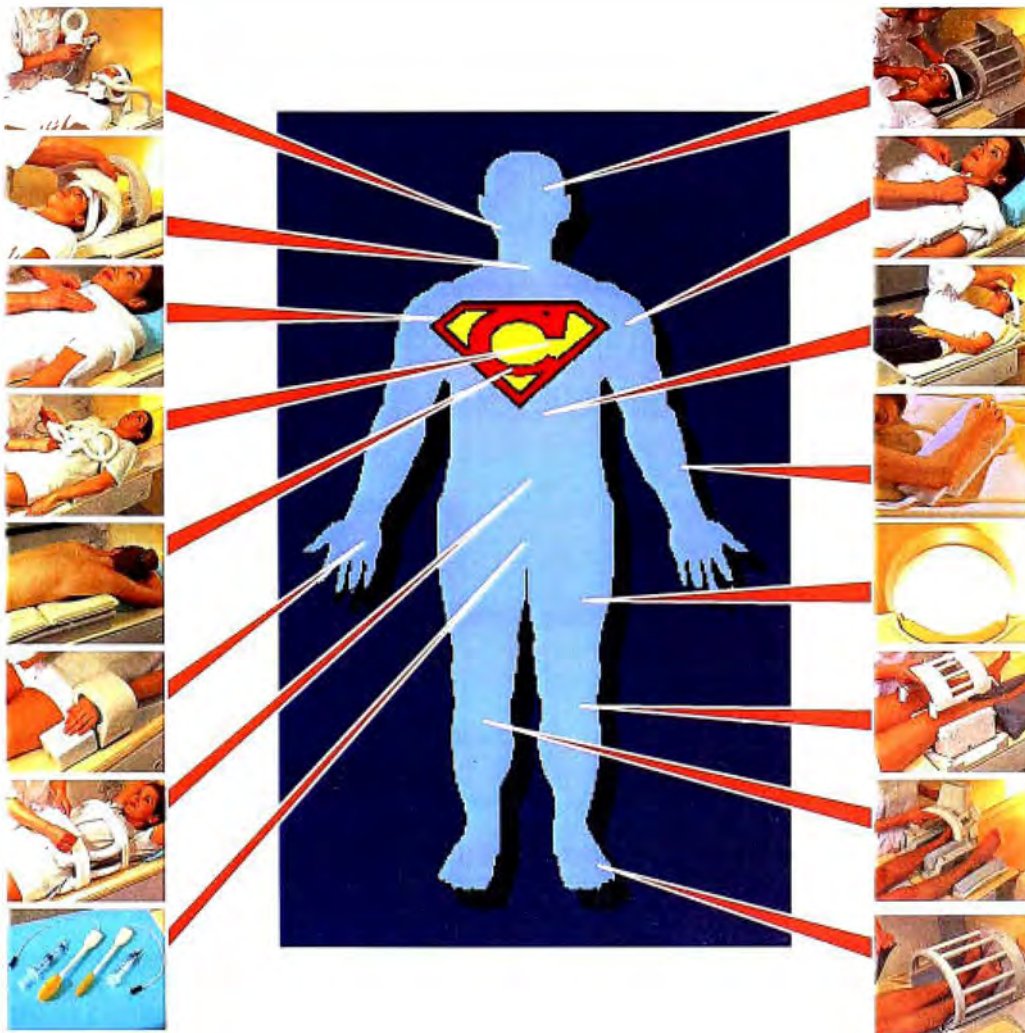


Figura 1.5 Tipos de Bobinas Disponibles en un Resonador Magnético

1.3.4 Sistema de Control y Adquisición

Es el encargado de medir las señales provenientes de los protones y digitalizarlas para su procesamiento posterior. Todos los sistemas de resonancia magnética utilizan una bobina receptora para detectar los voltajes inducidos por los protones luego del pulso de RF. Para estudios de grandes volúmenes de tejido (como en imágenes del cuerpo o la cabeza), la bobina transmisora normalmente sirve también como receptora.

El subsistema de adquisición y control está localizado entre el computador central, el reconstructor y el hardware de RF. Este subsistema se encarga de realizar la ejecución de los programas del método de resonancia magnética, de la adquisición y demodulación de las señales de resonancia magnética y los transporta a la matriz del procesador, adquisición y procesamiento de señales fisiológicas para sincronizar los programas de resonancia magnética a la fisiología del paciente; la calibración automática del hardware de RF, gradiente y fisiología para el scan requerido (fase de preparación), calibración y facilidades para las pruebas del hardware. El espectrómetro MR es parte del sistema de adquisición y control.

1.3.5 Sistema de Reconstrucción

Los datos medidos son reconstruidos y visualizados. En muchas adquisiciones el tamaño de los juegos de datos son de vital importancia, por ejemplo en adquisición de imágenes 3D o con un tamaño de matriz mucho más grande.

1.3.6 Computadora Central, Visualización, Almacenamiento e Impresión

Desde la consola del operador del equipo es posible:

- manejar los datos administrativos del paciente,
- control del escaneo,
- visualización de la señal del sensor,
- visualización de las imágenes,
- procesamiento de las imágenes,
- almacenamiento y copiado.

Todo puede ser realizado en paralelo.

En la parte frontal de la cubierta del magneto, se puede utilizar para la visualización de la imagen, una pantalla LCD. Las imágenes reconstruidas de un escaneo son inicialmente almacenados en el disco duro del computador central. Un sistema de almacenamiento típico de larga duración es realizado con el disco óptico. Una vista de ejemplo de la consola del operador del equipo se muestra en las Figura 1.6. Esta consola corresponde a una computadora con especificaciones muy especiales.



Figura 1.6 Consola del Operador

En la Figura 1.7 se muestra los diferentes gabinetes que manejan la parte electrónica de un resonador magnético y que se encuentran instalados en un ambiente especial llamado sala técnica.



Figura 1.7 Gabinete en la Sala Técnica

1.3.7 Blindaje Magnético

El blindaje magnético es necesario para proteger los ambientes que se encuentran alrededor de la sala de examen, de los efectos del campo magnético que se encuentran alrededor del imán. Relojes, cintas de video, tarjetas de crédito etc., pueden ser dañados por el campo magnético. Una de las mayores preocupaciones clínicas es el efecto del campo magnético en dispositivos tales como marcapasos. Para evitar

inesperados riesgos de seguridad, es necesario aislar el magneto o imán en un área donde no exista transito de individuos a través de las líneas de fuerza del campo magnético, y construir el blindaje magnético para limitar la extensión del campo estático.

La intensidad de campo magnético que puede ser típicamente tolerado por un equipamiento encontrado en un hospital común están indicadas en la Figura 1.8. Además, para mantener la homogeneidad del campo, es necesario un blindaje contra los efectos de distorsión de campo del medio ambiente, tal cómo los causados por el paso de automóviles, trenes o elevadores.

Los magnetos podrían ser pasivamente blindados al rodear la sala de examen del magneto con placas pesadas de hierro, pero esto añade un peso adicional. En un blindaje magnético activo, un conjunto interno de bobinas superconductoras produce el campo magnético principal, mientras un conjunto externo de bobinas superconductoras, en los cuales la corriente fluye en la dirección opuesta, contiene y reduce el campo magnético de borde.

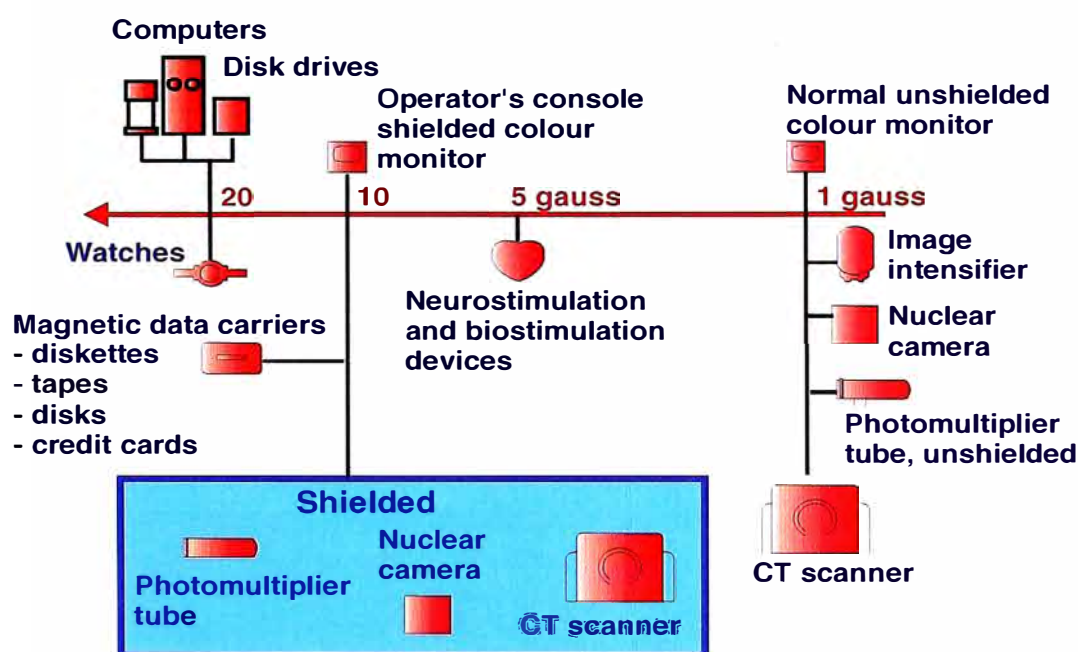


Figura 1.8 Intensidad de Campo Magnético de Tolerancia Típica de Equipamientos Hospitalarios

1.3.8 Blindaje de Radiofrecuencia

La señal de resonancia magnética es relativamente débil, por consiguiente pequeñas interferencias externas de RF pueden degradar significativamente la calidad de la imagen. Como resultado, los sistemas de resonancia magnética generalmente requieren que la sala de examen esté blindada contra fuentes externas de energía RF. Para la mayoría de sistemas, esto involucra blindaje en las paredes, piso y techo de las

instalaciones del resonador magnético. El blindaje RF también previene que las señales generadas durante las mediciones emitan señales de radio perturbadoras fuera del cuarto del resonador magnético.

1.3.9 Resumen

En el presente capítulo se ha descrito todos los conceptos teóricos que corresponden a los principios físicos y la formación de imagen de un equipo de resonancia magnética. También se ha desarrollado las diferentes partes en las que se compone este tipo de equipamiento.

Con estos fundamentos teóricos podremos desarrollar en el capítulo siguiente el tema correspondiente a una adecuada planificación en un proceso de instalación de un resonador magnético, teniendo en consideración algunos cuidados para evitar la aparición de los artefactos en la imagen de resonancia magnética.

CAPITULO II

IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE RESONANCIA MAGNÉTICA

En este capítulo se expondrá el problema fundamental que aparece en todo proceso de instalación de un resonador magnético, que es la aparición de artefactos o imágenes fantasmas en los estudios de resonancia magnética. Se plantearán los cuidados que se deberán tener durante el proceso del acondicionamiento del ambiente donde se instalará el sistema de resonancia magnética, así como los procedimientos para una adecuada instalación de dicho equipo, para de esta manera evitar la aparición de imágenes fantasmas antes mencionadas.

2.1 Justificación de Informe de Suficiencia.

Una de las causas responsables de la aparición de artefactos en la imagen de resonancia médica se debe a una inadecuada planificación del sistema de resonancia magnética y a errores en el diseño e instalación del sistema de blindaje de radiofrecuencia. Estos artefactos no permiten un adecuado diagnóstico médico del paciente examinado. La otra causa se debe a un mal funcionamiento del resonador. El informe se centra en la primera causa expuesta.

El objetivo del presente trabajo consiste en indicar los diferentes pasos que deben seguir un adecuado proyecto de instalación de un Resonador Magnético, indicando todos los cuidados que se deben de tener para evitar interferencias y mal funcionamiento del equipo.

Debido a la fuerte inversión que representa implementar un proyecto de un Resonador Magnético para aplicaciones medicas y debido a que esta técnica de imagen en el campo medico es relativamente nueva pues no tiene mas de 30 años, es poca la información que se tiene respecto a los cuidados que se deben de considerar antes de la implementación del proyecto mismo.

Es muy importante determinar con una adecuada selección, el lugar donde se instalará el magneto del Resonador. Se debe de analizar las perturbaciones que los ambientes exteriores pueden ocasionar al campo magnético del equipo para así evitar la aparición de los artefactos en la imagen que no permiten un adecuado diagnostico del

paciente que se encuentra examinado, así mismo se debe de tener cuidado con el blindaje magnético y de RF para evitar que las ondas RF generadas por el equipo puedan interferir con el exterior a la sala de examen.

La falta de conocimiento y la poca información técnica que existe en el medio no permiten muchas veces tener el cuidado adecuado a los ingenieros proyectistas y se termina con una instalación del equipo con serias deficiencias que son imposibles de corregir sin generar un tremendo costo adicional a los dueños de los equipos.

Existen muchos casos de penosas instalaciones que nunca permitieron que el Resonador Magnético entre en funcionamiento debido a una mala selección del ambiente donde se debería de instalar el magneto así como también existen casos donde después de que el Resonador Magnético, haya entrado en funcionamiento, este haya tenido que contar con asistencia técnica especializada permanente, determinándose después de algún tiempo transcurrido y después de mucho análisis, que la causa real de los continuos problemas técnicos se deben a un inadecuado proceso de instalación. Todo esto trayendo cuantiosas pérdidas de dinero por la corrección de los problemas que se pudieron evitar si se hubieran tenido los cuidados adecuados durante el montaje del equipo.

2.2 Plan de Equipamiento

Se desarrollará a continuación los diferentes criterios a tener en cuenta en el proceso de instalación de un resonador magnético.

2.2.1 Homogeneidad del Campo Magnético

La calidad de imagen depende del campo magnético principal (B_0). La Homogeneidad del campo magnético, puede ser distorsionada por objetos ferromagnéticos estáticos tales como el refuerzo ferroso del piso, vigas estructurales ferrosas, gabinetes ferrosos, motores, generadores, transformadores, etc.

La calidad de imagen también depende de la estabilidad del campo magnético principal (B_0). Las variaciones de B_0 pueden causar artefactos en la imagen tales como imágenes fantasma. El movimiento de los objetos ferromagnéticos, tales como carros, trenes, y elevadores pueden causar tales variaciones en B_0 .

La corriente en las líneas eléctricas también puede causar tales variaciones en B_0 . La amplitud de la variación B_0 decrecerá a medida que se incremente la distancia al magneto de la fuente distorsionadora. Por esta razón, hay una mínima distancia requerida al magneto para cualquier tipo de objeto en movimiento o línea de potencia

dependiendo de sus propiedades (tales como peso, corriente, etc.). Sólo los disturbios producidos en el eje Z (dirección de la mesa de paciente) son importantes para la calidad de imagen.

