



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**ANÁLISIS Y MODELACIÓN DE BLINDAJE
ELECTROMAGNÉTICO PARA SALA DE
MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE
TRANSMISIÓN (T.E.M.)**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
MENCION ELÉCTRICA.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELECTRICÍSTA.

FELIPE IGNACIO RÍOS PÉREZ.

**PROFESOR GUÍA:
ARIEL VALDENEGRO ESPINOZA.**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
EFRAÍN ASENJO SILVA.
NELSON MORALES OSORIO.
MIGUEL SEGURA CARRASCO.
LUIS ORTIZ NAVARRETE.**

**SANTIAGO DE CHILE
MARZO DE 2009**

A mí padrino Marcelo Ríos y en especial a mis Abuelitos "Luis" y "Tere", quienes en su vida, enfermedad y muerte... me enseñaron a descubrir lo esencial para vivir con alegría, optimismo y perseverancia.

Agradecimientos Vol.1

A todos ellos... que aman en forma incondicional
Fortaleciendo mi alma y espíritu como ningún otro igual
A todos ellos... que nunca juzgan a los demás
A pesar que muchas veces no concuerden con su actuar
A todos ellos... que en cada instante hablan con la verdad
Mostrando con sus palabras su confianza y humildad
A todos ellos... que con sus voces me logran dar paz
Inundando por completo mi sangre cual droga eficaz
A todos ellos... que irradian de su bondad
Luz dulce de Septiembre que ilumina mi caminar
A todos ellos... que me supieron siempre aconsejar
Intentando que con ello no me fuera a equivocar
A todos ellos... que apoyan sin preguntar
Aunque a veces con angustia, paciencia ya lo sabrán!
A todos ellos... que con su cariño me pueden sanar
Rijamos juntos entonces y que esto no termine jamás
A todos ellos... que forman parte de mi largo andar
Inigualables 27 que ni siquiera alguien podría soñar
A todos ellos... que día a día me ayudaron a levantar
Ocasión justa es está para agradecerles antes de acabar
A todos ellos... que pese a las adversidades logran triunfar
Siempre a todos ustedes los habré yo de amar!.

Agradecimientos Vol. 2

En primer lugar quisiera agradecer a mis padres “Jaime y María Eugenia”...a mis hermanos “Sebastián y Fernando”... a mí cuñada “Mónica” y a mí madrina “Mari”, por estar siempre conmigo en las buenas y en las malas. En especial a mi madre, quién ha dedicado su vida entera sólo a sus hijos y esposo... incluso estando enferma, siempre alegre... siempre contenta... siempre recibiéndonos con un “bravo”.

Agradezco a Don Ariel, su calidez y consejos...las tardes en que me regaló largas conversaciones donde me transmitió siempre palabras muy sabias. Gracias por compartir conmigo su afición por la fotografía y mostrarme el mundo del comic... mil gracias por todo su apoyo incondicional, ya que sin él este trabajo no podría haber llegado a buen término.

Muchas gracias también a Don Miguel, quién siempre me ha apoyado y brindado una mano amiga cuando más la he necesitado. Sin su ayuda, la instalación del microscopio electrónico de transmisión no se hubiese podido realizar, al igual que todo el trabajo experimental expuesto en el presente documento. Por ende, también un agradecimiento muy especial lo dirigido a él.

Además quisiera agradecer a Don Efraín y a Don Nelson, quienes fueron (junto con Don Jorge Romo) las personas que me hicieron decidir mi especialidad dentro de eléctrica... gracias por ser tan buenos maestros, tan íntegros. Gracias por estar siempre con los estudiantes, y ser personas tan entregadas. Sin lugar a dudas, su ejemplo y enseñanzas estarán siempre en la retina y los corazones de todos quienes hemos pasado por alguno de sus cursos.

También le agradezco a Don Luis Ortiz, quién aceptó en forma muy entusiasta ser parte de mi comisión. Gracias por compartir conmigo sus años de experiencia y literatura. Es para mí un honor, el poder contar con su presencia y evaluación.

Finalmente, gracias a Gabriela... quien fue, es y será siempre, guía fundamental de mi vida. Gracias por tú paciencia, bondad, tú cariño y comprensión... te amo.

Me despido con una de las tantas enseñanzas que Don Ariel me entregó...

...¡Sursum corda!

Resumen.

El presente trabajo de Tesis surge motivado por la necesidad de efectuar una adecuada instalación, desde el punto de vista de Compatibilidad Electromagnética (EMC), del Microscopio Electrónico de Transmisión (TEM), adquirido por el proyecto MECESUP “Red Nacional de Programas de Doctorado en Ciencias de Materiales”, de manera tal que con este equipo se puedan realizar observaciones en todos sus modos de operación. Para conseguir este objetivo se efectuó un estudio acabado de la EMC existente entre el TEM y su entorno, lo cual implicó introducirse en un tema específico denominado “Blindaje Electromagnético”.

En esta Tesis se analiza, modela y propone, un blindaje electromagnético apropiado para el recinto que alberga en su interior al TEM. Dicho trabajo, se inicia con la recopilación bibliográfica necesaria para comprender el estado del arte en cuanto a los “Blindajes Electromagnéticos”, señalando: sus antecedentes (desde lo general a lo particular), fundamentos teóricos, tipos y técnicas de blindaje, etc. Luego, se presenta en detalle el “Método de los Momentos Modales – Modal/MoM” aplicado al caso de recintos rectangulares con aperturas también rectangulares, método con el cual se modeló en forma teórica el blindaje de la sala del TEM para diferentes casos. Dichos casos, a su vez, fueron resueltos utilizando un Software comercial denominado “FEKO”, con el cual se realizó el cálculo numérico de todos los problemas planteados. Los resultados obtenidos mediante la aplicación del MoM, fueron comparados con los resultados obtenidos mediante la aplicación de otros métodos más tradicionales, como por ejemplo: el método de elementos finitos (FEM) y el método de propagación de onda plana (PoOP).

Para dar validez empírica a los resultados obtenidos en forma teórica, se desarrolló una extensa etapa experimental utilizando un instrumento medidor de campos electromagnéticos de tipo triaxial denominado “EMDEX II”, lo que permitió determinar los requerimientos de “Efectividad del Blindaje - (S.E.)” necesarios para proteger al TEM de las diversas “Interferencias Electromagnéticas - (EMI)” del entorno. A su vez, dichos requerimientos permitieron concluir y proponer que, para este caso particular, resulta más conveniente un blindaje de “lámina simple con juntas tipo sándwich”.

ÍNDICE.

Glosario.....	8
Introducción.....	10
Objetivos.....	13
Generales.....	13
Específicos.....	13
Capítulo 1: Antecedentes.....	15
1.1 Estado del Arte en Blindajes Electromagnéticos.....	16
1.1.1 Sistemas de Blindajes Activos.....	16
1.1.2 Sistemas de Blindajes Pasivos.....	16
1.2 La necesidad de blindar.....	18
1.3 Lo que se debe Blindar.....	19
1.3.1 Ruido Térmico.....	20
1.3.2 Rayos.....	20
1.3.3 Ruido Atmosférico.....	22
1.3.4 Ruido Cósmico.....	23
1.3.5 Las Interferencias Electromagnéticas (EMI).....	24
1.3.6 Los Pulsos Electromagnéticos (EMP).....	25
1.4 TEMPEST.....	28
1.5 Blindaje de instalaciones versus equipos.....	29
Capítulo 2: Teoría del Blindaje.....	30
2.1 Concepto de “Blindaje Generalizado”.....	30
2.2 Mecanismos de Blindaje.....	32
2.2.1 Blindaje de Campos Estáticos.....	32
2.2.1.1 Blindaje Eléctrico.....	32
2.2.1.2 Blindaje Magnético.....	34
2.2.2 Blindaje de Campos Variables en el Tiempo.....	42
2.2.2.1 Conceptos generales.....	42
2.2.2.2 Efecto Pelicular y Profundidad pelicular.....	44
2.2.2.3 Propagación de Ondas Planas (PoOP).....	46