Si hubiera la posibilidad que el local donde se instalará el equipo pudiera violar los requerimientos del magneto, entonces las posibles soluciones dependerá de la fuente distorsionadora y de la construcción del ambiente. Para ayudar a indicar las posibles distorsiones que pueden influenciar en la estabilidad del campo magnético, estos pueden clasificarse dentro de siete categorías:

- Influencia de objetos ferro-magnéticos estáticos
- Influencia de objetos ferro-magnéticos en movimiento.
- Objetos magnetizados en movimiento.
- Trenes, metro, etc.
- Influencia de campos electromagnéticos.
- Sensibilidad a los campos magnéticos estáticos.
- Vibraciones coherentes y no-coherentes.

Las cuales son explicadas en detalle en las subsecciones siguientes.

a. Influencia de Objetos Ferromagnéticos Estáticos

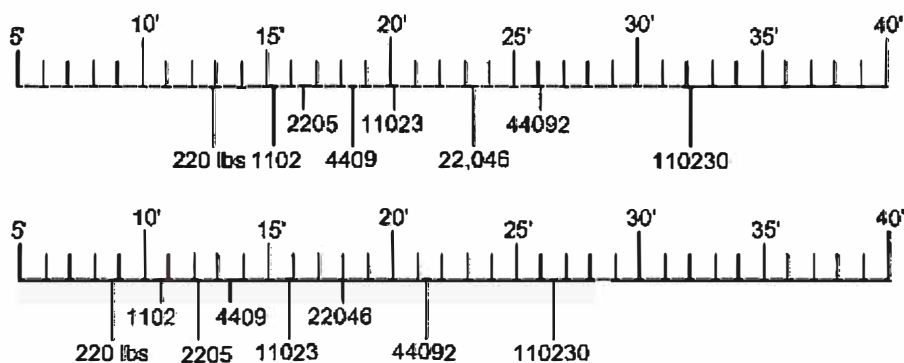
- Refuerzo del Piso.- Para evitar la falta de apantallamiento, la concentración promedio del refuerzo ferromagnético del piso no debe de exceder los 25 Kg/m² en un área de 3m x 3m simétricamente alrededor del isocentro del magneto con una distancia mínima de 50mm debajo del nivel del piso terminado. Si el refuerzo del piso es colocado a una distancia mayor de 1.25 m debajo del isocentro, el peso puede ser ignorado. El refuerzo debe de ser igualmente distribuido sobre el piso (las vigas ferromagnéticas en el piso no están permitidos).
- Haz Ferromagnético perpendicular al eje Z del magneto:-. Debe de ser localizado a por lo menos 1.25 m del isocentro del magneto.
- Todos los otros Haces Ferromagnéticos: Deben de ser localizados a por lo menos 1.6 m del Isocentro del magneto.
- Objetos Ferromagnéticos Substanciales.- Deben de ser localizados a una distancia mínima de 2.5 m del Isocentro del magneto.

b. Influencia de los Objetos Ferromagnéticos en Movimiento.-

- Distancias mínimas.- Los objetos ferromagnéticos tales como los camiones, autos y remolques son magnetizados por el campo magnético de la tierra y pueden también ser magnetizados por el campo magnético de borde del magneto (Cuando ellos están

dentro de este campo). La Tabla 2.1 muestra las distancias mínimas permitidas para los objetos ferromagnéticos en movimiento que deben de medirse desde el Isocentro.

Tabla 2.1 Distancias mínimas. Vista Superior Eje Z. Vista Inferior Eje X, Y



- **Contra medidas Posibles.**- Si las distancias mínimas no son encontradas, se podrían presentar algunos problemas de calidad de imagen. Las variaciones de B_0 pueden ser medidas en varios ángulos a fin de encontrar el ángulo mas óptimo para ubicar el futuro eje Z del sistema RM si la distancia o el ángulo al Isocentro no son conocidos.

c. **Objetos magnetizados en movimiento.**

- **Distancias mínimas.**- Algunos objetos ferromagnéticos son magnetizados debido a las altas corrientes locales o por que ellos entran repetidamente al campo fringe del magneto (por ejemplo ascensores). En este caso, las variaciones de B_0 pueden ser mayores. La distancia de seguridad puede ser encontrada multiplicando el peso de la masa ferromagnética en movimiento por 10 y comparar los resultados con la Tabla "Influencia de los Objetos Estáticos en Movimiento"

d. **Trenes y Metros**

- **Distancias mínimas.**- Los Trenes eléctricos y Metros funcionan por tracciones eléctricas. Para los rieles del tren y/o metro que se encuentran energizados, la corriente a través de las líneas (y la corriente de retorno a través de los rieles) inducirán grandes variaciones en el campo magnético que se extenderán a una gran región. Estos campos tendrán variaciones pequeñas en dirección perpendicular a las líneas de potencia. Por ello, las variaciones de campo magnético B_0 dependen de la distancia de las líneas de potencia al Isocentro, dependen también de la corriente y el ángulo entre la línea de potencia y el eje del magneto (0° es paralelo al eje Z). La Tabla 2.2 muestra la distancia minima permitida (en pies) para los sistemas de rieles energizados con electricidad versus la corriente y su ángulo al eje Z del magneto. Se debe de notar que a distancias cortas, se debe de considerar también el peso del tren.

Tabla 2.2 Distancia Minima permitida (en pies)
para los Sistemas de Rieles Energizados

Distance (feet) for Electrically Powered Subways and Trains	Angle (degrees), 0° is parallel to Z-axis						
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
Current = 750 Amps	59' (18 m)	65.5' (20 m)	69' (21 m)	72' (22 m)	75.5' (23 m)	79' (24 m)	79' (24 m)
Current = 2000 Amps	85' (26 m)	92' (28 m)	98.5' (30 m)	105' (32 m)	108' (33 m)	111' (34 m)	111' (34 m)

- Contramedidas posibles.- Las variaciones de B0 pueden ser medidas en varios ángulos a fin de encontrar el ángulo mas optimo para colocar el futuro eje Z del sistema MR si la distancia o el ángulo al isocentro no son conocidos.

e. Influencia de los Campos Electromagnéticos

- Distancia Minima: La corriente en las líneas eléctricas, grandes transformadores o motores eléctricos cerca a un sistema de RM pueden afectar la estabilidad del campo magnético desde que ellos también producen campos electromagnéticos. La Tabla 2.3 muestra las distancias mínimas permitidas.

Tabla 2.3 Influencia del Campo Electromagnético

Objeto con campo electromagnético		Distancia de seguridad desde el Isocentro del Magneto
Línea Electrica	500 Amps	5 metros
Transformador	650 KVA	10 metros
Motor	30 KVA	5 metros

- Contramedidas posibles.- Las variaciones de B0 pueden ser medidas en varios ángulos a fin de encontrar el ángulo mas optimo para colocar el futuro eje Z del sistema MR si la distancia o el ángulo al isocentro no son conocidos.

f. Sensibilidad al Campo Magnético Estático

- Distancia minima: Si un sistema MR es instalado cerca de otro sistema MR, se debe de asegurar de que la intensidad del campo magnético del otro sistema no exceda los valores especificados en el isocentro del primer equipo instalado. Si el campo se encuentra entre ciertos valores, entonces el magneto debe de ser rehomogenizado cuando el campo del otro sistema va a on o off. Ver Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Intensidad De Campo Magnético permitido

Allowed Field Strength of Another MR System at Isocenter of the Achieva System	
Field Strength of Other System at Achieva Isocenter	Result
< 0.5 Gauss (0.05 mT)	Always Possible
> 0.5 Gauss (0.05 mT) AND < 3 Gauss (0.3 mT)	Re-shimming Required
> 3 Gauss (0.3 mT)	Not Allowed

g. Vibraciones coherentes y no coherentes

- Prueba vibracional del piso.- Las vibraciones del piso pueden afectar la estabilidad del campo magnético, el mismo que puede ser responsable de la baja calidad de imagen. A fin de evaluar la aceptación del establecimiento se requiere una inspección visual del ambiente. Si existiera un potencial problema, entonces se requiere realizar las pruebas respectivas al establecimiento.
- Especificaciones.
 - o Vibración coherente.- Las vibraciones coherentes tienen una señal con una amplitud y frecuencia constante. Las fuentes típicas son los motores eléctricos, sistemas de aire, etc. Estas vibraciones proporcionan distorsiones constantes durante el periodo de medición. Las señales coherentes producen diferentes artefactos los cuales son la fuente principal de problemas en calidad de imagen. Sin embargo, las fuentes de distorsión pueden ser manejadas una vez que se encuentra la fuente de distorsión. Las soluciones típicas envuelven un re-equilibrio, aislamiento del ambiente, o re-instalación de la fuente.
 - o Vibración No coherente.- Pueden ser categorizados en vibraciones tipo pulso, tipo transitorias y tipo ruidosas. Las vibraciones de Pulso y Transitorias son eventos aislados, y estas vibraciones tienden a decrecer en un tiempo corto. Es permitido un máximo de un pulso o transición por minuto. Las vibraciones ruidosas no tienen una frecuencia específica y son de banda ancha. Las vibraciones ruidosas típicas son causadas por tráfico vehicular, gente caminando, o la resonancia de la estructura de los edificios. Estas fuentes son difíciles de eliminar, la única solución posible es cambiar la construcción del edificio (Esto es losa del piso del resonador magnético aislada). En este caso, el cliente debe consultar con un ingeniero estructural, o también un especialista en vibraciones.

2.2.2 Ruido Inducido Por Fuerzas Vibracionales

Durante las diferentes secuencias de un examen, los sistemas de resonancia magnética producirán fuerzas vibratorias que abarcarán un rango de frecuencias. Estas fuerzas se transmitirán a través de la estructura del resonador magnético y el piso de la sala de examen, con la posibilidad de que estas fuerzas se transmitan a través de las columnas, vigas cercanas, etc.

Dependiendo del tipo de construcción (por ejemplo tipo de losa del piso, el tipo y tamaño de las columnas y vigas, etc.) y la posición del magneto (Esto es directamente

sobre la losa o sobre un pedestal, cercano a vigas y columnas, etc.) el sistema de resonador magnético puede producir ruido estructural sobre la construcción.

Para evitar los indeseables ruidos estructurales, deben considerarse la aplicación de métodos de aislamiento para ayudar a atenuar las diversas vibraciones y ruidos mecánicos. La preparación del ambiente es responsabilidad del cliente, quien debe consultar con un ingeniero estructural, o también un especialista en vibraciones. Es necesario recalcar lo siguiente:

- Las fuerzas vibratorias son medidas en los tapetes de caucho al pié del magneto (El fabricante del equipo provee los tapetes). Cualquier atenuación que provean los tapetes no son tomadas en cuenta para estas mediciones.
- Las mediciones no podrían ser tomadas directamente sobre el piso (de ese modo tomando en cuenta la atenuación de los tapetes de caucho) debido a que los resultados vibratorios sobre el piso dependerán del tipo de construcción de este. En realidad las fuerzas de vibración del piso dependerán del emplazamiento del resonador magnético.

Las mediciones para frecuencias menores a 10 Hz no serán tomadas en cuenta debido a los inestables e imprecisos puntos de datos.

- Las mediciones serán tomadas durante varios exámenes.
- Todas las soluciones de terceros para atenuar las fuerzas vibratorias (esto es pisos aislados neumáticamente, tapetes antivibratorios, etc.) deben estar diseñados para cumplir todas las especificaciones del sistema de resonador magnético (especificaciones vibratorias, requerimientos de homogenización, cercanía a materiales ferromagnéticos, etc.). Además, los efectos a largo plazo, tales como los progresivos, deben ser considerados ya que la relación del magneto con la mesa del paciente es extremadamente crítica. Por lo general los fabricantes no revisan ni aprueban cualquier otra solución de terceros.

2.2.3 Distribución del Equipo

Una sala estándar de Resonancia Magnética comprende tres ambientes importantes (ver anexos B y C): El ambiente donde se realizan los exámenes de resonancia magnética (Cuarto del magneto o imán); la sala de control u operador donde se encuentra la computadora; y el cuarto de maquinas o sala técnica donde se encuentran los gabinetes electrónicos, el equipo responsable de la generación de la señal y todo el equipo electrónico necesario para el funcionamiento del resonador. El cuarto de exámenes por resonancia magnética está rodeado por un blindaje RF para prevenir las interferencias de señales de radiofrecuencias provenientes del exterior.

La sala de Resonancia Magnética debe de estar equipada con instrumentos y/o equipos auxiliares compatibles con el Resonador Magnético o con instrumentos y/o equipos auxiliares seguros con la Resonador Magnético. Estos términos están definidos por el FDA de la siguiente manera:

- **Equipos seguros con la RM.-** Indica que el equipamiento auxiliar, cuando es usado en un ambiente de Resonancia, no presenta riesgo para el paciente, pero puede afectar la calidad del diagnóstico médico.
- **Equipos compatibles con la RM.-** Indica que el equipamiento auxiliar, cuando es usado dentro de una ambiente de Resonancia, es un equipo seguro con la RM y se ha demostrado que no afecta significativamente la calidad de la información diagnóstica ni que su funcionamiento sea afectado por el Magneto del resonador.

El término “Ambiente de Resonancia” es utilizado para describir el espacio dentro de las líneas de 5G alrededor del magneto – que es, el perímetro alrededor de un magneto del resonador dentro del cual el campo magnético estático es más alto que 5G. Un nivel menor o igual a 5G es considerado un nivel seguro de Campo magnético estático para el público en general. A la zona con líneas de fuerza mayores a 5 Gauss se le conoce también como zona controlada. Esta es la zona de exclusión para personas con marcapasos cardiacos u otros implantes eléctricos.

La altura recomendada de una sala de un Resonador magnético es de aproximadamente 3.2 metros respecto del piso.

Consideraciones para la distribución del equipo

El blindaje magnético pasivo debe de contener la línea de 5 Gauss.

Los sistemas de Resonancia Magnética requieren que por lo menos una puerta con blindaje de la sala de examen se abra hacia fuera. Si la puerta con blindaje RF abre hacia adentro de la sala de examen, entonces es necesario instalar una abertura que quede liberada con la presión en caso de que ocurra un quench.

Un quench es una situación indeseable en un equipo de resonancia magnética. Se trata de la desaparición brusca del campo magnético por pérdida súbita de la superconductividad del magneto debido a un aumento de la temperatura de este. Cuando por cualquier circunstancia la temperatura supera el umbral de la superconductividad, el imán comienza a ofrecer resistencia al paso de la corriente. El imán se calienta y se produce mucho calor que provoca una evaporación brusca de los criógenos. El helio, por ser más ligero que el aire, escapa hacia el exterior, formando grandes nubes de vapor ascendente.

2.2.4 Blindaje

Un blindaje electromagnético es un producto que se debe instalar en conjunto con cada equipo de resonancia magnética y tiene como objetivo impedir la entrada de ondas de radiofrecuencia a la sala donde se encuentra el resonador. La razón es que la imagen de resonancia se genera en base a ondas de RF y cualquier perturbación en ellas produce distorsión en la imagen.