Capítulo 3: Análisis y Modelación del Blindaje de la Sala TEM.....	53
3.1 Análisis del Blindaje Generalizado.	53
3.1.1 Determinación del campo eléctrico alrededor de un conductor.....	54
3.1.2 Determinación del campo magnético alrededor de un conductor.	61
3.2 Análisis del Blindaje EM de la Sala TEM mediante MoM.....	68
3.2.1 Formulación del Problema.....	68
3.2.1.1 Campo Electromagnético al exterior del Blindaje.....	73
3.2.1.2 Campo Electromagnético al interior del Blindaje.....	77
3.2.1.3 Derivación de Ecuaciones Integrales y Sistema Matricial.	87
3.2.2 Elección del material adecuado para efectuar el blindaje.	89
3.2.3 Efectividad del Blindaje mediante MoM del material escogido.....	90
3.2.4 Efectividad del Blindaje Sala TEM para el caso ideal.	97
Capítulo 4: Medidas de campo magnético en la Sala TEM e inmediaciones.	103
4.1 Medidor de Campos Electromagnéticos EMDEX II.	104
4.1.1 Características del EMDEX II.	107
4.1.2 Especificaciones de Hardware del EMDEX II.	107
4.2 Medidas de Campo Magnético.....	109
4.2.1 Medidas iniciales de campo magnético en la Sala TEM.	110
4.2.2 Medidas de campo magnético iniciales en las inmediaciones de la Sala TEM.	121
4.2.3 Medidas de campo magnético en la Sala TEM post- blindaje generalizado.....	129
4.3 Obtención S.E. _B empírica del Fierro Silicoso M-4.	136
Capítulo 5: Diseño del Blindaje Electromagnético recomendado para la Sala TEM.	140
5.1 Consideraciones críticas en el blindaje arquitectónico.....	141
5.2 Sistema de Blindaje con Junturas Tipo Sándwich.	142
5.3 Procedimiento de Instalación.	150
5.4 Control de las filtraciones de EMI por orificios en los blindajes.....	152
5.4.1 Puertas en el blindaje de la Sala TEM.....	153
5.4.2 Sistemas de aire acondicionado.....	159
5.4.3 Circuitos de alumbrado y fuerza.	161
Capítulo 6: Discusión de los resultados.....	164
6.1 Resultados específicos.	164
6.1.1 Blindaje parcial de la Sala TEM.....	164
6.1.2 Método de los Momentos y blindaje de capa múltiple.....	180

6.2	Discusión de Resultados Globales.....	187
6.2.1	Metodología y Procedimiento de Diseño de Blindajes Pasivos.....	188
6.2.2	Materiales de Alta Conductividad vs Ferromagnéticos.....	191
Capítulo 7: Conclusiones.....		195
Bibliografía.....		202
ANEXO A.....		205
Anexo A-1	Extracto especificaciones técnicas TECNAI F20 UT.....	206
Anexo A-2	Rendimiento de diversos tipos de blindajes.....	220
Anexo A-3	Espectro electromagnético completo.....	224
ANEXO B.....		226
Anexo B-1	Conductividad y Permeabilidad relativa de materiales.....	227
Anexo B-2	Tablas de constantes físicas.....	229
ANEXO C.....		233
Anexo C-1	Cálculo de algunas transformadas de Fourier y expresiones reducidas.....	234
Anexo C-2	Detalle de los parámetros del sistema $[A][X]=[B]$	238
Anexo C-3	Experimentación con pintura de galvanizado en frío.....	243
Anexo C-4	Curvas de efectividad del blindaje de diversos materiales.....	250
Anexo C-5	Extracto de la ficha técnica del Fierro Silicoso de Grano Orientado M-4.....	255
Anexo C-6	Análisis del blindaje electromagnético de la Sala TEM mediante PoOP.....	260
ANEXO D.....		268
Anexo D-1	Medidas de campo en la Sala TEM e inmediaciones – Estado inicial.....	269
Anexo D-2	Contrastación de la S.E. _B de dos láminas ferromagnéticas diferentes.....	281
ANEXO E.....		285
Anexo E-1	Planos de diseño del blindaje electromagnético Sala TEM.....	286
Anexo E-2	Efectividad del blindaje proporcionado por una C.A.G.....	298

Glosario.

CAD	Computer Aided Design (Diseño Asistido por Computador).
CENELEC	Comité Europeo de Normalización Electrotécnica.
CISPR	Comité Internacional de Perturbaciones Radioelectrónicas.
ELF	Extremely Low Frequencies (Frecuencias Extremadamente Bajas).
EMC	Electromagnetic Compatibility (Compatibilidad Electromagnética).
EMI	Electromagnetic Interferences (Interferencias Electromagnéticas).
EMP	Electromagnetic Pulse (Pulso electromagnético).
EMU	Electromagnetic Unit (Unidad Electromagnética – 6×10^{18} electrones/seg).
EPROM	Erasable Programmable Read Only Memory.
FCC	Federal Communications Commission (Comisión Federal de Comunicaciones).
FDTD	Finite Difference Time Domain (Método de Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo).
FEM	Finite Element Method (Método de los Elementos Finitos).
ICNIRP	International Commission on Non- Ionizing Radiation Protection (Comisión Internacional para la Protección Contra las Radiaciones No Ionizantes).
IEC	International Electrotechnical Commission.
LINDA	Linear Data Acquisition (Sistema de adquisición lineal de datos). Es un accesorio del EMDEX II, que consiste en una rueda a la cual se adjunta el instrumento, la cual permite mapear superficies gracias a que ingresa los registros en función de la distancia (la cual calcula a razón del perímetro que recorre la rueda). La dirección y el sentido, es captada gracias a que posee una brújula electrónica.
MLFMM	Multilevel Fast Multipole Method (Método Multipolar Multinivel Rápido).
Modo EDX	Modo en el cual el microscopio electrónico de transmisión logra hacer un barrido de rayos- X por sobre la muestra, obteniendo un completo análisis de los elementos que componen dicha muestra.
Modo S- TEM	Modo en el cual el microscopio electrónico de transmisión logra obtener imágenes en ultra alta resolución. Rango de magnificación que va desde 200x hasta 100 Mx, y una resolución máxima de 0.14 nm.

Modo TEM	Modo normal de trabajo del microscopio electrónico de transmisión, en el cual logra obtener imágenes de alta resolución, pero solo con una magnificación que va desde 60x hasta 1 Mx, y una resolución de 9nm.
MOP	Margin of Protection (Margen de Protección).
MoM	Método de los Momentos.
NEMP	Nuclear Electromagnetic Pulse (Pulso Electromagnético Nuclear).
NIL	Noise Immunity Level (Nivel de inmunidad al ruido).
NRPB	National Radiological Protection Board (Junta Nacional de Protección Radiológica).
OMS	Organización Mundial de la Salud.
PO	Physical Optics (Física Óptica).
PoOP	Teoría de la Propagación de Ondas Planas.
RCM DOOR	Recessed Contact Mechanism Door (“Puerta de Mecanismos de contactos en receso” o “Puerta con contactos tipo cuchillo”).
RF	Radio Frecuencias.
RFI	Radio Frequencies Interferences (Interferencias de radio frecuencia).
RMS	Root Mean Square (Valor cuadrático medio).
SALA TEM	Sala del Microscopio Electrónico de Transmisión.
SE	Shielding Effectiveness (Efectividad del Blindaje).
SE_E	Shielding Effectiveness – Electric Field (Efectividad del Blindaje con respecto al Campo Eléctrico).
SE_B	Shielding Effectiveness – Magnetic Field (Efectividad del Blindaje con respecto al Campo Magnético).
TEM	Transmission Electron Microscope (Microscopio Electrónico de Transmisión).
UTD	Uniform Theory of Diffraction (Teoría de la Difracción Uniforme).
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik Informationstechnik (Asociación de Ingenieros Eléctricos Alemanes).

Introducción.

Es posible afirmar que el estudio de la compatibilidad electromagnética (EMC¹) es una “vieja ciencia joven”. Esto último, ya que el problema de las interferencias de radio frecuencia (RFI) se originó casi 100 años atrás con el uso de las ondas de radio como un medio de comunicación, por lo tanto es una ciencia relativamente vieja. Sin embargo, es solo en los últimos 20 a 25 años que el progreso en el cálculo numérico y las computadoras ha permitido a científicos e ingenieros no solo proponer modelos al fenómeno físico subyacente en conjunto con las interferencias, sino que les ha permitido utilizar dichos modelos para lograr un mejor entendimiento y visualización del fenómeno, y como consecuencia de aquello, mitigar los efectos producto de las interferencias electromagnéticas.

Todas las instalaciones eléctricas, independientes de su dimensión, son fuentes de campos eléctricos y magnéticos de frecuencias denominadas “extremadamente bajas (ELF)”. A consecuencia de ello, en los últimos años el interés en los efectos que los campos de estas frecuencias podrían tener en la salud de las personas ha aumentado, puesto que además existe una gran preocupación respecto de la posible asociación entre dichos campos y algunas enfermedades. A modo de ejemplo, se ha sugerido que las líneas eléctricas, entre otras formas de energía, podrían producir o contribuir al cáncer u otras alteraciones biológicas o químicas en los seres humanos debido a los campos eléctricos y magnéticos que conllevan.

Material biológico expuesto a frecuencias de emisión extremadamente altas por tiempos breves, podría resultar eventualmente con algún tipo de daño, ya que la serie de ondas correspondientes son capaces de romper moléculas (radiaciones tipo “ionizantes”, como por ejemplo los rayos X). Sin embargo, para el caso de los campos electromagnéticos asociados con instalaciones eléctricas pertenecientes al grupo “ELF” es poco probable que, con tiempos breves de exposición, sean del tipo ionizantes.

Como consecuencia de todo aquello, se ha desarrollado desde hace ya varias décadas y a lo largo de todo el mundo, entidades especializadas en el tema y extensos programas de investigación al respecto. Entre las entidades más destacadas se encuentran:

¹ Ver los conceptos y definiciones de las palabras abreviadas en el “Glosario” adjunto.

- La Organización Mundial de la Salud (OMS), a través de su programa “The International Electromagnetic Fields Project” o “Programa EMF”.
- La Comisión Internacional para la Protección Contra las Radiaciones No Ionizantes (ICNIRP).
- Y el National Radiological Protection Board (NRPB).

Todas ellas, han desarrollado estudios epidemiológicos y experimentos de laboratorio “in vitro” e “in vivo”, sin embargo una cantidad no menor de dichos estudios ha demostrado que la evidencia empírica no es suficiente, entendiéndose por lo tanto que las demostraciones de laboratorio y epidemiológicas no son concluyentes. Es decir, a pesar del enorme esfuerzo financiero y humano para encontrar respuestas veraces en cuanto al daño provocado por los campos electromagnéticos, todavía no se ha podido dilucidar cuáles serían los efectos en los seres humanos.

El presente trabajo de Tesis, surge motivado por la necesidad de llevar a cabo la instalación de un Microscopio Electrónico de Transmisión (TEM) en el Zócalo del Edificio de Geología de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Para ello será necesario realizar un estudio previo de los campos electromagnéticos existentes en dicha locación, para luego poder: analizar, modelar, diseñar y finalmente sugerir una solución de blindaje óptimo de las interferencias electromagnéticas (EMI), que afectan el correcto funcionamiento del microscopio.

Cabe señalar también, que hasta la fecha no existen estudios o trabajos previos relacionados con el tema del “Blindaje Electromagnético” en nuestro país. Por lo tanto, y pese a que la génesis del presente estudio sea: “lograr buscar solución a un tema específicamente puntual”, también se pretenden sentar ciertas bases fundamentales para poder generar trabajos de investigación futuros en ésta tan hermosa área de carácter más técnico, denominada “Compatibilidad Electromagnética – (EMC)”, la cual hoy por hoy se encuentra sin ser lo suficientemente explotada en nuestro país.

A consecuencia de lo anteriormente señalado, la información disponible al respecto es de difícil acceso, bastante escasa y se encuentra dispersa a través de: journals, technical reports, conference papers y algunos libros bastante específicos (y no menos costosos) que solo se encuentran fuera del país. Es por ello que se intentará condensar en las páginas siguientes la

mayor cantidad posible de información relacionada con este trabajo, facilitando de alguna manera los desarrollos futuros en este tema.

En pro de la culminación exitosa de lo anteriormente señalado, es preciso contar con una metodología clara la cual fijara el Norte del presente trabajo de investigación en todo momento.

Dicha metodología utilizada, se puede resumir como sigue a continuación:

- Búsqueda y recopilación de antecedentes generales y específicos al respecto.
- Evaluación inicial del estado del arte en cuanto a la compatibilidad electromagnética y las técnicas de blindajes electromagnéticos.
- Análisis, modelamiento y simulación del blindaje electromagnético a ser aplicado en la Sala TEM.
- Evaluación de la magnitud de los campos magnéticos en que se encuentra inicialmente la Sala TEM, con el fin de poder analizar dicha información y poder determinar si es necesario un tratamiento previo del entorno de la sala, antes de aplicar algún tipo de blindaje mediante láminas ferromagnéticas.
- Diseño del blindaje electromagnético propuesto para la Sala TEM.
- Discusión de los resultados.
- Conclusiones.

Objetivos.

Generales.

Como uno de los objetivos generales, se pretende lograr sentar una base sólida para los futuros trabajos de investigación en el mismo tema. Pudiéndoles brindar a éstos, un documento que condense entre sus páginas un contundente espectro bibliográfico, el cual resulta de mucho valor puesto que existe una gran carencia de dicho material en las bibliotecas universitarias nacionales o de países vecinos.

Por otra parte, el tema de la compatibilidad electromagnética y en especial los blindajes electromagnéticos, son un campo nuevo de estudios para nuestro país. Chile carece de normativas nacionales vigentes con respecto a los niveles de campos electromagnéticos permisibles para los seres humanos². Por lo cual, es sin duda alguna un tema de “interés nacional” el poder comenzar a desarrollar estudios de investigación ligados con el tema, y es justamente con el presente trabajo de Tesis que se pretende dar surgimiento a una veta de explotación permanente de investigaciones futuras dentro del área técnica que compone la ingeniería eléctrica en energía y potencia de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, dando inicio a investigaciones ligadas al blindaje electromagnético, como por ejemplo: los beneficios de su aplicación, técnicas de blindaje, modelamiento de campos electromagnéticos, desarrollo computacional de los modelos y simulación virtual ellos, desarrollo de equipos electrónicos de blindaje activo, trabajo y estudio empírico con las propiedades magnéticas de los materiales, desarrollo de un hand- book en el cual se describan curvas de blindaje típicas, etc. Además cabe señalar que dichos estudios serán posibles de realizar, ya que la facultad cuenta con un instrumento de medición de campos electromagnéticos de tipo “Triaxial”.

Específicos.

Como objetivo específico principal, se pretende dar solución al problema puntual del relativamente elevado nivel de campos magnéticos que existe en la Sala TEM. Se intentará

² Por lo general, en Chile se consideran las respectivas normas internacionales para hacer indicaciones con respecto al tema.

disminuir dichos campos hasta niveles que no interfieran con el correcto funcionamiento del microscopio electrónico de transmisión (TEM), puesto que en la condición inicial en la cual se encontraba la sala, la imagen obtenida con el microscopio resultaba seriamente afectada.

Además se busca presentar y desarrollar en forma teórica, el denominado: “Método de los Momentos – (MoM)”. Con dicho método innovador, es posible modelar y calcular los niveles de campos electromagnéticos resultantes al interior y exterior de un recinto rectangular el cual posee aperturas (también rectangulares) en sus muros. Posteriormente, se desarrollará en forma práctica el cálculo de la efectividad del blindaje electromagnético de la Sala TEM mediante MoM, gracias a la simulación a través de un software computacional de enorme potencial denominado “FEKO”. El uso de dicho software en el área docente como también en investigación y desarrollo, sin duda alguna puede ser de inmensa ayuda, en virtud de las múltiples opciones de cálculo y fácil operatividad que éste brinda, gracias a la programación gráfica del problema que requiere ser resuelto, lo cual lo hace muy amigable a nivel de usuario.

Capítulo 1: Antecedentes.

El presente trabajo de Tesis, surge motivado por la necesidad de llevar a cabo la instalación de un Microscopio Electrónico de Transmisión (TEM) en el zócalo del edificio de Geología de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Dicho microscopio TEM está diseñado para ofrecer una investigación de imágenes y análisis verdaderamente universal para las ciencias biológicas, de los materiales, la nano- tecnología y las industrias de semiconductores y almacenamiento de datos.

La investigación fundamental dentro del ámbito de la biología celular, estructural, nano- tecnología y de materia blanda, requiere que se investigue a nivel atómico. Los microscopios electrónicos de transmisión son extremadamente importantes para obtener información en dos y en tres dimensiones de alta resolución y gran aumento sobre células y orgánulos o incluso de componentes celulares más pequeños. Por ende, orientado a las tecnologías sub- 90 nm, el equipo Tecnai está configurado para la mayor producción de imágenes en modo “S-TEM” y reduce el costo por muestra, sin afectar el rendimiento, en los modos “S-TEM”, “TEM” y “EDX”³.

Al posibilitar la obtención de imágenes de ultra alta resolución, análisis y caracterización, el microscopio electrónico de transmisión Tecnai F20 Ultra Twin, adquirido gracias al Proyecto MECESUP “Red Nacional de Programas de Doctorados en Ciencias de los Materiales”, ofrece una solución completa para el análisis de defectos y fallos (de características únicas en América Latina). Además, se transforma en una herramienta fundamental para el desarrollo de la investigación y la docencia a nivel nacional.

Sin embargo, para obtener tales imágenes de ultra alta resolución, es necesario cumplir con una serie de requerimientos en el ambiente en cual se encuentra embebido el TEM en cuanto a: niveles de humedad, temperatura, vibraciones, luminosidad e interferencias electromagnéticas⁴. Precisamente con el fin de controlar éste último factor es que surge la necesidad de investigar distintos mecanismos de blindaje de la sala que albergará al TEM, pudiéndose al final de este trabajo contar con una solución pensada “a la medida”, de control de los niveles de campo magnético que interfieren con la correcta operación del microscopio.

³ Ver Glosario.