Existen diferentes tipos de blindajes electromagnéticos dependiendo de los requerimientos del equipo y del ambiente donde éste funcionará. Los tres principales tipos de blindajes electromagnéticos son:

- Blindaje electromagnético de cobre
- Blindaje electromagnético de aluminio
- Blindaje electromagnético de acero galvanizado

En este informe se presentan las características principales de los blindajes electromagnéticos que existen en el mercado junto con:

- Información de preparación para una instalación de blindaje electromagnético.
- Características de las partes del producto.
- Características de las terminaciones o acabados.
- Etapas y plazos de instalación.
- Garantía del blindaje.
- Operación y Mantenimiento del blindaje.
- Listado de partes y piezas de recambio.
- Resumen de protocolos de medición.
- Equipos utilizados para medición.
- 2 Checklist de preparación.

a. Preparación para la instalación de un blindaje electromagnético

La preparación para la instalación de un blindaje electromagnético es muy importante en la planificación de la implementación de un equipo de resonancia magnética. Se deben de tener muchas consideraciones y cuidados desde la selección del terreno o área donde se montara o instalara el Resonador Magnético y de la selección del proveedor encargado de montar el blindaje electromagnético. A continuación se detalla una lista de verificación y una serie de pasos que se deben de completar antes que comience la instalación del blindaje. Ver Tabla 2.5. La coordinación entre el proveedor del blindaje electromagnético y el fabricante del resonador magnético es de vital importancia.

Tabla 2.5 Lista de verificación para la preparación para recibir blindaje electromagnético

Ítem	OK	No	No aplica	Fecha
Documento instalación blindaje recibido	X			
Envío de planos de planta y elevación de la sala por parte del cliente al proveedor de la Jaula de Faraday				
Envío de documentación de pre-instalación del equipo de resonancia magnética al proveedor de la Jaula y todos los requerimientos especiales como soportes antisísmicos, bandeja de cables, etc.				
Envío por parte del proveedor de la Jaula al cliente y al fabricante de los planos de preinstalación de la jaula y todos los requerimientos del sitio				
Trabajos terminados dentro y alrededor de la sala				
Comienzo de instalación del blindaje				

b. Entrega de documentación por parte del cliente y el fabricante del Resonador al proveedor de la Jaula

Se debe enviar al proveedor de la Jaula, información esencial relacionada con la sala de blindaje, para la preparación del producto. El plazo requerido para la fabricación se considera que comienza al momento de tener toda la documentación.

b.1 Planta y elevación de la sala

Se requiere conocer con la mayor exactitud posible la información de alto, ancho y largo de la sala así como irregularidades que pueda contener en su interior (vigas, columnas, etc.).

b.2 Envío de planos de proyectos

Se debe especificar mediante los planos de proyecto, la posición que tendrán:

- Entrada de aire acondicionado
- Salida de aire acondicionado
- Gases clínicos
- Tableros de alimentación para la sala

- Entrada y salida de helio gaseoso
- Tubo de quench
- Interfaces propias del equipo
- Ubicación del Isocentro
- Ubicación de la o las ventanas
- Ubicación y sentido de apertura de la o las puertas (hacia el interior o exterior de la sala)

Si el cliente no tuviera preferencias sobre la ubicación de alguna de las aberturas, el proveedor de la Jaula propondrá posiciones para ellas.

b.3 Documento de instalación del equipo

Se debe enviar una versión actualizada de los documentos de preinstalación del resonador magnético que se va a instalar dentro del blindaje, esto para la revisión de solicitudes particulares, tamaños de marcos de soporte para filtros, helio, etc.

Además, el proveedor de la Jaula debe analizar el footprint del equipo y sus puntos de apoyo exactos.

b.4 Reconocimiento de la sala y consideraciones especiales para el blindaje

En caso de existir interferencia electromagnética en el sitio, se debe informar si hay algún requerimiento especial, ya sea para el blindaje electromagnético como magnético.

b.5 Fotos de irregularidades en la sala

Cualquier irregularidad que no quede claramente establecida en el plano debe ser fotografiada y explicada en detalle para la preparación del blindaje. Ejemplos de esto pueden ser ductos, cañerías, pilares o vigas interiores que estén dentro del volumen considerado para el blindaje.

b.6 Fechas tentativas de instalación

Se debe enviar una fecha tentativa de instalación, considerando 7 días antes de la fecha de entrada del magneto y 3 días después, para el cierre y medición de atenuación. Esta fecha debe ser notificada al proveedor de la jaula con aproximadamente 2 semanas de anticipación con la intención de coordinar con la disponibilidad de los equipos de instalación.

b.7 Requerimientos Especiales

Cualquier requerimiento especial que se requiera en la sala de examen proveniente por parte del usuario, debe agregarse junto con el resto de la documentación para evaluar su factibilidad y costo.

c. Requisitos generales para la instalación de un blindaje electromagnético

Para la instalación de un blindaje electromagnético se debe cumplir con los siguientes puntos antes de la llegada del equipo de trabajo:

- El lugar donde se instale el blindaje debe estar libre de obstáculos tales como vigas, ductos, cañerías, pilares, etc.
- Todos los trabajos al interior de la sala deben estar terminados antes de la instalación el blindaje.
- El sitio debe estar limpio, seco y libre de cualquier elemento.
- El piso debe estar nivelado, sin grietas ni baches.
- Proveer electricidad para la construcción de la sala: 220V – 16A.
- En caso de existir paredes, deben estar listos en las paredes o en el cielo de la obra gruesa, las aberturas (vanos) para las entradas de aire acondicionado, filtros eléctricos, líneas de helio/agua, panel de penetración, gases medicinales, guías de onda, puerta y ventana. Los tamaños y ubicación de estas aberturas estarán indicadas en los planos de preinstalación del blindaje, documento que es enviado por DICTUC al cliente luego de recibir la orden de compra.
- El blindaje se debe mantener en su embalaje original, bajo techo, en una sala contigua a la sala del magneto y no en la misma sala.
- Disponibilidad de un lugar contiguo a la sala para trabajar, y bodega con llave para dejar herramientas y materiales.
- No se recomienda la presencia de ductos de ningún tipo (agua potable, alcantarillado, cables eléctricos, etc.) fuera del volumen para el blindaje, ya que una vez finalizada la construcción no se podrá tener acceso a ellos en caso de emergencia.

d. Características del blindaje Electromagnético

Las características principales de este blindaje son:

- Construcción modular por paneles adaptables a cualquier geometría de sala (Se pueden incluir paneles de diferentes tamaños para utilizar todo el espacio disponible)
- Terminaciones o acabados completamente independientes del blindaje (opcional)
- No requiere mayor mantenimiento
- Tiempo de instalación: 10 días aproximadamente.
- Medición de atenuación e informe para cada blindaje construido.

Las características que poseen los paneles del blindaje electromagnético, dependiendo del tipo de material que se utiliza (Cobre, aluminio, acero galvanizado) se mencionan a continuación:

- Blindaje de cobre: planchas de Cobre de alta pureza de 0.2mm en soportes de madera, con puerta y ventana de Acero inoxidable.
- Blindaje de aluminio: Aluminio de 2mm, con puerta y ventana de Acero inoxidable.
- Blindaje de acero galvanizado: Acero galvanizado 1.5mm con puerta y ventana de Acero inoxidable.

e. Resumen especificaciones para la instalación

Se deben considerar los siguientes puntos y dimensiones durante la construcción o modificación de la obra gruesa del lugar proyectado para el blindaje, con la intención de evitar modificaciones adicionales:

- Altura mínima loza a loza: según requerimientos del equipo (ver “altura de sala” en sección “piezas y parte del blindaje y sus requisitos”).
- Rebaje del piso de la sala de blindaje en comparación con el piso exterior:
- Blindaje de cobre: 20mm si la puerta abre hacia el exterior de la sala y 50mm si la puerta abre hacia el interior.
- Blindaje de aluminio o acero galvanizado: 40mm si la puerta abre hacia el exterior de la sala y 80mm si la puerta abre hacia el interior.
- Pueden existir modificaciones si el equipo necesita refuerzo adicional.
- Vano para la puerta: 1355mm x 2300mm a una distancia de 160mm o más de la pared lateral
- Vano para ventana: 1450mm x 950mm
- Vano de 100mm x 100mm bajo o sobre la ventana para guía de onda de fibra óptica
- Tamaño de la sala de acuerdo a los planos entregados a la empresa proveedora de la Jaula de Faraday.
- Vano para regulador de presión: 610mm x 440mm
- Vano para interfaz de gases clínicos: 230mm x 230mm
- Vano para inyección y retorno de aire acondicionado: 610mm x 440mm (c/u)
- Vano para filtros eléctricos: 500mm x 440mm
- Vano para ventilación del paciente (si se requiere): 400mm x 400mm
- Vano para interfaces: Filter box, filter plate o panel de penetración, He exhaust Pipe o tubo de quench y He Lines según especificaciones del equipo.

Todos estos valores son estimados; los valores exactos para cada proyecto se encuentran en las especificaciones de preinstalación suministradas por el proveedor del blindaje electromagnético. Estas especificaciones son específicas y varían de proyecto a proyecto..

f. Piezas y parte del blindaje y sus requisitos

A continuación, en las Figuras 2.1, 2.2 y 2.3, se presenta un detalle de las descripciones de las partes del blindaje, las aberturas y los requisitos específicos que debe cumplir la sala. Todas estas aberturas deben estar terminadas antes del comienzo de la instalación del blindaje.

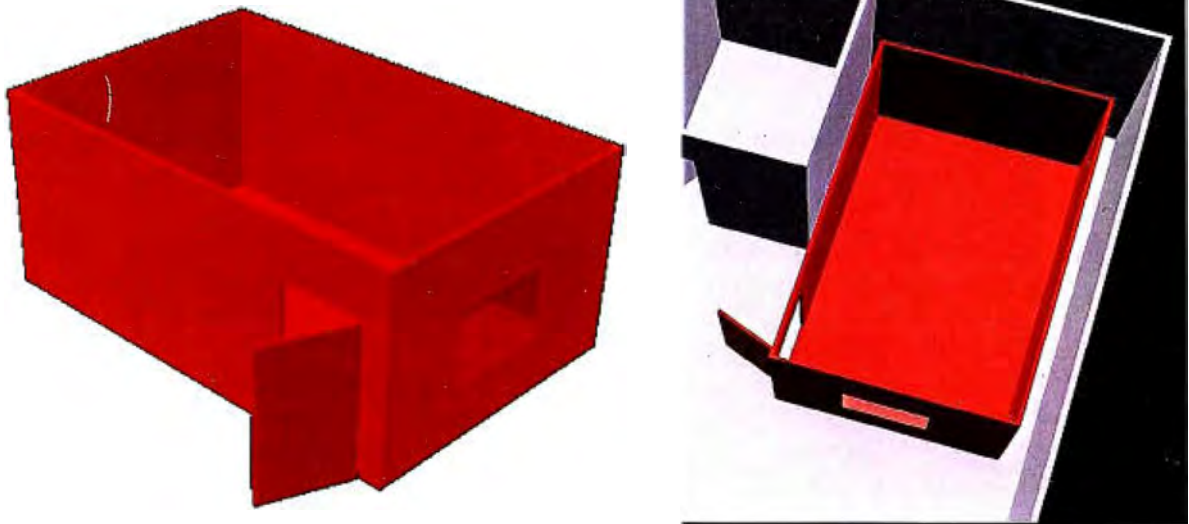


Figura 2.1 Vista en Perspectiva del Blindaje

En la Figura 2.2 se observa el acabado final visto desde adentro de la jaula de Faraday hecho con cobre.

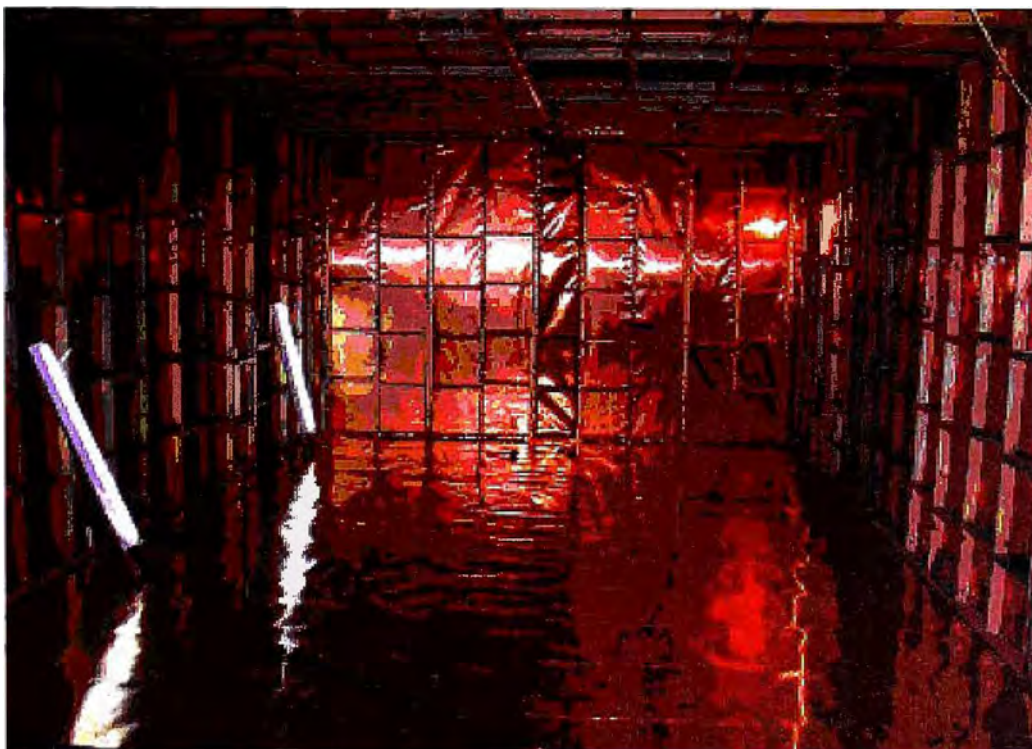


Figura 2.2 Vista interior de la Jaula de Faraday (Cobre)

En la Figura 2.3 se aprecia el acabado final visto desde adentro de la jaula de Faraday hecho en aluminio.