⁴ Para un completo detalle ver: “Anexo A-1: Extracto especificaciones técnicas TECNAI F20 UT”.

1.1 Estado del Arte en Blindajes Electromagnéticos.

El uso de blindajes electromagnéticos se ha vuelto algo común en nuestro creciente ambiente repleto de señales electromagnéticas. Por ende, dos sistemas básicos de blindaje han sido desarrollados por la industria en la actualidad: los Sistemas de Blindajes Activos y los Sistemas de Blindajes Pasivos.

1.1.1 Sistemas de Blindajes Activos.

En general estos sistemas son relativamente nuevos, y consisten en una serie de sensores de campo magnético⁵ los cuales, en tiempo real, van adquiriendo los niveles de campo magnético ambientales para llevarlos luego hacia un computador central. Este computador central, mediante un esquema de control de lazo cerrado, genera una respuesta de salida, la cual va controlando los niveles de corriente que circulan por una serie de bobinas compensadoras de campo, ubicadas en posiciones estratégicas del recinto a ser blindado. Tal campo inducido en las bobinas de compensación, es el encargado de cancelar el campo no deseado y por ende logra blindar de un modo “activo” las EMI.

1.1.2 Sistemas de Blindajes Pasivos.

Comúnmente estos sistemas de blindajes consisten en la utilización de láminas metálicas, las cuales se emplean en la fabricación de lo que usualmente se conoce como “Jaulas de Faraday”.

En la actualidad se puede encontrar dos sistemas principales de blindajes pasivos desarrollados por la industria: los “Recintos modulares o de abrazaderas”, y los “Recintos estructurales de acero soldado”. Éstos últimos, a diferencia de los modulares, por su complejidad han de ser construidos “in situ”. Por otra parte, dentro del área de los recintos modulares, es posible encontrar las siguientes sub- categorías de blindajes [2]:

- Recintos blindados modulares de acero galvanizado con zinc.
- Sistemas de blindajes de aislación doble.
- Blindajes modulares de doble capa.

⁵ Para observar los diversos tipos de sensores y aplicaciones, ver referencia [1].

- Sistemas de apantallamiento de lámina simple.

En el área de los recintos estructurales de acero soldado, existen tres sub- categorías principalmente. Éstas nacen a raíz del tipo de técnica empleada para soldar una lámina a la otra, y son las siguientes [2]:

- Blindajes Soldados con “Pan Technique”.
- Blindajes en donde se emplea la técnica “Butt Welded Sheets”
- Blindajes en donde la técnica de soldadura se llama “Lap Welded Sheets”.

Solo unas pocas alternativas a los dos tipos básicos han surgido en los últimos años, a modo de ejemplo la alternativa más notable fue el “Sistema de Papel de Aluminio” desarrollado por la National Security Agency como lo describe en su especificación detallada la NSA 73-2A. Sin embargo, la necesidad de blindajes se ha vuelto tan extensa que un sinnúmero de compañías ha desarrollado una variedad de recintos blindados de “lámina simple”, que hoy en día representan sistemas ampliamente utilizados y disponibles entre numerosas pequeñas compañías alrededor de todo el mundo.

Una nueva clase de recintos blindados son aquellos en los cuales el blindaje se construye al interior de los muros del recinto, estos son los denominados “Blindajes Arquitectónicos”. Hoy en día estos se dividen en [2]:

- Blindajes con papel de aluminio.
- Recintos blindados con hojas de Cobre.
- Recintos blindados con aleaciones de Cobre.
- Sistema de blindaje de juntas tipo sándwich.
- Sistema “INSTAR” de blindaje.

Generalmente, este tipo de blindajes se emplea cuando los proyectos están recién comenzando y se proyectan en conjunto con toda la edificación, puesto que quedan embebidos en la estructura propiamente tal. Por ende, requieren ser muy bien detallados en sus especificaciones y planos, puesto que cualquier error implicaría una gran pérdida de tiempo y económica⁶.

⁶ Para ver el rendimiento de alguno de los principales tipos de blindajes (como por ejemplo: modulares, soldados y arquitectónicos), dirigirse al “Anexo A-2: Rendimiento de diversos tipos de blindajes”.

1.2 La necesidad de blindar.

La necesidad por blindar ha evolucionado con las radio comunicaciones desde sus comienzos, pero desde la segunda guerra mundial ésta se hizo fundamentalmente crítica con el incremento explosivo de equipos electrónicos en casas, oficinas e industrias. Los avances tecnológicos de las distintas ciencias han eliminado muchas tareas de nuestra existencia diaria, pero también han añadido nuevos problemas como lo son las interferencias electromagnéticas (EMI). A modo de ejemplo a continuación se puede encontrar una serie de casos comprobados de las consecuencias de las interferencias [3]:

- Un avión militar se estrelló tras volar cerca de un transmisor de radar de alta potencia.
- Teléfonos móviles causantes de interferencias en los aparatos de los hospitales.
- Sistemas de cierre de puertas de vehículos con mando a distancia que quedaron inhabilitados al estar cerca de los transmisores de una comisaría de policía en Inglaterra.
- La pantalla de un computador corrompió el texto que en ella se estaba visualizando debido a los campos magnéticos generados por un tren subterráneo... etc.

Como se aprecia en los ejemplos anteriores, se debería haber tomado precauciones para combatir estos efectos indeseables. Por ejemplo, el Departamento de Sanidad de Inglaterra ha prohibido el uso de teléfonos móviles en hospitales, al igual que las autoridades aéreas en los aviones comerciales. No obstante, algunos de los problemas de interferencias de radiofrecuencia (RFI) en los hospitales, han sido provocados debido a que los equipos más antiguos pueden tener inmunidad insuficiente a niveles de campo relativamente bajos. Dichos equipos, con la aplicación de las Leyes actuales, no podrían ser comercializados hoy en día en la Unión Europea.

En todos los hogares, se dispone de dispositivos que evitan ciertas tareas, la mayoría de los cuales funciona con electricidad. Todo tipo de transmisión y comunicación, incluidos el almacenamiento y manipulación de datos, utiliza la corriente eléctrica en una forma u otra. Así que, al igual que cuando una persona habla provoca un impacto en el entorno introduciendo "ruido" acústico, el uso de la electricidad también tiene un impacto en lo que nos rodea.

Si dos personas están intentando conversar en una habitación en cuyo exterior hay alguien trabajando con un taladro neumático, tendrían dificultades para entenderse aunque hablen a un nivel superior al ruido exterior. Así, se pone de manifiesto que dos actividades o sistemas

totalmente diferentes y sin relación alguna pueden provocar interferencias aunque nunca hayan tenido intención de conectarse directamente de ninguna forma. De hecho, el oído humano tiene un espectro de detección que va entre las frecuencias situadas entre los 100Hz y los 20kHz, y la sensibilidad de respuesta es distinta en las diferentes frecuencias de ese rango, por ende las frecuencias que se encuentren fuera de ese rango no provocarán ninguna interferencia. Para poder observar de modo gráfico la sensibilidad del oído humano, ver la figura 1.1.

A consecuencia de todo aquello, hoy en día es tan necesario blindar y está siendo practicado tanto por: los gobiernos, militares, privados, industrias e instalaciones médicas, como por los laboratorios de investigación y desarrollo.

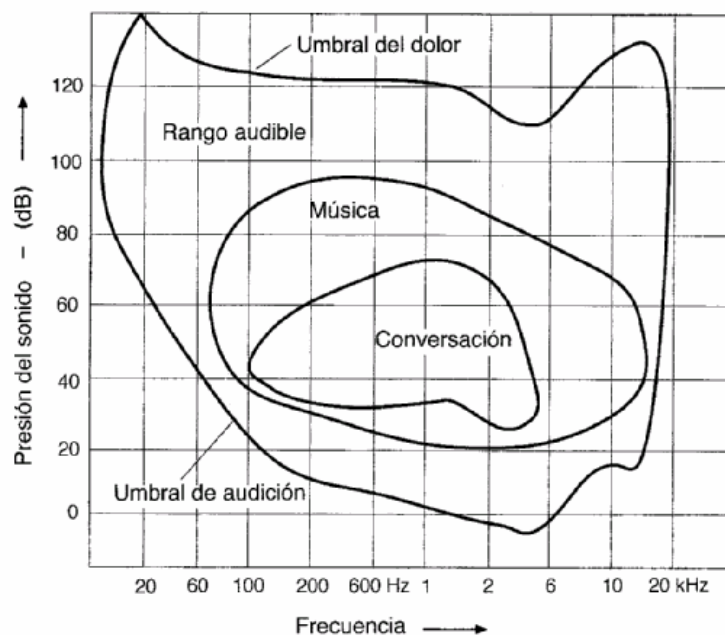


Figura 1.1: Sensibilidad del Oído Humano [3].