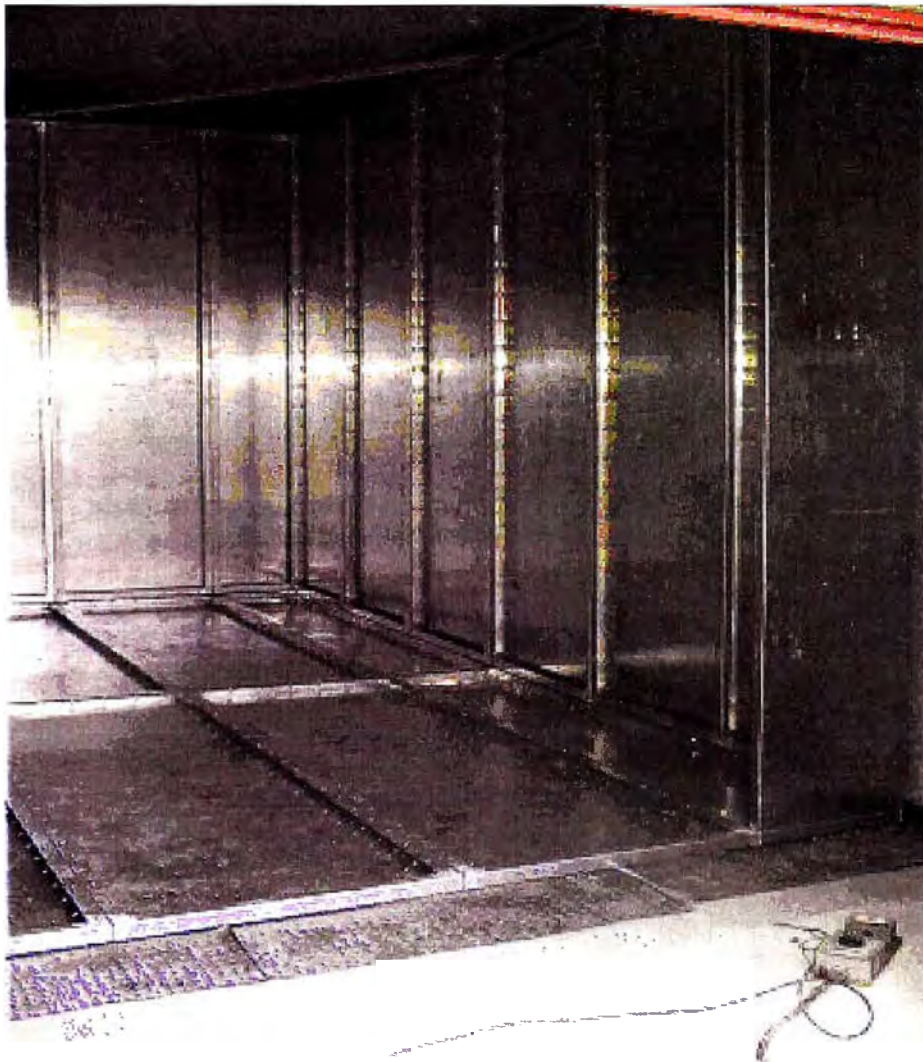


Figura 2.3 Vista interior de la Jaula de Faraday (Aluminio)

f.1 Paneles de Muro

En el blindaje electromagnético de cobre, se utiliza una estructura de madera que da soporte al recubrimiento de cobre. Los blindajes de aluminio o acero galvanizado son fabricados en base a paneles auto soportados de estos materiales sin estructura de madera. Para los acabados, se dejan disponibles soportes adicionales en los cuales se pueden utilizar tornillos para adherir cualquier tipo de terminación. Debe tenerse especial cuidado de no perforar el blindaje electromagnético. El espesor del muro sin terminación debe de ser de 65mm y con terminación debe de ser de 85mm. Las paredes del blindaje no pueden estar adheridas al muro, por lo que se debe dejar un espacio entre blindaje y muro de por lo menos 50mm.

En la Figura 2.4 se observa una de las paredes de la jaula de Faraday (Blindaje electromagnético) construidas con cobre.



Figura 2.4 Pared de blindaje RF con material de cobre

En la Figura 2.5 se observa un detalle de las juntas de los paneles de aluminio en la jaula de Faraday (Blindaje RF).



Figura 3.5 Detalle de blindaje RF con material de aluminio

f.2 Paneles de Techo

En el blindaje electromagnético de cobre, se utiliza estructura de madera y recubrimiento de cobre. Los blindajes de aluminio o acero galvanizado son fabricados en base a paneles auto soportados de estos materiales sin estructura de madera. Para los acabados, se dejan disponibles soportes en los cuales se pueden utilizar tornillos para colgar el cielo acústico. Debe tenerse especial cuidado de no perforar el blindaje. El techo de la jaula no puede entrar en contacto con ningún material externo, por lo que se debe dejar un espacio entre el techo de la jaula y la obra gruesa.

f.3 Soportes del techo

El cielo del blindaje se soporta sobre anclajes al techo de la obra gruesa mediante aislantes eléctricos (Figura 2.6). Esto otorga al blindaje la rigidez y soporte necesarios.

No se debe proveer ningún soporte especial para el techo.



Figur 2.6 Blindaje en el techo con material de cobre

f.4 Altura de la sala

Los blindajes se fabrican en tamaños estándar según el material. A continuación se da la relación entre la altura mínima de la obra gruesa “h libre” y la altura máxima que se puede obtener dentro de la sala del blindaje “h interior”:

- Cobre $h \text{ interior} = h \text{ libre} - 190\text{mm}$
- Aluminio o acero galvanizado $h \text{ interior} = h \text{ libre} - 200\text{mm}$

Ejemplos de alturas interiores estándar son:

Cobre

- $h \text{ interior} = 2830 \text{ mm}$ (requiere $h \text{ libre} = 3020 \text{ mm}$)
- $h \text{ interior} = 3030 \text{ mm}$ (requiere $h \text{ libre} = 3220 \text{ mm}$)
- $h \text{ interior} = 3180 \text{ mm}$ (requiere $h \text{ libre} = 3370 \text{ mm}$)

Aluminio o acero galvanizado

- $h \text{ interior} = 2820 \text{ mm}$ (requiere $h \text{ libre} = 3020 \text{ mm}$)

Al momento de solicitar la cotización por el blindaje se debe incluir la superficie, la altura de la obra gruesa y verificar que ésta no sea menor a la altura interna permitida por el equipo, además de la especificación del material para el blindaje (cobre, aluminio o acero galvanizado).

f.5 Rebaje del piso

El piso de la sala del magneto debe estar rebajado en relación al pasillo, para que no se produzca un desnivel excesivo una vez que esté finalizada la construcción de la sala. En los blindajes de cobre el piso debe estar rebajado 20 mm respecto al pasillo si la puerta abre hacia el exterior de la sala y 50 mm si la puerta abre hacia el interior. En el caso de blindajes de aluminio o acero galvanizado el piso debe estar rebajado 40 mm respecto al pasillo si la puerta abre hacia el exterior de la sala y 80 mm si la puerta abre hacia el interior.

f.6 Abertura para entrada de resonador magnético

Se requiere proveer un espacio para la entrada del resonador magnético. Este espacio o abertura es utilizado solo una vez, por lo que una vez ingresado el equipo, se puede cerrar. El sistema modular del blindaje permite abrir cualquier muro de éste hasta una dimensión de 3000 mm x 3000 mm. En el caso que el magneto deba ingresar por el techo, el máximo tamaño de abertura es el de la sala. La abertura que se debe dejar en el muro para estos efectos debe ser coordinada con el fabricante del resonador magnético.

Puerta

La puerta es construida con marco de acero inoxidable, cubierta de cobre y con contactos de cobre-berilio (finger stocks). Se debe dejar una abertura en el muro de 1500 mm X 2300 mm que debe estar a 160 mm o más de la pared lateral. No se debe proveer ningún soporte especial para afianzar la puerta. Ver Figura 2.7

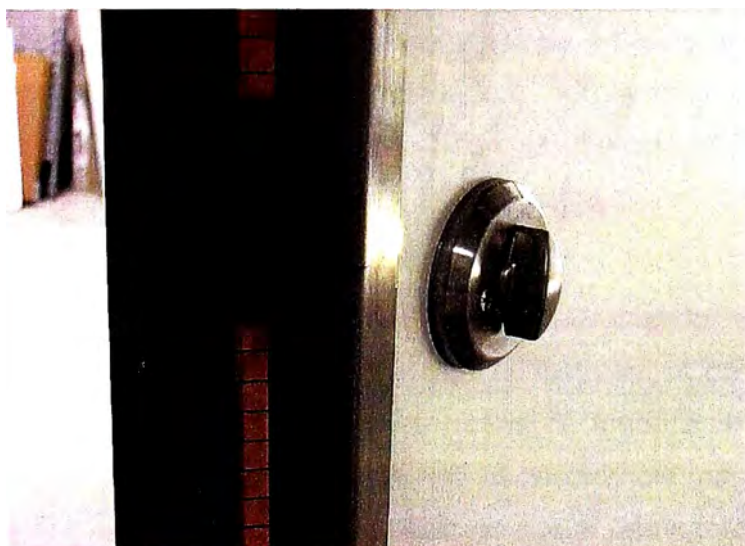


Figura 2.7 Puerta Blindada de la Sala de Examen

– **Ventana**

Las medidas de la ventana son: 1450 mm de ancho por 950 mm de alto. La posición en la cual se ubicará debe ser informada en los planos, recomendándose que

ésta se encuentre a una altura inferior a 1 mt (1000 mm) sobre el piso terminado. La ventana utiliza 2 vidrios de 6mm para mejorar la atenuación de ruido. Ver Figura 2.8.



Figura 2.8 Puerta y ventana con terminaciones (izquierda) / Puerta en blindaje de Aluminio sin terminaciones (derecha)

– Puntos de anclaje en piso

Por seguridad algunos equipos requieren ser anclados a la loza. Estos anclajes vienen determinados y son específicos para cada equipo. De requerirse un sistema de anclaje para el equipo se deben dejar en la loza las perforaciones solicitadas por el fabricante. La loza debe cumplir con las especificaciones de resistencia y materiales indicadas por el fabricante del equipo.

– Piso

En el caso del blindaje de cobre, el piso consta de 4 capas: aislante térmico y de humedad, sobre éste se instalan planchas de madera hidrorresistente HR100, sobre las que se instala toda la jaula incluyendo muros. Sobre la capa de madera se añade una capa de cobre y luego otra capa de madera HR100. Este sistema asegura el soporte necesario para cualquier equipo de resonancia magnética.

En los casos de blindajes de aluminio o acero galvanizado, el piso consta de 3 capas: aislante térmico y de humedad, sobre el cual se instalan los paneles de aluminio o acero galvanizado y en su interior se instala una capa de madera HR100. Este sistema asegura el soporte necesario para cualquier equipo de resonancia magnética.

Se requiere nivelar el piso de acuerdo a lo solicitado por el fabricante ya que el blindaje refleja las irregularidades del piso bajo él.

– Conexión a Tierra

Para que el blindaje cumpla su función debe tener sólo un punto de conexión a tierra, el cual debe encontrarse cercano al panel de penetración del equipo (punto de tierra del equipo). Ver Figura 2.9.



Figura 2.9 Conexión a Tierra.

– **Entrada de Filtros Eléctricos**

Se utilizan filtros auxiliares de 30 Amp con niveles de atenuación de 100 dB para alimentar enchufes o tomas de corriente, iluminación y futuras aplicaciones dentro de la sala. Algunos equipos requieren una entrada especial para la electricidad al interior de la sala. La existencia de estos filtros se debe consultar con el fabricante. Es labor del cliente o su contratista conectar estos filtros por el exterior a la alimentación eléctrica. Debe dejarse una abertura de 500 x 440 mm en una pared o sobre el cielo falso sobre el filter box o filter plate. Ver Figura 2.10..



Figura 2.10 Entrada Filtros Eléctricos

– **Regulador de presión**

El regulador de presión es una entrada libre de aire que se ubica sobre el cielo acústico y permite tener la misma presión de aire tanto dentro como fuera de la sala, esto para efectos que la puerta siempre se pueda abrir y cerrar con facilidad. Se debe proveer

una abertura en un muro de 610 x 440 mm. Ver esquema Inyección aire acondicionado. Esta abertura debe estar sobre el nivel del cielo falso.

– **Entrada de gases clínicos**

Existe una interfaz para la entrada libre de 4 conductos o mangueras plásticas con gases clínicos. La instalación de los gases clínicos corresponde al cliente o su contratista. La empresa proveedora de la Jaula de Faraday solamente provee las interfaces o guías de onda por donde ingresan las mangueras a la sala. Se debe proveer una abertura en el muro de 230 x 230 mm antes de la instalación y debe encontrarse sobre el nivel del cielo falso.

Estos ductos deben ser plásticos en la entrada para no conducir ondas electromagnéticas. Ver Figura 2.11.

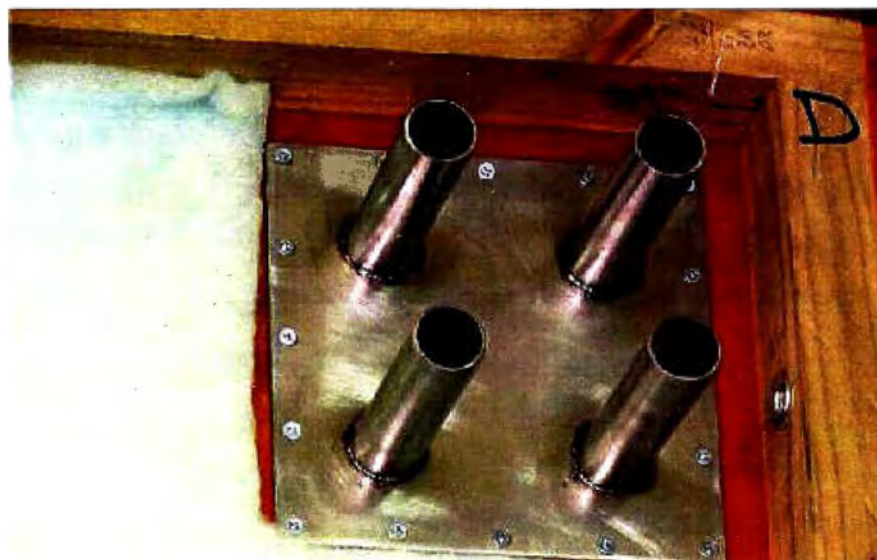


Figura 2.11 Entrada de Gases Clínicos.

– **Inyección de aire acondicionado**

La inyección de aire acondicionado a la sala se realiza por un solo punto para el cual se debe proveer una abertura. La conexión del blindaje con los ductos de aire acondicionado debe realizarlos el cliente o su contratista una vez que haya concluido la instalación del blindaje. Se debe proveer una abertura en un muro de 610 x 440 mm, sobre la altura del cielo falso o en el techo.

– **Extracción de aire acondicionado**

La extracción de aire acondicionado se realiza por un solo punto para el cual se debe proveer una abertura en la obra gruesa. La conexión del blindaje con los ductos de aire acondicionado debe realizarlos el cliente o su contratista una vez que haya concluido la instalación del blindaje. Se debe proveer una abertura en un muro de 610 x 440 mm, sobre la altura del cielo falso o en el techo. Ver Figura 2.12.



Figura 2.12 Inyección / extracción aire acondicionado.

– **Tubo de Quench**

El tubo de quench permite la salida del helio en caso de emergencia. La empresa proveedora de la Jaula instala la guía de onda que conecta el equipo con el blindaje, siendo responsabilidad del cliente o su contratista continuar el ducto hasta la salida definitiva en el exterior del hospital.

– **Ventilación para el paciente (algunos equipos)**

Algunos equipos usan una ventilación especial para el paciente que debe hacer ingreso a la sala. Se debe proveer una abertura de 400 x 400 mm para poner una guía de onda que permite el ingreso a la sala de la ventilación necesaria para el paciente.