1.3 Lo que se debe Blindar.

Los blindajes tienen dos grandes objetivos por cumplir: prevenir las interferencias o ruidos provenientes de circuitos electrónicos que puedan causar mal funcionamiento de equipos y prevenir al ser humano de exposiciones continuas a campos magnéticos fuertes que podrían llegar a ocasionarle algún daño.

El diseñador a cargo de las especificaciones del blindaje, deberá considerar a priori una serie de fuentes de interferencias y amenazas para luego poder especificar ciertos “requerimientos”

del blindaje para una determinada instalación. Entre estos requerimientos deberá cubrir un determinado “espectro de frecuencias” (como se ha visto anteriormente)⁷, y se deberá tomar en cuenta: fuentes locales, luminarias, pulsos electromagnéticos y sensores de alta sensibilidad, a la hora de determinar el perfil de eficiencia que poseerá el blindaje.

De dicha forma, a continuación se describen en detalle las fuentes de orígenes naturales y humano de interferencias electromagnéticas de mayor importancia, las cuales son posibles de encontrar con mayor frecuencia en la vida cotidiana.

1.3.1 Ruido Térmico.

Una corriente eléctrica puede ser definida como un flujo unidireccional de electrones. Una unidad electromagnética (EMU) es aproximadamente igual a 6×10^{18} electrones por segundo. No obstante, a cualquier temperatura superior al cero absoluto (-273° C) los electrones de cualquier sustancia o gas están en un movimiento continuo aleatorio tanto en dirección como en amplitud, de forma que si el movimiento del electrón es equivalente a una corriente eléctrica, el movimiento aleatorio del electrón significa que se ha creado una señal electromagnética. Luego, el valor RMS de la corriente depende de la temperatura, dicho efecto se conoce como “ruido térmico”, ruido de Johnson o ruido de Nyquist. Aunque también se le denomina, sobre todo en el espectro de audio como “ruido blanco”, término acuñado porque se puede demostrar que la luz blanca está compuesta por todos los colores del espectro visible, y cada color desde el rojo hasta el violeta tiene su propia frecuencia.

1.3.2 Rayos.

Otra fuente natural de interferencias eléctricas son los rayos. Los rayos son provocados por una acumulación de cargas estáticas en las nubes, que cuando alcanza el potencial suficiente con respecto a la tierra, rompe el aislamiento del aire y origina una descarga de chispas. No obstante, los mecanismos reales de creación de los rayos son más complejos, ya que la descarga puede ser de nube a nube, entre nubes y luego a tierra o de tierra a nube, pudiendo constar de múltiples descargas y ser de polaridad negativa o positiva con respecto a tierra.

⁷ Para ver el espectro electromagnético completo, dirigirse al “Anexo A-3: Espectro electromagnético completo”.

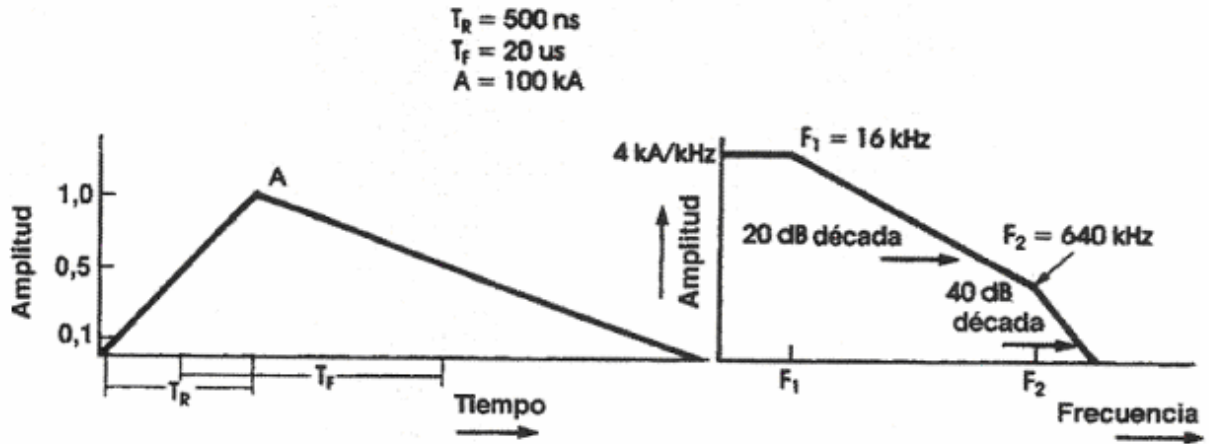


Figura 1.2: Forma de onda y espectro para un impulso de rayo [3].

El más común se describe como un golpe descendente negativo, pero a veces surge un golpe positivo, u ocurre un pre- golpe que sube de las cimas de las montañas o de los edificios altos para encontrarse con el flujo negativo descendente. La forma de onda y espectro generalmente aceptados para un impulso de rayo de 100kA se muestra en la figura 1.2.

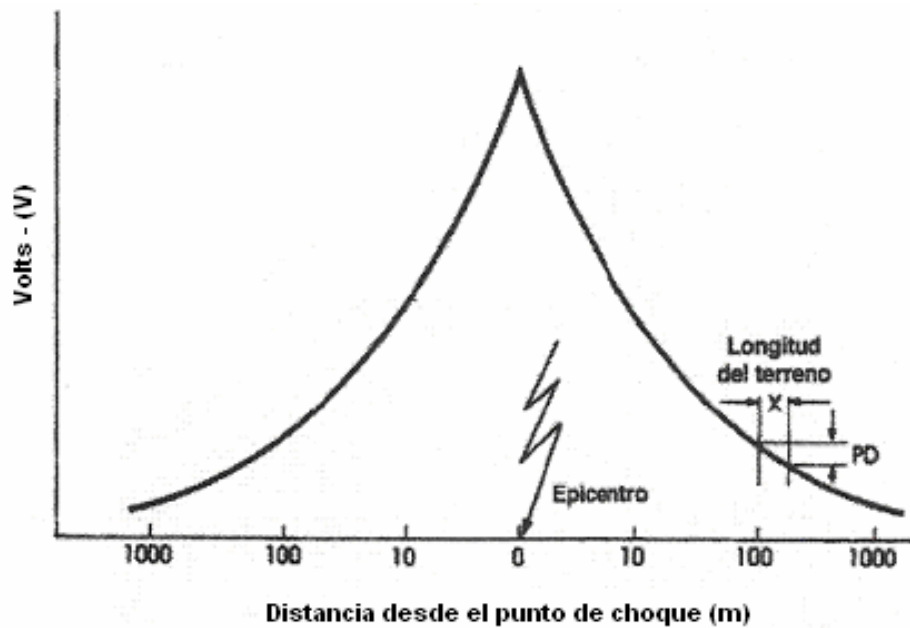


Figura 1.3: Potencial de choque de un rayo [3].

La corriente de una descarga de rayo puede ser del orden de 3-300kA. En torno al 1% es de 100kA o más, mientras que alrededor del 80% excede los 50kA. La descarga queda disipada en el área de terreno que rodea al punto de choque. Como el terreno tiene una resistencia intrínseca a las propiedades de la materia que conforman dicho terreno, se desarrollará un potencial entre dos puntos cualesquiera de la superficie del terreno incluso a cierta distancia del punto de choque. Este potencial se muestra en la figura 1.3, en la que se supone que la corriente de choque es de 100kA y la resistividad de la tierra es de 1000 Ω m (lo cual representa el peor de los casos posibles).

En la figura 1.3 se puede ver que puede existir un potencial apreciable entre dos puntos cualesquiera del terreno, de forma tal que si dos sistemas están colocados en diferentes lugares y después son conectados para propósitos de comunicaciones, una señal de interferencia inducida por un rayo será inyectada en los sistemas. Este potencial de la tierra, P_E , viene dado por la ecuación (1.1) indicada a continuación [3]:

$$P_E = \frac{\rho \cdot I}{2\pi} \cdot \left(\frac{1}{D} - \frac{1}{D+X} \right) \quad (1.1)$$

Donde:

ρ : resistividad de la tierra (Ω m).

I : Corriente del Choque (A).

D : Distancia del punto de Choque (m).

X : Separación de los extremos del terreno (m).

Como ejemplo, nótese que si las conexiones a tierra de un sistema se han realizado en dos puntos separados a una distancia de 10m y a 1 km del punto cero del choque, existirá un potencial de 158V entre ellos, que será inyectado como un transitorio de interferencia en el sistema.

1.3.3 Ruido Atmosférico.

Las tormentas eléctricas y los rayos crean campos electromagnéticos bajo las capas ionizadas que rodean la tierra. Dichos campos, cubren un amplio espectro de frecuencias y su intensidad varía en diferentes momentos del año y en función de la situación geográfica.