– **Interfaz para filter box, filter plate o panel de penetración**

El filter box, filter plate o panel de penetración es la abertura por donde se comunica (eléctrica y electrónicamente) el magneto con el exterior. Se entrega para su instalación un marco de acero y pernos de soporte según especificaciones técnicas. Todas las especificaciones y requisitos solicitados para el filter box, filter plate o panel de penetración deben ser coordinados con el fabricante del magneto.

– **Resumen de Protocolo de Medición**

El protocolo de medición chequea estrictamente todos los aspectos solicitados por los distintos fabricantes de equipos de resonancia magnética en sus respectivos documentos de preinstalación. Una vez finalizadas estas mediciones, se entrega un resumen de ellas al cliente, con detalles específicos sobre los valores de atenuación.

Las mediciones realizadas por la empresa proveedora de la Jaula de Faraday (ver Tabla 2.6) para cada blindaje deben cumplir con los estándares siguientes: MIL-STD-285, MIL-STD-220A, UL-1283.

Las mediciones de atenuación se realizan usando un tono simple a la frecuencia y en los puntos indicados en la tabla de resumen. Mientras se realiza la medición, el panel de penetración o filter box se cubre temporalmente con una tapa del material del blindaje.

Tabla 2.6 Medición de Efectividad del Blindaje

	Freq. (MHz)	Medición (dB)	Medición de Referencia (dB)	Atenuación total (dB)
Puerta				
Ventana				
Filter Box o panel de penetración				
Tubo de quench				
Isocentro				
Interfaces aire				
Entradas gases clínicos				
Ventilación paciente				

Otras características referidas a la efectividad de la jaula de Faraday son mostradas en la Tabla 2.7. Se consideran tanto la parte eléctrica como los aspectos dimensionales.

Tabla 2.7 Características Adicionales de la Jaula de Faraday

Ítem	Característica
Puerta: Ancho efectivo	1260 mm
Puerta: Pendiente Máxima	10%, 15 mm
Puerta: Materiales	Acero Inoxidable no magnético
Ventana: Tamaño	1450 x 950 mm
Ventana: Visibilidad	> 70%
Piso : Grosor	Madera prensada hidrorresistente (Masisa) HR-100 de 15 mm (doble capa) Total 30 mm
Filtros: Cantidad	2 filtros de 30 Amperes 1 Filtro de 5 Amperes
Impedancia máxima entre 2 puntos	1 ohm
Aislamiento eléctrico a tierra	> 1 Mohm
Enchufes	3 enchufes dobles
Iluminación	2 circuitos independientes, 5 puntos c/u
Tipo de iluminación	Según especificaciones: AC o DC
Soporte del equipo	Depende del equipo
Aire acondicionado: Componentes	Ductos de aire de PVC 7', no magnéticos

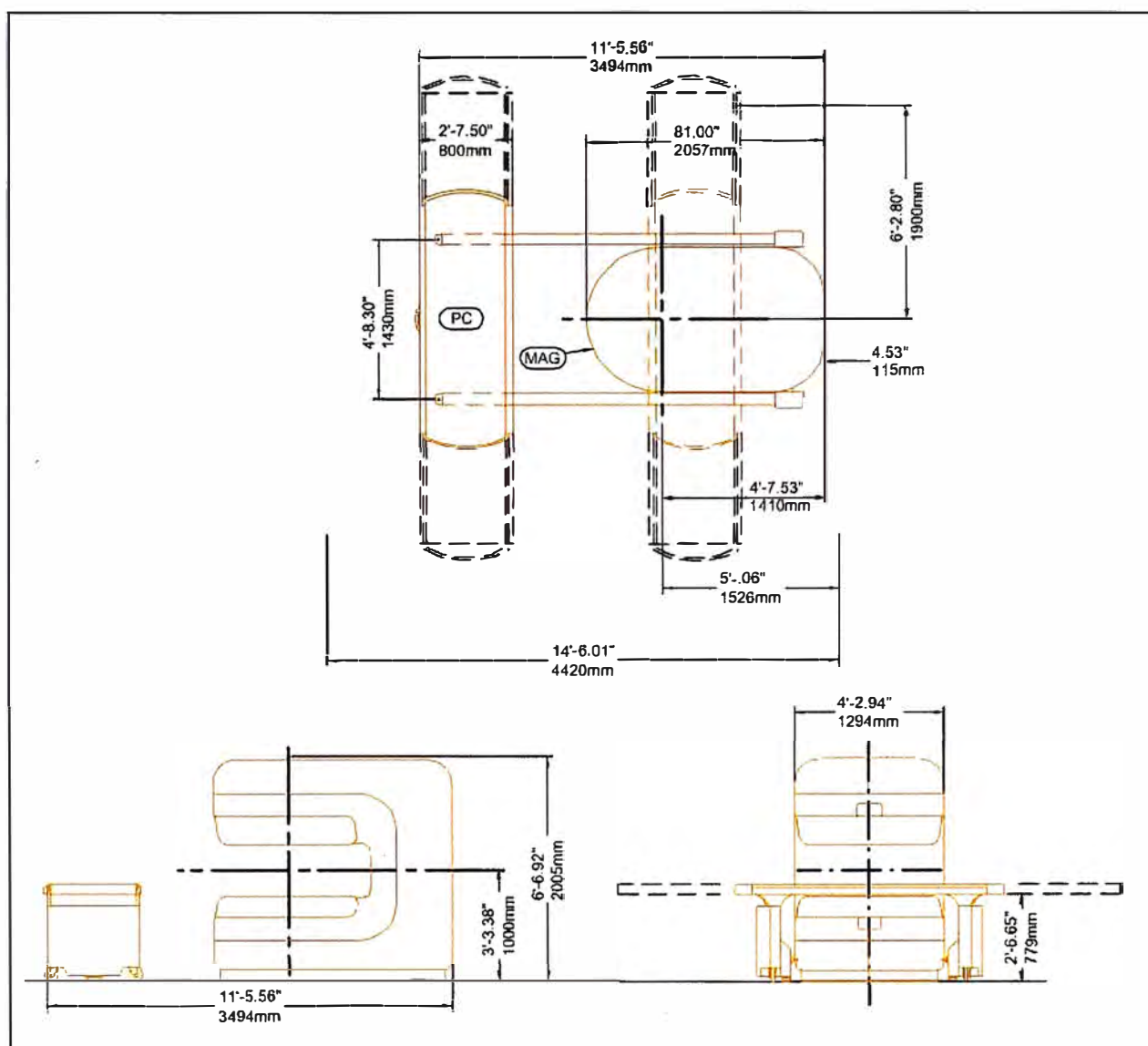
2.2.5 Detalles del Equipo

En las Figuras 2.12, 2.13, 2.14 y 2.15, se muestran las medidas de un magneto abierto y las medidas de un magneto cerrado así como de sus respectivas consolas del operador. En la Tabla 2.8 se muestran los pesos de las diferentes partes que componen un resonador magnético con una intensidad de campo de 1.5T, así como su respectiva disipación de calor.

Tabla 2.8 Resonador Magnético Cerrado de 1.5T

	Peso	Disipación de calor
Magneto	Aprox. 4630 Kg	Aprox. 6825 Btu/hr
Mesa de paciente	Aprox. 165 Kg	0 Btu/hr
Consola del operador	Aprox. 174 Kg	1706 Btu/hr

En la Figura 2.12 se muestra las diferentes vistas con sus respectivas medidas de un magneto abierto.

**Figura 2.12** Medidas de un Magneto Abierto

En la Figura 2.13 se muestra dos vistas de la consola del operador (vista frontal y vista de planta) de un resonador magnético abierto. Así mismo se muestra las medidas del mueble donde se ubicará la consola del operador que esta formada principalmente por un potente computador.

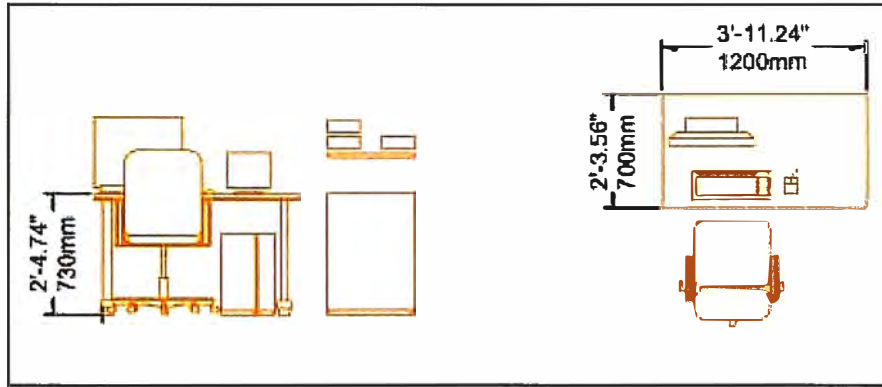


Figura 2.13 Consola del operador de un Resonador Magnético Abierto

En la Figura 2.14 se muestra las diferentes vistas con sus respectivas medidas de un magneto cerrado.

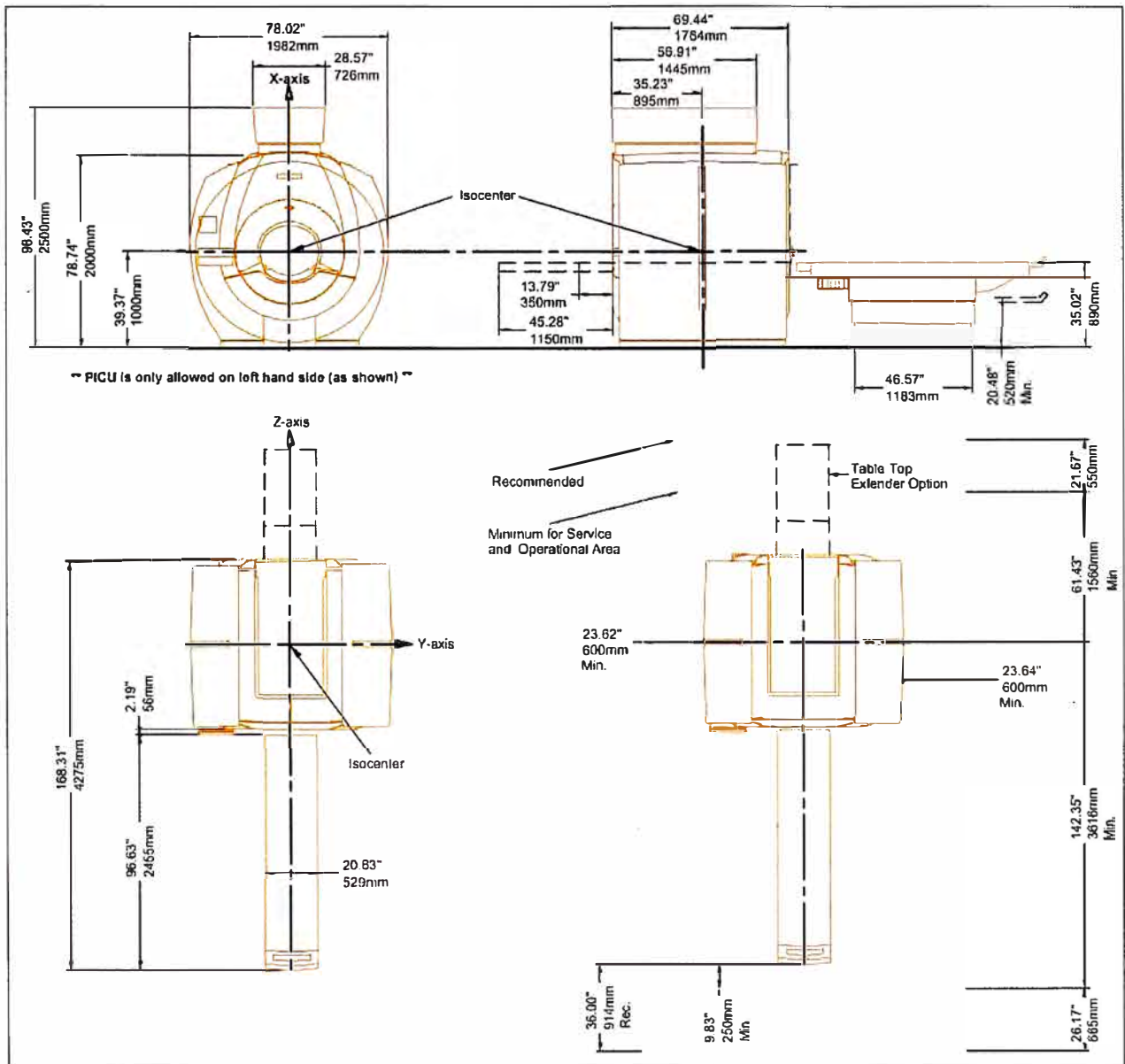


Figura 2.14 Medidas de un Magneto Cerrado

En la Figura 2.15 se muestra las diferentes vistas de la consola de control y visualización del operador de un resonador magnético cerrado.

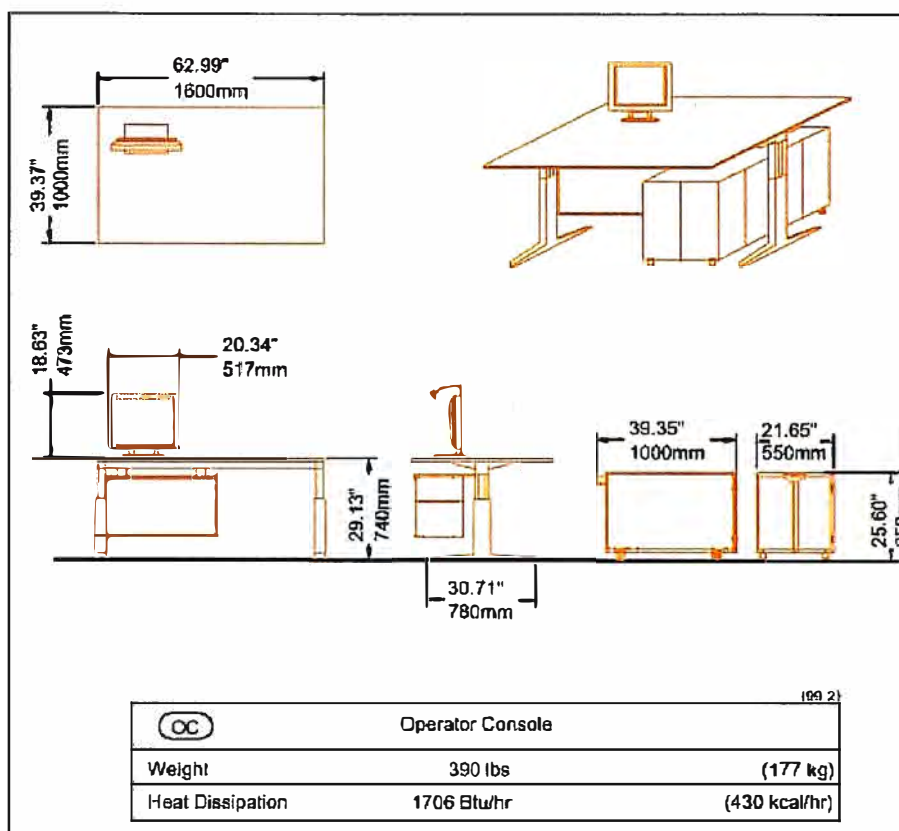


Figura 2.15 Medidas del Equipo de Control del Resonador Magnético Cerrado

2.3 Requerimientos de Radiofrecuencia

En esta sección desarrollan las particularidades del blindaje de radiofrecuencia.

2.3.1 Efectividad del Blindaje RF

La sala de examen de resonancia magnética debe de ser construida y probada con las especificaciones que se muestran en la Tabla 2.9. La prueba debe de realizarse a todas las partes que rodea el blindaje, incluyendo las juntas, puertas, ventana, ductos y penetraciones mecánicas.

Tabla 2.9 Atenuación total requerida del blindaje RF

Valores medidos		Partes del fabricante a ser testeadas	
		No incluido	Incluido
Campo H	0MHz – 10MHz	Irrelevante	Irrelevante
	10MHz – 15MHz	90dB	90dB
	15MHz – 100MHz	100dB	100dB
	5MHz – 100MHz	100dB	100dB
Campo E y onda planar			

La presencia de atenuación para las “partes del fabricante no incluidas” debe de cumplir con las siguientes condiciones:

- El blindaje RF debe de estar completamente instalado
- Los cimientos para el magneto y el soporte de paciente (mesa de paciente) deben de estar colocados.
- Debe de estar instalados el cableado para la conexión de puesta de tierra (Dentro y fuera del perímetro del blindaje RF)
- Todos los componentes y equipos que deben de ser colocados dentro de la sala que rodea el blindaje RF deben de estar instalados y operativos (incluyendo todas las facilidades externas y la interfase entre ellos y el sistema dentro de la sala blindada, pero excluyendo las partes que corresponden al proveedor del Resonador Magnético)

La presencia de atenuación para las “partes del fabricante incluidas” está dada de acuerdo a las siguientes condiciones:

- Todo el equipamiento dentro y fuera del ambiente que rodea el blindaje debe de estar instalado y funcionando.

2.3.2 Material del Blindaje RF

Son utilizados los siguientes materiales:

- Cobre.- En general, los fabricantes de resonadores magnéticos recomiendan blindajes de RF construidos con cobre. Los fabricantes de resonadores recomiendan el cobre debido a la alta eficacia del blindaje, gran estabilidad a lo largo del tiempo, diseño flexible, disponibilidad y costo.
- Hierro galvanizado (blindaje ferromagnético).- Los blindajes RF ferromagnéticos están sujetos a las siguientes restricciones:
 - El piso del blindaje RF debe de ser hecho con materiales no ferromagnéticos (por ejemplo cobre)
 - El espesor total del material ferroso debe de garantizar la efectividad específica del blindaje con el campo magnético.
 - Todas las paredes deben de estar a por lo menos 1600mm del isocentro del magneto. Las paredes no necesitan estar ubicadas simétricamente alrededor del isocentro.
 - El blindaje RF no puede vibrar. Esto puede introducir variaciones B_0 (especialmente en el blindaje RF que corresponde al techo).

- Aluminio.- Los blindajes RF de aluminio pueden ayudar a amortiguar las interferencias electromagnéticas externas sin embargo se requiere una atención especial para este material. Se forma una fina capa de oxido de aluminio, causando contacto eléctrico entre las partes del blindaje RF (especialmente alrededor de las puertas y ventanas).

Si es que no se toman precauciones (por ejemplo, mediciones en los revestimientos especiales), la calidad del blindaje RF entre los puntos de contacto móviles se degradará. Para mejorar la calidad de la conexión, se puede utilizar entre las superficies una delgada hoja de latón. Si la conexión es hecha a través de tornillos, entonces la resistencia eléctrica entre el latón y el aluminio estará entre los 0 a 10 mOhm

2.3.3 Condiciones Ambientales

El blindaje debe de trabajar correctamente y no debe de sufrir daño alguno dentro de las condiciones ambientales normales mostradas en la Tabla 2.10:

Tabla 2.10 Condiciones Ambientales Normales

Rango de temperatura	10° a 40° C
Humedad	20% a 90% sin condensación
Presión de aire	7.25 a 16.0 PSI
Agua/humedad/Liquido	goteo
Vibraciones mecánicas	
Frecuencia	0 a 150 Hz
Valor - g	0 a 0.1 g
Golpes mecánicos	
Valor - g	0 a 0.1 g
Duración del pulso	6 a 10 ms

Las condiciones mencionadas arriba también se emplean para un sistema de bobinado, ductos, salidas de gases y otras interfases. Durante y después de la instalación del Resonador Magnético, el blindaje puede estar expuesto a condiciones extremas debido a las actividades de construcción que puede haber en los alrededores. Perdida de potencia o fallas en el control de la temperatura del equipo pueden ser causa también de las mencionadas condiciones extremas. Por otro lado, se deben de seguir las regulaciones de protección local contra sismos. Deben de tomarse mediciones especiales para poder asegurar el magneto y el soporte de paciente al edificio.

2.4 Plan Eléctrico

Para el plan eléctrico deben de tenerse algunas consideraciones que mencionamos a continuación:

- El tendido de cables debe de realizarse a través de canaletas instaladas fuera de la sala de blindaje de RF
- Los cables de potencia y tierra deben de instalarse juntos
- Los cables de señal y data deben de instalarse juntos pero deben de estar separados de los cables de potencia
- Es importante que todos los cables estén instalados en canaletas apropiadas. La separación de las canaletas debe de ser continua desde el inicio hasta el fin.

En la Figura 2.16 podemos observar una representación de la manera como instalar los cables de diferente tipo.

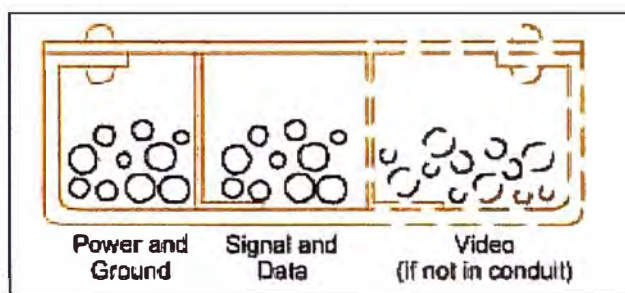


Figura 2.16 Canaletas

En la Figura 2.17 podemos observar un diagrama muy simplificado de la alimentación eléctrica a los diferentes sub-sistemas del resonador.

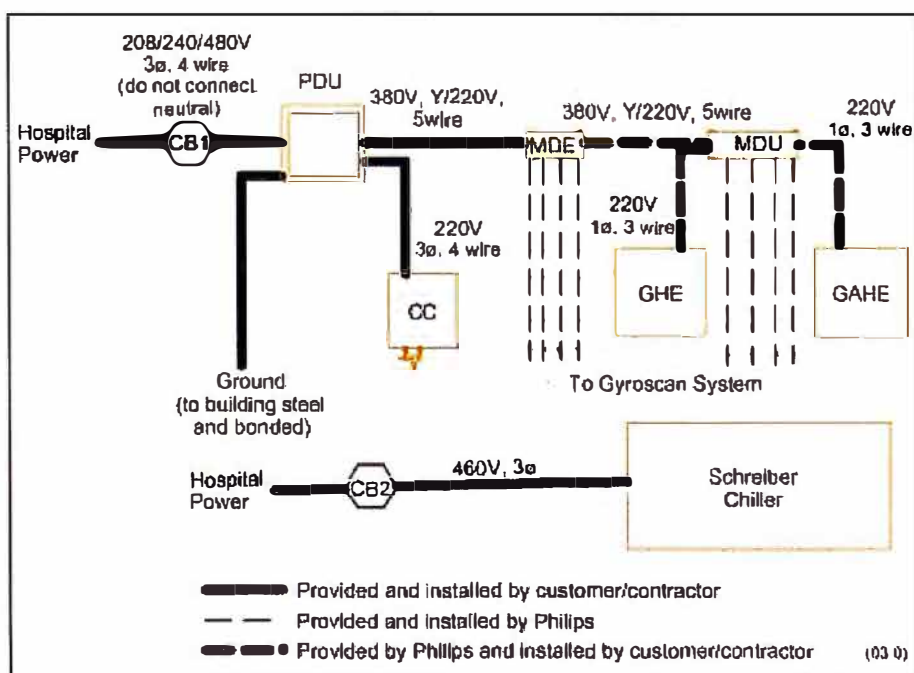


Figura 2.17 Esquema Eléctrico Simplificado

2.5 Resumen

En este capítulo se ha descrito uno de los problemas más sensibles dentro de un proceso de instalación de un resonador magnético (la aparición de artefactos o imágenes fantasma). También se ha planteado los aspectos necesarios para minimizar los errores que son provocados por una mala planificación en la adecuación del ambiente y en la instalación del resonador magnético. Todos los fabricantes de resonadores magnéticos ponen especial atención en la parte previa al montaje del equipo mismo para evitar posteriormente grandes dolores de cabeza por la aparición de imágenes fantasma o artefactos

CAPITULO III

EQUIPOS COMERCIALES Y ANÁLISIS DE COSTOS

En este capítulo se describirán cómo ejemplo algunos equipos de resonancia magnética que se comercializan actualmente en el mercado, y desarrollará los costos aproximados de la implementación de un proyecto de resonancia magnético conceptualizado desde la compra del equipo hasta la puesta en operatividad del mismo.

3.1 Equipos Comerciales

Existen actualmente varias empresas que fabrican equipos de resonancia magnética. Algunas de las más reconocidas son: Philips, General Electric, y Siemens. En cuanto a los costos, estos son muy variables ya que siempre existe una negociación de por medio y muchos accesorios sobre los que decidir (Configuración del equipo).

De cualquier manera, se podría decir que lo que hace la diferencia mayor es la magnitud del campo magnético que son capaces de emitir. Esta característica es muy importante ya que afecta directamente la calidad de las imágenes y la duración del estudio. Cuanto mayor es el campo magnético, mayor calidad de imágenes se obtiene y menor el tiempo que se requiere para adquirirlas. Normalmente, se puede tomar como regla aproximada US\$ 1.000.000 por Tesla.

En el presente existen también equipos de resonancia magnética abierta, lo que presenta una opción para pacientes claustrofóbicos. Se trata de equipos abiertos en forma de C cuya característica más novedosa es la posibilidad de realizar procedimientos intervencionistas, como cirugía de la epilepsia, del Parkinson, biopsias intracraneales, etc. Con los equipos de diseño cilíndrico es necesario sacar al paciente del aparato, realizar la intervención y volver a introducirlo.

Con algunos equipos de resonancia magnética abierta, los especialistas pueden actuar sin necesidad de movilizar al paciente y utilizar material quirúrgico convencional. La resonancia magnética abierta genera un campo magnético de 0,2T de potencia mientras que el otro equipo, de diseño convencional, generalmente tiene una potencia de 1 a 1,5 Tesla (aunque en el mercado existen desde 0,2T hasta 4T los más modernos). Sin embargo, los equipos abiertos de última generación disponen de un sistema informático optimizado que permite realizar exploraciones de alta calidad. Al disponer de

un campo magnético menor que el equipo cilíndrico, la resonancia abierta reduce las limitaciones para realizar estudios en pacientes portadores de estructuras metálicas no ferromagnéticas, prótesis, etc.

– **GENERAL ELECTRIC 1.5T SIGNA MR/I**



Figura 2.18 El Resonador GE 1.5TMR/I

El resonador magnético Signa MR/I de General Electric de 1.5T, es de tubo corto (aproximadamente la mitad de uno tradicional) por lo tanto cuenta con las comodidades de un equipo abierto pero con las ventajas de uno de alto campo. Sus exámenes duran aproximadamente 30 minutos.

○ **Características:**

- Imán Superconductor de 1.5 T
- Sistema de crioenfriamiento de helio relleno cada 3 años
- Sistema de gradientes, con shielding activo de 23 mT/m
- Antena de cuadratura de transmisión recepción
- Sistema digital de radiofrecuencia con posibilidad de conectar antenas en Phased Array
- Agujero de 55 cm
- 3863 Kg de peso
- Necesita una habitación de 34 m²

○ **Equipo informático**

- Ordenador Octane Workstation de Silicon Graphics
- 512 MB RAM
- 9 GB de HDD
- Unidad de disco magnetoóptico
- Estándar de grabado de imágenes DICOM 3.0
- PC auxiliar para el operador.

GENERAL ELECTRIC SIGNA PROFILE/I



Figura 2.19 El Resonador PROFILE/I

○ **Características**

- Imán permanente de 0.2 T
- Sistema de gradientes, de 15 mT/m
- Sistema digital de radiofrecuencia
- Agujero de 44 X 120 cm
- Orientación de campo vertical
- Imán de 9500 Kg. de peso
- Necesita una habitación de 23 m² .

○ **Equipo informático**

- Ordenador Ultra Sparc
- Estándar de grabado de imágenes DICOM 3.0

– **SIEMMENS MAGNETOM SYMPHONY**

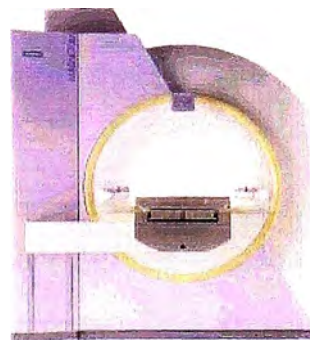


Figura 2.20 El Resonador Siemens Symphony

○ **Características:**

- Imán Superconductor de 1.5 T
- Sistema de gradientes de 30-52 mT/m
- Antena en Phased Array (sistema propio IPA, Integrated Panoramic Array)
- Sistema digital de radiofrecuencia

- Agujero de 60 cm
- 4063 Kg de peso
- Necesita una habitación de 30 m²
- **Equipo informático**
 - Procesador DEC Alpha Panoramic que reconstruye 100 imágenes / s combinado con un Pentium III
 - 1 GB RAM
 - Interfaz Software Syngo
- **Software syngo™**

Syngo es el software que suelen llevar las nuevas máquinas de Siemens. Esta preparado para imagen médica.

Su diagrama de bloques se muestra en la Figura 2.21:



Figura 2.21 Diagrama de Bloques de Software Syngo

Está basado en una plataforma Windows NT, a la que se le superpone el núcleo de la plataforma. A este núcleo se le pueden añadir todo tipo de plugins, que podrán ser usados desde la interfaz de usuario de Syngo.

3.2 Análisis de Costos

En esta sección desarrollaremos los costos aproximados de la implementación de un sistema de resonancia magnética para aplicaciones médicas.

3.2.1 Estimación del Costo del Resonador Magnético

Debido a que la obtención de imágenes por resonancia magnética es una nueva tecnología de diagnóstico y porqué es diferente de la tecnología de rayos-X, no existe una figura clara disponible sobre la inversión en tal sistema.

Lo establecido aquí abajo ha sido hecho para facilitar las discusiones sobre los aspectos de costos. Es necesario notar que algunos datos que mencionamos son

estimaciones debido a que la tecnología se encuentra en etapa de desarrollo. Además, el costo puede variar mucho de un país a otro.