1.3.4 Ruido Cósmico.

Los fenómenos extraterrestres, como las manchas solares, crean rayos cósmicos que entran en la atmósfera exterior de la tierra y colisionan con las partículas atmosféricas, provocando una dispersión del ruido de bajo nivel sobre un amplio espectro de frecuencias, llegando a un máximo cada once años. Estos diversos campos magnéticos de origen natural se muestran en la figura 1.4.

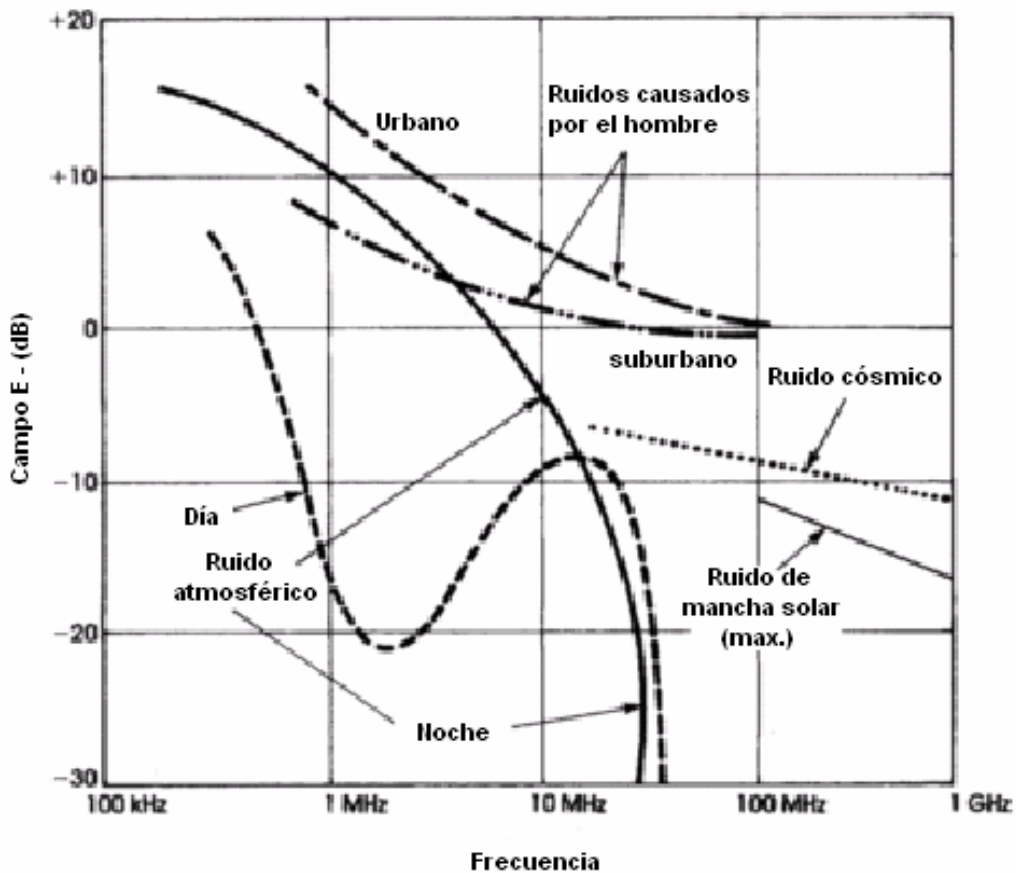


Figura 1.4: Diversos espectros de los ruidos [3].

Con la creciente cantidad de equipos eléctricos que existen en la industria y los hogares, así como los ruidos provenientes de la ignición de los vehículos, el ruido urbano provocado por el hombre se ha incrementado en él área urbana en unos 20dB en la última década, lo cual corrobora la *urgente necesidad de un control de las interferencias electromagnéticas*.

1.3.5 Las Interferencias Electromagnéticas (EMI).

Las interferencias electromagnéticas pueden ocurrir a través de la conducción de interferencia o de la radiación de ésta. Cuando hablamos de conducción de la interferencia, hablamos de aquella que se transmite a través de las líneas de poder, las redes de datos, puestas a tierra, líneas telefónicas o simplemente a través de las conexiones entre la fuente y el equipo alimentado. A continuación, la Tabla 1.1 muestra algunos de los tipos de fuentes que comúnmente generan interferencias.

Fuentes	Espectros
Contactos de un Interruptor de Poder	10 - 20 MHz
Líneas de Comunicaciones	0.1 - 25 MHz
Líneas de Poder	1 - 25 MHz
CPU de computador tipo	50 kHz - 20 MHz
Efecto Corona	0.1 - 10 MHz
Lámparas Fluorescentes	0.1 - 3 MHz
Aires Acondicionados	50 kHz - 25 MHz
Armadura de un motor	2 - 4 MHz
Lámparas de Mercurio	0.1 - 1 MHz
Fuentes Switching	0.5 - 25 MHz
Aspiradoras	0.1 - 1.0 MHz

Tabla 1.1: Fuentes de Interferencia Conducida [2].

Como se puede observar en la tabla anterior, el espectro de conducción se extiende en un amplio rango de frecuencia, el cual es controlado a través del correcto blindaje y aterrizamiento.

Por otro lado cuando hablamos de “Interferencia Radiada”, nos referimos a cualquier interferencia transferida a través del espacio por un campo magnético. El grado de interferencia, es una función directamente proporcional a la energía con la cual abandona la fuente, a las pérdidas al propagarse por los distintos medios, al grado de acoplamiento y a la susceptibilidad⁸ características del medio.

⁸ La susceptibilidad magnética es el grado de magnetización de un material o medio, en respuesta a un campo magnético. Se representa por el símbolo “ χ ”, y no tiene dimensiones.

1.3.6 Los Pulsos Electromagnéticos (EMP).

La explosión de un arma nuclear provoca la emisión de energía de rayos X, rayos gamma (γ), neutrones y electrones, así como los efectos más familiarmente conocidos de calor y ráfagas, todo lo cual ocurre en pocas millonésimas de segundos. Desde el punto de vista de la compatibilidad electromagnética (EMC), no obstante, son los rayos gamma los más significativos, ya que tienen el efecto de producir un flujo de electrones de alta velocidad causando un pulso electromagnético de corta duración o alta energía, a veces conocido como pulso electromagnético nuclear (NEMP).

Existen diferencias entre los efectos de una explosión a nivel de suelo o cerca de él y los de una explosión que ocurre a unos 35 km de la superficie de la tierra. La primera se llama ráfaga ENDO- atmosférica y la segunda se llama ráfaga EXO- atmosférica, resultando en ENDO- EMP y EXO- EMP, respectivamente (ver figura 1.5).

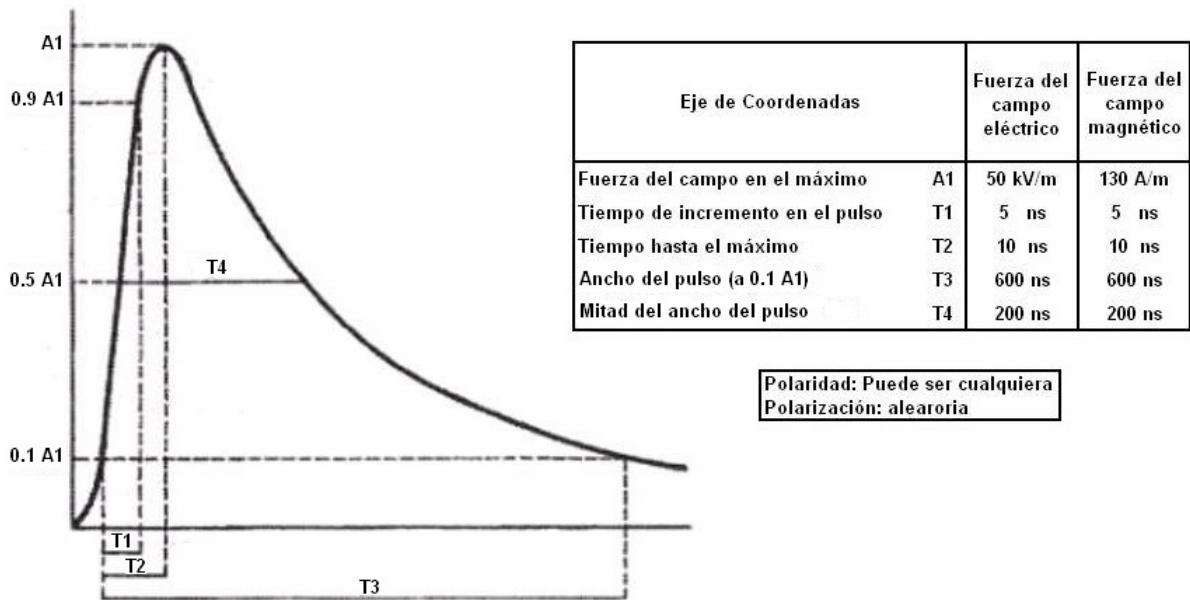


Figura 1.5: Forma de pulso EXO- atmosférico [3].