3.2.2 Notas Explicatorias.

En esta sección se precisan los costos aproximados de los diferentes elementos que componen el proyecto de implementación de un resonador magnético para aplicación médica.

a. Precio

El precio de venta de un Sistema de Resonador Magnético superconductor completo con un campo magnético de 1.5 Tesla es de aproximadamente USD\$ 900,000.00 (Nueve cientos mil dólares americanos)

b. Crío generador

El precio del Helio líquido en Latinoamérica es muy alto. Por lo tanto el crío generador opcional el cual reduce el consumo de helio es una inversión rentable. El consumo del Helio líquido sin crío generador es de 0.5 ltr/hr y con crío generador de 0.15 a 0.2 ltr/hr.

En vez de rellenar el sistema mensualmente (en caso de consumir 1.5 T cada 40 días), la frecuencia de reabastecimiento junto con un crío generador es de tres veces al año. Además, el nitrógeno líquido requerido es eliminado con el uso de un crío generador.

Cuando un Resonador Magnético esta en proceso de instalación, El Magneto por lo general ha perdido una cantidad mayor de 50% de Helio, esto debido a la evaporación del mismo durante el transporte del equipo desde fabrica hasta el lugar de destino. Se debe de tener en cuenta que por lo general el equipo viaja por transporte marítimo. Por lo tanto el rellenado de Helio al magneto debe de ser al 100% antes de que este entre en funcionamiento. El costo estimado de rellenado de Helio en la fase de instalación es de aproximadamente USD \$ 25000.00.

c. Requerimientos de Instalación

En este punto desarrollaremos los requerimientos necesarios para el proceso de instalación de un resonador magnético.

c.1 Edificación Independiente

Muy a menudo un “edificio” de Resonancia Magnética es construido, siendo totalmente independiente de la estructura principal del hospital. Aparte de los requerimientos básicos de espacio de terreno que requiere un Resonador Magnético, también debe ser diseñado un área para la espera de los pacientes y para el descanso del personal del hospital.

El precio de tal edificación incluyendo el aire acondicionado puede variar dependiendo mucho de las comodidades y del espacio que se dispone. El precio es de aproximadamente de USD \$ 200,000.00

c.2 Jaula de Blindaje Magnético

Es requerida para reducir el campo magnético externo en valores aceptablemente bajos y proveer de ese modo altas demandas de homogeneidad.

El costo para tal protección es de USD \$ 30,000.00

c.3 Aire Acondicionado

Se asume que un hospital en Latinoamérica está equipado con aire acondicionado y un relativo control de humedad. Si uno nuevo es requerido, se tiene que añadir al presupuesto la cantidad de USD \$ 45,000.00.

d. Inversión Total

De los valores antes expuestos se obtiene la suma de USD \$ 1`200,000.00

El la Tabla 2.11 resumimos el costo del proyecto de un resonador magnético.

Tabla 2.11 Costo de Implementación de un Proyecto de Resonancia Magnética

Descripción	Precio USD \$
Equipo de RM de 1.5T	900 000
Helio en fase inicial de instalación	25 000
Terreno y construcción del edificio para el RM	200 000
Jaula de Faraday (Blindaje RF)	30 000
Sistema de Aire Acondicionado	45 000
Total	1 200 000

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Luego de desarrollado el presente informe pasamos a enumerar las conclusiones que hemos obtenido del presente trabajo así cómo las recomendaciones que podemos mencionar para una óptima ejecución del proyecto de instalación de un resonador magnético.

Conclusiones

Podemos extraer de este informe las siguientes conclusiones:

1. El blindaje de radiofrecuencia o Jaula de Faraday es una parte de suma importancia dentro de una instalación de un resonador magnético
2. La línea de fuerza de 5 Gauss define la zona controlada del equipo
3. La homogenización del campo magnético es un procedimiento que debe de ser aplicado constantemente al campo magnético del Resonador Magnético para asegurar una buena calidad de imagen.
4. El lugar donde se instalara un resonador magnético debe estar alejado de las fuentes que generan ruidos Vibracionales.

Recomendaciones

De la experiencia obtenida en los diferentes proyectos de instalación de Resonadores Magnéticos, podemos dar algunas recomendaciones:

1. Se debe de tener extremo cuidado en saber manejar las especificaciones de los fabricantes de los equipos de resonancia magnética. Los fabricantes especifican los REQUERIMIENTOS MANDATORIOS para un apropiado funcionamiento del equipo. Estos requerimientos incluyen detalles de cómo se debe de instalar el blindaje de RF y las condiciones necesarias para que el blindaje se pueda instalar. El cumplimiento de los requerimientos mandatorios son de estricta responsabilidad de los usuarios del equipo o dueños del proyecto
2. Los fabricantes de los equipos de Resonancia Magnética no se hacen responsables del correcto funcionamiento de un blindaje RF. El desempeño de un Resonador Magnético solo se garantiza si los requerimientos mandatorios se han cumplido al 100%. Por esta razón se debe de tener mucho cuidado en elegir adecuadamente el lugar donde se instalará el equipo.

3. El blindaje RF y todo el equipamiento asociado después de haber sido ejecutado, debe de ser aceptado formalmente por el fabricante del Resonador Magnético. Se debe de realizar un procedimiento de aceptación entre el proveedor del blindaje y el fabricante del Resonador antes de ejecutarse la instalación del equipo propiamente dicho.
4. Las interfases entre el blindaje RF y el sistema de Resonancia Magnética deben de cumplir los estándares del fabricante del resonador.
5. La verificación del buen funcionamiento del blindaje RF debe de realizarse de acuerdo a cualquiera de los siguientes estándares:
 - MIL-STD-285: Método de medición para la atenuación del blindaje electromagnético para pruebas de equipos electrónicos.
 - MIL-STD-220A: Estándares de seguridad de las interferencias electromagnéticas de los filtros.
 - UL 1283: Estándares para la seguridad de las interferencias electromagnéticas de los filtros.
6. Para un transporte conveniente y seguro de los pacientes y para acciones de instalación y mantenimiento, se recomienda una puerta en la sala de examen de por lo menos 1150mmW x 2100mmH
7. El tamaño de la ventana debe de ser de 1200mmW x 1000mmH con la base no más de 1000mm sobre el piso terminado. El material de la ventana debe de tener una atenuación de un factor menor que 2 en el rango de color de 2600 a 4200 grados K. La transparencia del material de la ventana debe de ser por lo menos:
 - 30% para un ángulo entre 40 y 140 grados
 - 50% para un ángulo entre 70 y 110 grados.

ANEXO A
DIAGRAMA DE BLOQUES DE RESONADOR MAGNÉTICO

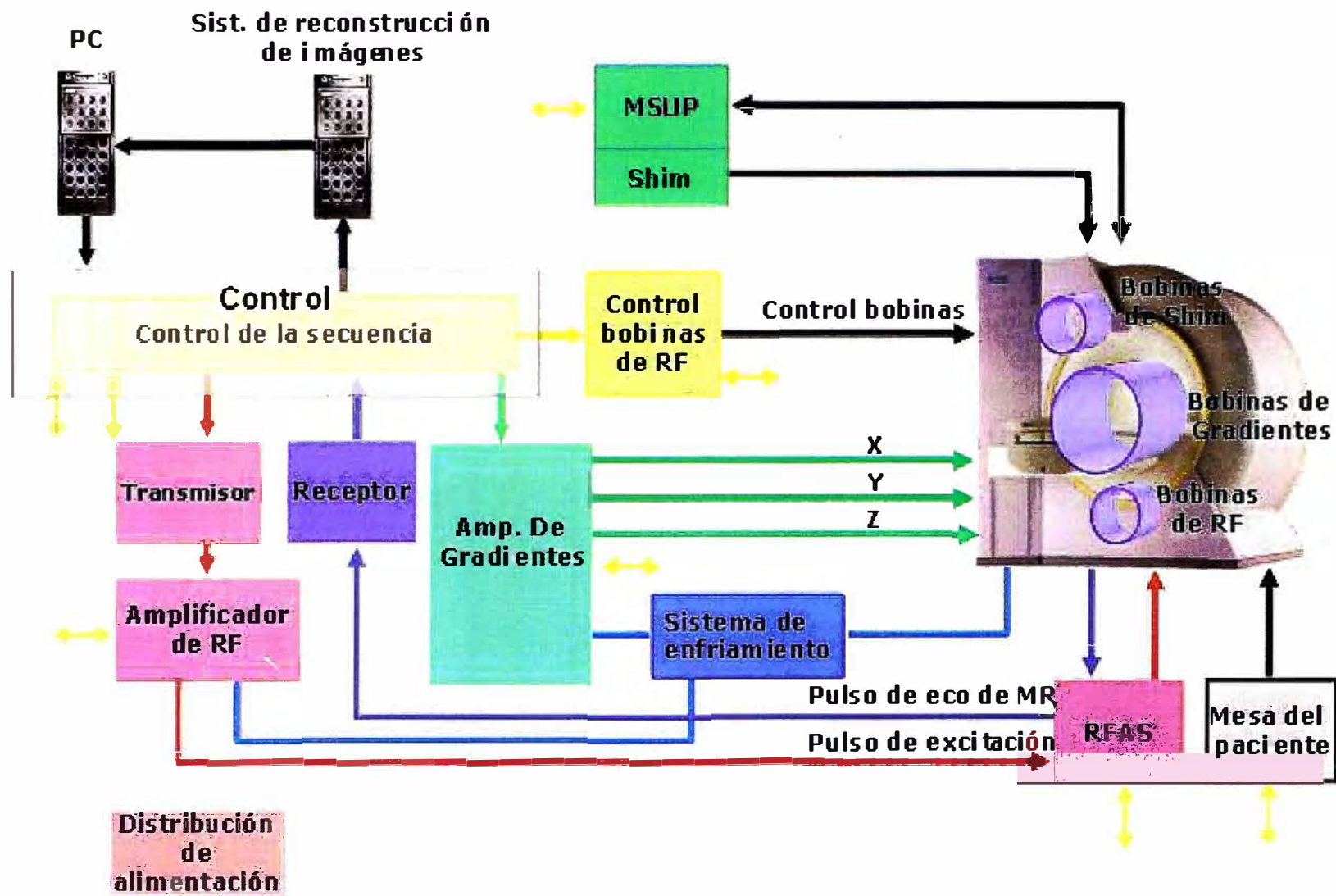


Figura A - Diagrama de Bloques de un Resonador Magnético Cerrado

ANEXO B
PLANO DE DISTRIBUCIÓN DE UN RESONADOR MAGNÉTICO ABIERTO

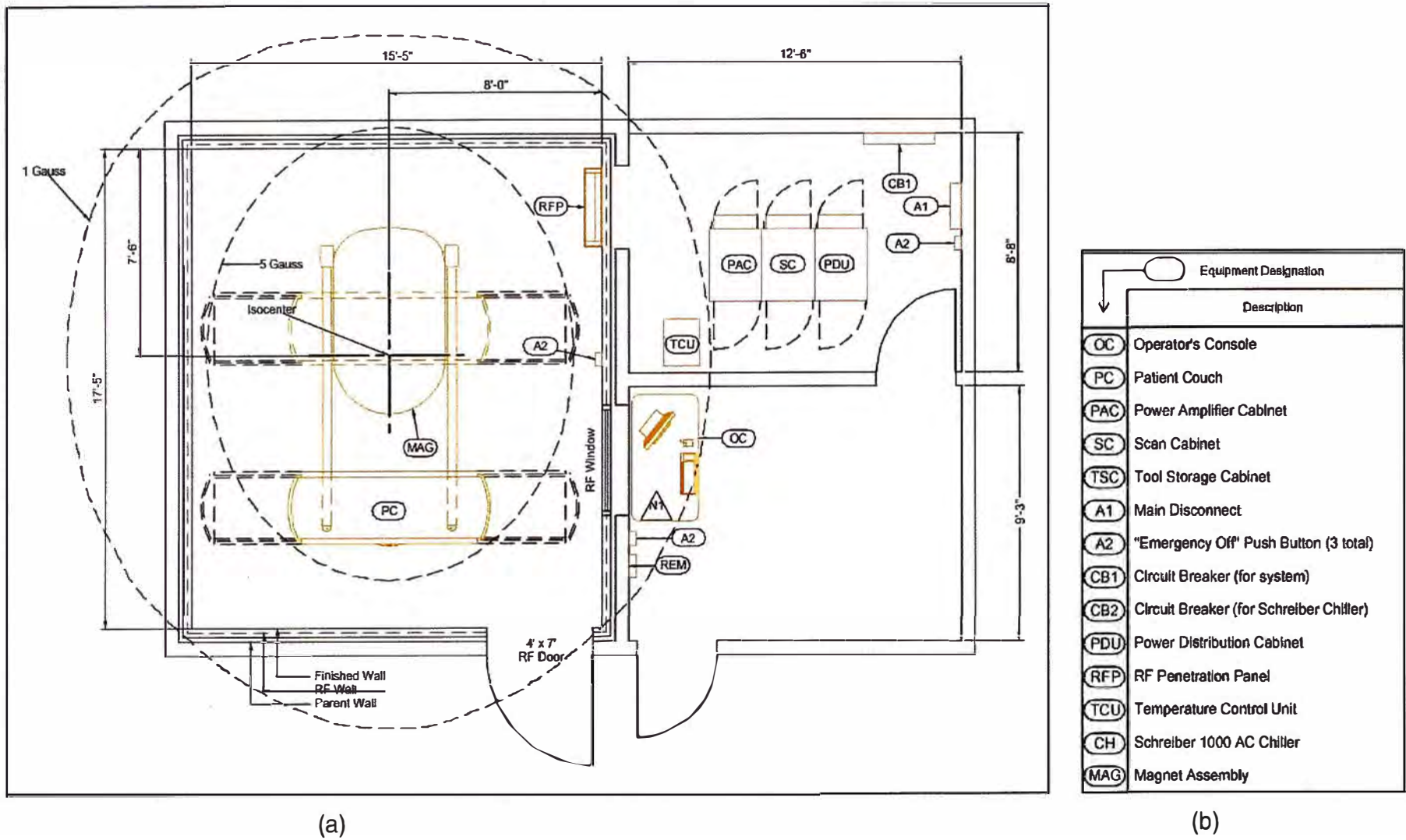


Figura B – Plano de distribución de un resonador magnético abierto

(a) Plano de distribución, (b) Leyenda del plano de distribución

ANEXO C
PLANO DE DISTRIBUCIÓN DE UN RESONADOR MAGNÉTICO CERRADO

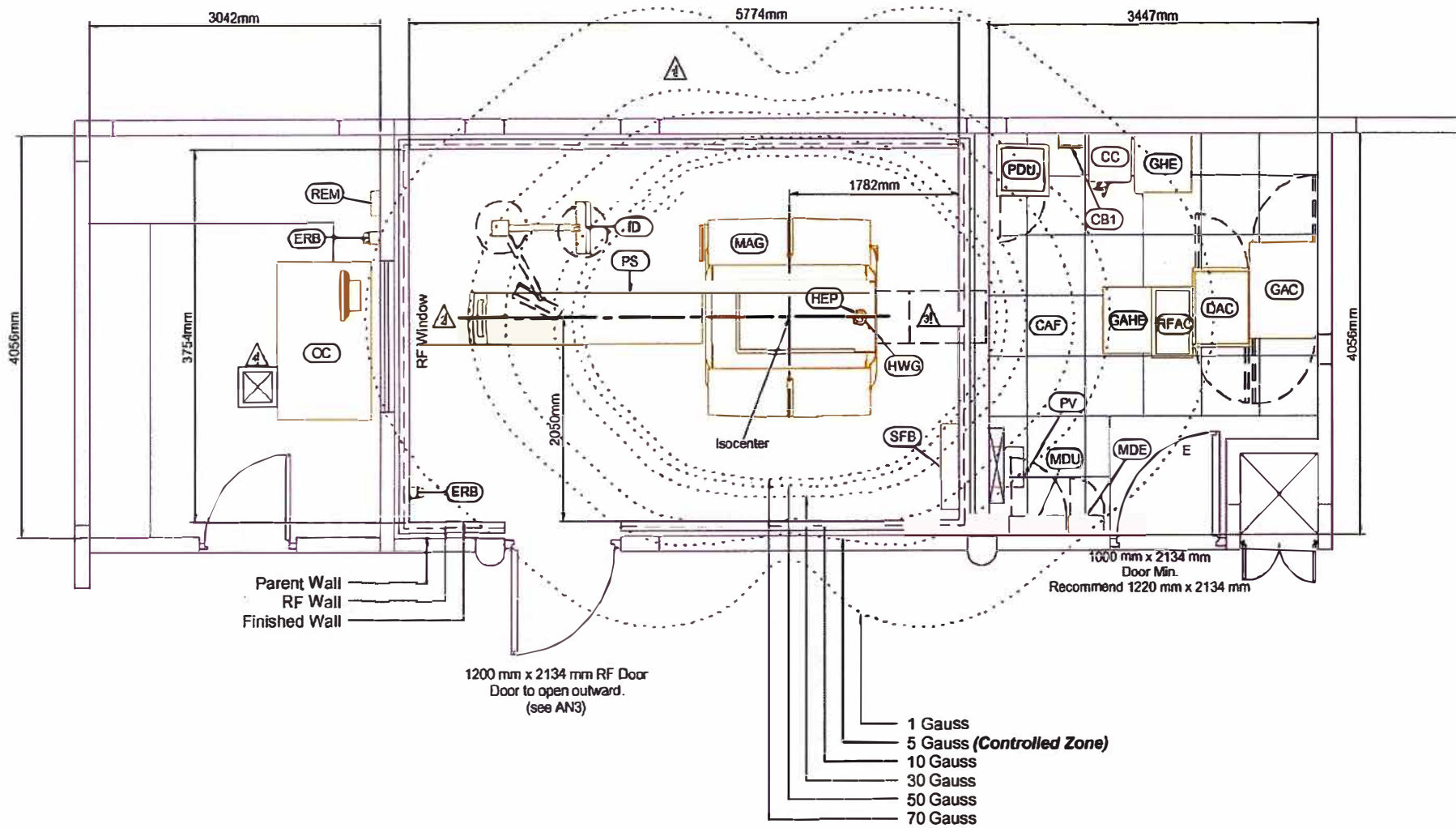


Figura C.1 Gráfico En Detalle del plano de distribución de un resonador magnético cerrado

Tabla C.1 Leyenda del plano de distribución del resonador magnético cerrado.

Equipment Designation	Description
OC	Operator's Console
ERB	Emergency Run-Down Button (1-ea. Cntrl & Exam)
MAG	Magnet Assembly
PS	Patient Support (MT)
SFB	System Filter Box with Covers
CB1	Circuit Breaker (for system)
PDU	Power Distribution Cabinet
MDU	Mains Distribution Unit
MDE	Mains Distribution Extended
GAC	Gradient Amplifier 271 Cabinet
DAC	Data Acquisition Cabinet
RFAC	RF Amplifier Cabinet (S28)
CH	Schreiber 1055 AC Chiller
CB2	Circuit Breaker (for Schreiber Chiller)
GAHE	Gradient Amplifier Heat Exchanger
GHE	Gradient Coil Heat Exchanger
CC	Cryocooler Compressor
RFSC	RF Coil Storage Cabinet
HEP	Helium Gas Exhaust Pipe (exam room only)
HWG	Helium Gas Exhaust Wave Guide
AC	Air Conditioner
HD	Helium Dewar (for Philips to refill magnet)
TSC	Tool Storage Cabinet
CAF	Computer Access Flooring (min. 6" clear space)
PV	Patient Ventilation
REM	Schreiber Chiller Remote Controller
ID	Interactive Display

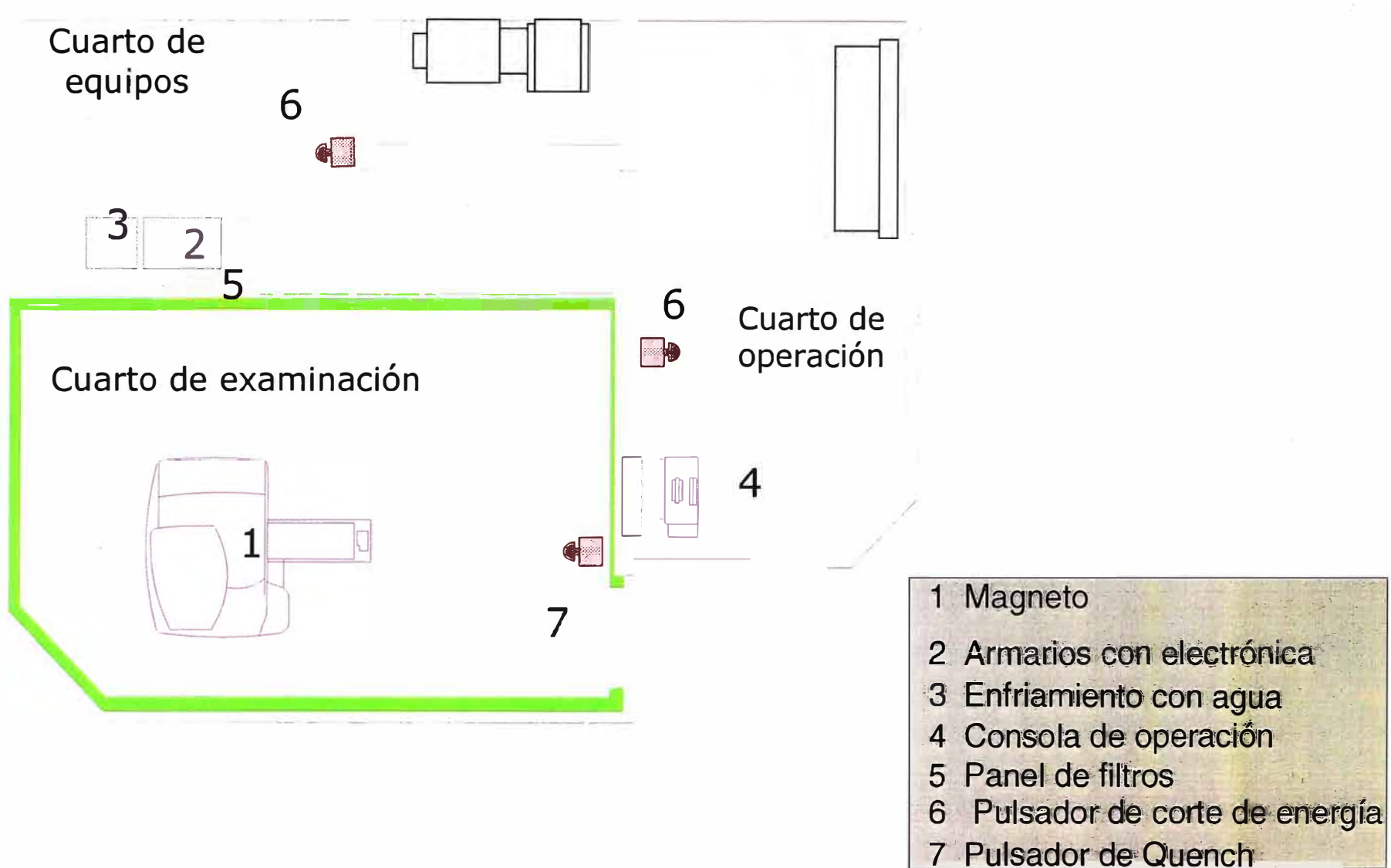


Figura C.2 Gráfico Simplificado de un resonador magnético cerrado

ANEXO D
GLOSARIO DE TERMINOS

- Antenas.- Bobinas de conductor dispuestas para recibir o emitir señales de radiofrecuencia.
- Artefactos.- Perturbaciones de la imagen de múltiples orígenes que se traducen en la aparición de falsas imágenes.
- Bobinas de gradiente.- Sistemas de bobina que permite generar un gradiente de campo magnético (La RM emplea tres sistemas de gradiente: x,y y z)
- Campo de vision o FOV (Field of View).- Superficie que cubre la imagen. Los campos de visión amplios, empleados en el estudio de cuerpo entero, miden alrededor de 42 cm de lado.
- Campo magnético.- Propiedad del espacio en la vecindad de un imán: Un dipolo sometido a un campo magnético sufrirá una torsión que lo alineará a lo largo de las líneas de campo.
- Corriente Eddy.- Corriente eléctrica generada por los conductores por el cambio de un campo magnético. Las variaciones de los gradientes codificadores también producen corrientes Eddy que perturban las corrientes útiles y generan artefactos en las imágenes. Se corrigen las corrientes Eddy indeseables mediante contrabobinas de gradientes periféricos o mediante corrientes compensadoras.
- Criogénico.- Líquido frío como helio o nitrógeno líquido empleado para mantener los imanes en estado superconductor.
- Ferromagnética.- Sustancia que posee gran susceptibilidad magnética, que se imanta cuando es sometida a la acción de un campo magnético y continúa imantada después. Causa artefactos en la imagen de RM.
- Gauss (G).- Unidad de inducción magnética. $1G = 10^{-4}$ Tesla. La magnitud del campo magnético terrestre es de 0.5G
- Homogeneidad.- Uniformidad del campo magnético. Se expresa en ppm (partes por millón) de un volumen determinado. Este parámetro es más crítico en espectrometría que en imágenes de RM.
- Jaula de Faraday.- Sistema conductor (por ejemplo placas de cobre) dispuesto alrededor de un objeto que se quiere aislar de su entorno electromagnético para que sobre el no actúen parásitos exteriores. La mayoría de los aparatos de RM se colocan dentro de una Jaula de Faraday que impide el paso de las ondas de RF (aunque no el campo magnético).
- Precesión.- Movimiento en forma de cono seguido por el eje de rotación de un giroscopio sometido a basculación (inclinación). La componente transversal de la precesión de la imantación es el origen de una señal de RM que puede medirse.

- Quench.- Palabra inglesa que define la pérdida de las condiciones de la superconducción de un imán: la bobina se torna bruscamente resistiva. Lo que comporta una liberación rápida de helio gaseoso en la sala de exploración.
- Relación señal/ruido.- Relación entre la intensidad de la señal estudiada y la desviación estándar del ruido de fondo. Cuanto mayor sea esta relación, mayor será la resolución de contraste de la imagen.
- Resonancia Magnética.- Fenómeno de interacción entre un campo electromagnético (u onda de radiofrecuencia de pulso W_r) y los núcleos atómicos (protones) sometidos a un campo magnético estático B_0 (que precesan el pulso W_0). Existe resonancia (absorción de energía de radiofrecuencia por parte del núcleo) cuando $W_r = W_0$.
- RF (Radiofrecuencia).- Campo magnético oscilante de alta frecuencia. Los pulsos empleados en RM se miden en MHz y duran de 1 a 10 ms. Su composición espectral (que puede controlarse por ordenador) permite generar pulsos gaussianos (que producen cortes tomográficos de bordes) o pulsos del tipo sen x/x . más apropiado para obtener cortes de borde claro.
- Señal de resonancia magnética.- Señal eléctrica recogida mediante una bobina receptora como consecuencia del movimiento de precesión de la imantación transversal (M_{xy}) de la muestra.
- Shim.- Palabra inglesa que designa la homogeneidad del campo magnético, que se optimiza con bobinas de shimming (ajuste de las corrientes que se hacen circular por estas bobinas)
- Superconducción.- Propiedad de determinadas aleaciones metálicas (por ejemplo niobio-titanio) que pierden toda resistencia cuando se les somete a temperaturas cercanas al cero absoluto (del orden de -269°C o 4°Kelvin).
- Tesla.- Unidad de inducción magnética ($1\text{T} = 10000\text{Gauss}$)

BIBLIOGRAFIA

1. Philips Medical Systems , “Preliminary site preparation document”, oficina de proyectos, 2007
2. B. Kastler, “Principios de RM – Manual de autoaprendizaje”, Masson – España,1997
3. Philips Medical Systems, “Basic Principles of MR Imaging”, Holland, 2002
4. J.W. de Jong, “GYROSCAN can be profitable!, a viability study for Latin America”, Philips Medical Systems - Holland, 2001
5. Ingeniería DICTUC – Área de Resonancia Magnética, “Manual de preinstalación Blindajes electromagnéticos”, Pontificia Universidad Católica de Chile, 2005
6. Ricardo G. Delabat, “Tecnología Radiológica”, editorial Paraninfo – España 1996
7. Bill Rostenberg, “The Architecture of Medical Imaging”, John Wiley & Sons – USA 2006
8. Philips Medical Systems, “Principios de la formación de imágenes”, Holland, 2005
9. Pilar Gallar, “La captura de lo invisible”, Asociación Española de técnicos en radiología, España – 2003
10. Brown, “MRI:Basic Principles and applications”, 3era edición, 2003
11. De Pablo C.,”Manual de Resonancia Magnética y TAC”, 1era edición, 2005
12. Francisco Javier Cabrero Fraile, “Imagen Radiológica: Principios físicos e instrumentación”, 2004
13. Stark D. D., “Resonancia Magnética”, Elsevier, 3era edición – 2000
14. Rodríguez – Gonzáles A), “Antenas superficiales para imágenes por resonancia magnética”, Rev Med IMSS 2005
15. Javier Lafuente, “Atlas de Tecnología de la Resonancia Magnética, Una explicación intuitiva”, Ed MallinckRodt, 2003
16. Siemens, “Manual de aplicaciones MAGNETOM Symphony”, Alemania – 2005
17. Carlos Fernandez Llatas, “Resonancia Magnética Nuclear”, INP – 2002
18. R. Velarde Mendez,”Magnetómetro de Resonancia Nuclear Magnética ”, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, México – 2007
19. Myer Kutz, “Standard Handbook of Biomedical Engineering & Design”, McGraw-Hills, 2003
20. Angela Cuervas Carvajal y Román Villegas Portero, “Resonancia Magnética con magnetos de 3 teslas”, Agencia de evaluación de tecnologías sanitarias de Andalucía, España - 2006