A grandes altitudes, la interacción de los rayos gamma con las capas de absorción de la atmósfera terrestre produce un flujo mayor de electrones, incluidos los producidos por las emisiones de Compton, de forma que existe un gran flujo de corriente sobre un área extensa de la tierra. Esto provoca un fuerte campo electromagnético sobre el área iluminada de la superficie de la tierra (cuanto mayor sea la ráfaga, mayor será la superficie iluminada de la tierra). La intensidad del campo es de 50.000 V/m y 130 A/m, cuya energía se expande sobre un espectro que varía desde varios kHz hasta los 100MHz, tal como se observa en la figura 1.6.

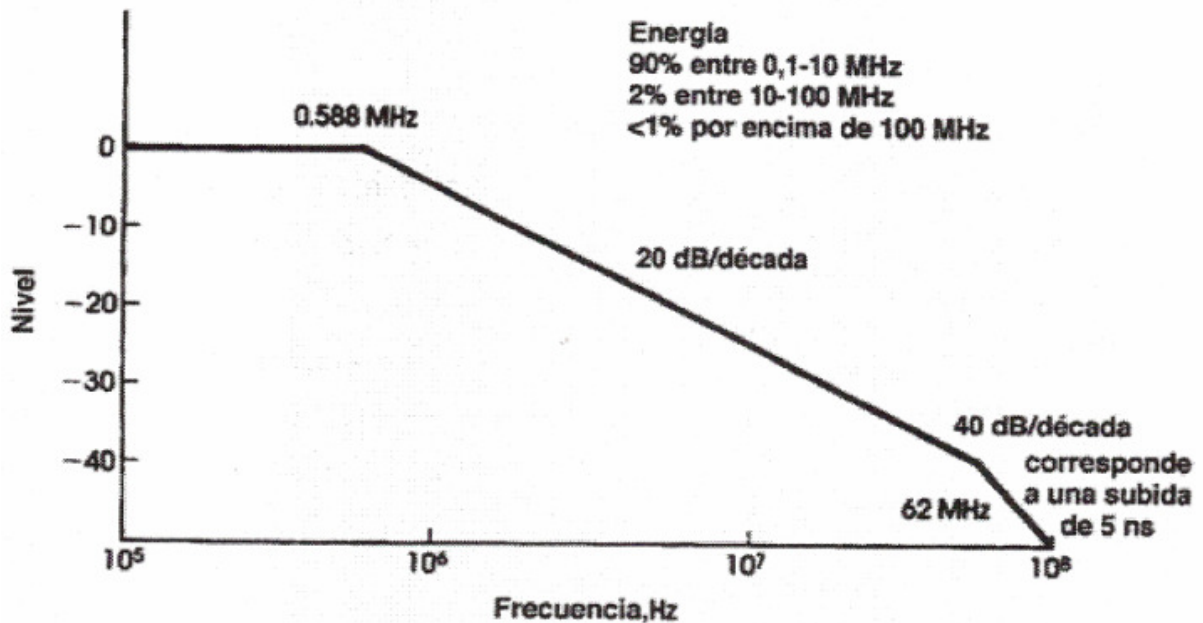


Figura 1.6: Espectro de ráfagas EXO- EMP [3].

Para hacerse una idea de lo devastador que puede ser un pulso de este tipo, un receptor de radio es normalmente capaz de detectar unos pocos microwatts de potencia, y $1\mu\text{W}$ provoca un campo de unos 20mV/m, por lo que el EMP resulta en un pulso que es un millón de veces mayor y puede dañar irreparablemente los circuitos electrónicos sensibles. El problema es mayor, ya que este campo se extiende sobre una parte muy grande de la superficie de la tierra si la explosión es lo suficientemente alta. Esto se muestra en la figura 1.7, donde el efecto de una explosión a 500km por encima del Mar del Norte crea serios daños en lugares tan alejados de ahí como el Sur de España y el Norte de Noruega.

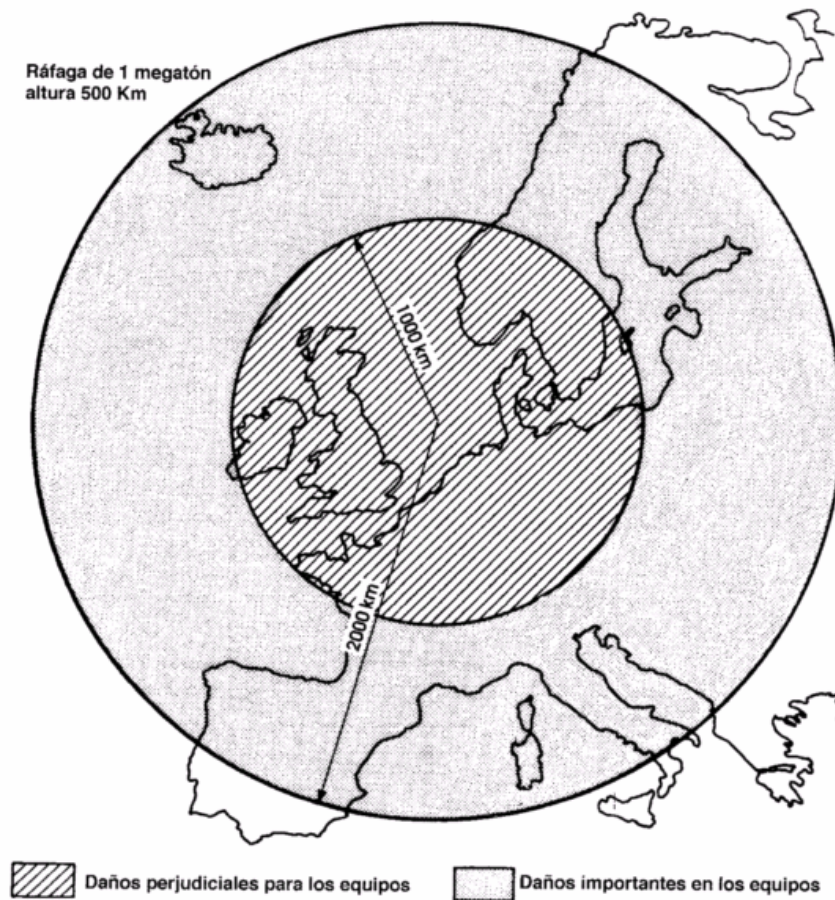


Figura 1.7: Ráfaga EXO- EMP a 500km por encima del Mar del Norte [3].

El escenario equivalente en América se muestra en la Figura 1.8. Aquí, los efectos serían importantes en toda la anchura de los Estados Unidos (unas 3.000 millas), a menos que los equipos e instalaciones estuvieran “adecuadamente protegidos”. Se dice que, durante las pruebas de bombas realizadas en el Pacífico, el sistema telefónico de Hawai, a 1.000 millas de distancia, quedó interrumpido.

Debido a los efectos de expansión, se cree que en una futura guerra nuclear se podría organizar un evento EXO para reducir las capacidades de comunicación del enemigo. Por esta razón, muchos equipos de defensa militar y civil son diseñados para sobrevivir a los efectos de los EMP. Una opción es incluir instalaciones completas en habitaciones apantalladas, ya que esto permite desplegar equipos comerciales no protegidos contra EMP en un entorno seguro.



Figura 1.8: Ráfaga EXO- EMP sobre Estados Unidos [3].

1.4 TEMPEST.

A raíz del espionaje electrónico de información clasificada, y de la posible falla de equipos a causa de un evento EXO- atmosférico tanto en la industria como en la milicia, los gobiernos de los principales países Europeos y Estados Unidos han establecido un programa conjunto entre ellos y las industrias, para fijar los estándares de emisiones de los equipos de procesamiento de información clasificada. Esto es lo que generalmente se conoce con el nombre del programa "TEMPEST". El cual comprende un elaborado compendio de información, que ha sido dispuesto por los gobiernos para controlar las emisiones de los equipos. Por ende, hoy en día existe un gran número de computadoras personales disponibles con la certificación TEMPEST. Sin embargo, cuando existe un gran número de éstos, es común encerrarlos todos al interior de habitaciones blindadas cuyas eficiencias varían acorde con las necesidades previamente establecidas, y van desde los 30dB a los 120dB.

1.5 Blindaje de instalaciones versus equipos.

Debido al gran número de equipos electrónicos disponibles hoy en día, de los cuales gran parte usa circuitos digitales, la probabilidad de sufrir el efecto de interferencias electromagnéticas ha crecido al punto en que las agencias gubernamentales de todas las grandes naciones industriales, han encontrado necesario especificar los límites de las emisiones de la mayoría de los equipos electrónicos comerciales. En Estados Unidos, dichos límites son establecidos por la FCC⁹ (Ver figura 1.9). Por consiguiente, todos los equipos comerciales deben cumplir con dichos niveles de radiación. Estos niveles cumplen con la finalidad de evitar la interferencia a equipos vecinos, pero no para evitar el espionaje. Sin embargo (como se indicó en el punto 1.4), el gobierno de Estados Unidos ha establecido una lista con otros estándares conocidos como los requerimientos TEMPEST. Dichos requerimientos son de carácter confidencial, y solo son accesibles a quienes trabajan en el área y les es necesario saberlo. Pero tales requerimientos son muy rigurosos, y por consiguiente encarecen considerablemente los proyectos. Por lo cual, si existen muchos equipos a ser usados en una oficina, industria u hospital, es bueno considerar el blindaje completo de la instalación, más que a cada equipo, a causa del costo que implica el recambio por la re-certificación TEMPEST.

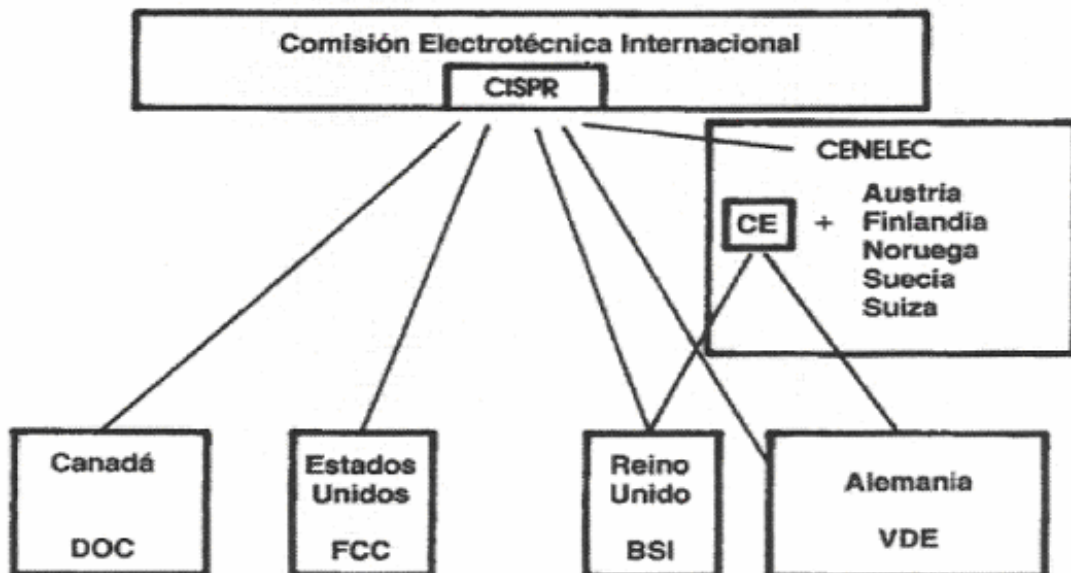


Figura 1.9: Autoridades Reguladoras a nivel mundial [3].

⁹ Para ver el significado de las siglas más importantes, buscar en el glosario.

Capítulo 2: Teoría del Blindaje.

Cuando se habla de “Blindaje”, se hace referencia a un modo efectivo de prevenir interferencias electromagnéticas indeseables. Sin embargo, como una componente de protección o sistema, éste es solo uno de muchos factores a considerar a la hora de crear un concepto completo y efectivo de protección, puesto que se debe tener en consideración no solo al entorno y sus propiedades electromagnéticas, sino que también los requerimientos del usuario y la misión del sistema.

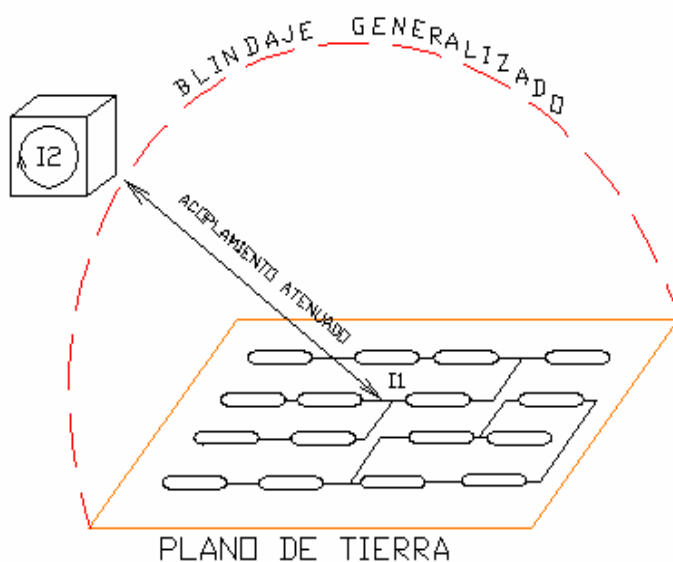
Las limitaciones y defectos en los blindajes electromagnéticos se encuentran dadas por las aperturas que puedan existir en éste, tales aperturas son inevitables puesto que siempre existe la necesidad de penetrar el blindaje con: cables, cañerías, accesos peatonales, sistemas de aire acondicionado, etc. Luego, estas penetraciones proveen en gran medida la mayor degradación del blindaje electromagnético.

En este capítulo, se dará una presentación de los principios generales del blindaje, incluyendo la discusión de las propiedades de algunos materiales comúnmente utilizados y el impacto que las aperturas antes señaladas ejercen sobre el blindaje. Para ello se comenzará viendo el concepto global de “Blindaje Generalizado”, para luego dar paso a los conceptos más particulares de blindaje, pudiéndose responder al final del capítulo la interrogante sobre la dependencia del blindaje con respecto a: la distancia, el tamaño del blindaje, la frecuencia, el grosor y las propiedad de los materiales, etc.

2.1 Concepto de “Blindaje Generalizado”.

El término “Blindaje Generalizado” [4], representa una extensión del concepto tradicional de blindaje. Es así, como se debe entender por “Blindaje Generalizado”, al área fronteriza que representa el límite entre el acoplamiento de dos o más circuitos, es decir, tal frontera divide el espacio en áreas en cuyo interior no existirá acoplamiento entre circuitos. Por ende, no necesariamente habría que asociar el blindaje con una superficie metálica identificada, ya que la idea del concepto de “Blindaje Generalizado” es que simplemente ningún lado se comunique con el otro, o (para ser realistas, pues ya se ha hecho notar que ningún blindaje es perfecto) que el acoplamiento existente entre circuitos sea menor a un cierto valor máximo permisible.

Como un ejemplo de Blindaje Generalizado que limita el acoplamiento sin necesidad de que exista una pantalla metálica propiamente tal, considérense dos antenas polarizadas perpendicularmente una de otra. El campo eléctrico generado por una de las antenas, es perpendicular al generado por la otra. De este modo, si una de las antenas es girada o un objeto reflectante se sitúa cercano a éstas, la configuración cambia y el Blindaje Generalizado desaparece. Dicho ejemplo es muy claro, pues nos permite observar que el concepto de Blindaje Generalizado describe las “Condiciones de Acoplamiento” y no es una forma de “Blindaje Físico”, pudiéndose alcanzar una reducción del acoplamiento combinando adecuadamente una serie de factores como: la distancia, frecuencia, posición de las fuentes y el uso de los planos de tierra como se puede observar en la figura 2.1.



El Blindaje Generalizado puede ser ilustrado con la ayuda del Plano de Tierra. El acoplamiento entre conductores situados cercanos al Plano de Tierra y un circuito situado lejos de estos, está limitado a causa de la proximidad de dichos conductores con el Plano de Tierra. La explicación física, es que el campo eléctrico del circuito lejano es perpendicular al producido por los conductores paralelos al Plano de Tierra, y por ende existe un mínimo acoplamiento entre ambos aunque no exista un blindaje físico que encapsule a los conductores. A esto se le suele llamar “Blindaje Generalizado”.

Figura 2.1: Blindaje Generalizado.

Todos los Blindajes prácticos pueden ser vistos como “Blindajes Generalizados” en cierta medida, ya que estos siempre poseen imperfecciones tales como: ventanas, filtraciones en los marcos de las puertas, rejillas de ventilación, etc. Sin embargo el correcto funcionamiento de éstos está ligado directamente a que dichas aperturas sean pequeñas en concordancia con la frecuencia del campo que se desea blindar.

2.2 Mecanismos de Blindaje.

Como se ha señalado, en el área del electromagnetismo el concepto de “Blindaje” puede tener distintos significados dependiendo de las circunstancias. Es así como a continuación se presenta una descripción de diversos blindajes, dependiendo del mecanismo electromagnético que lo origina y sus características.

2.2.1 Blindaje de Campos Estáticos.

2.2.1.1 Blindaje Eléctrico.

Es posible blindar un campo electrostático utilizando mecanismos bastante sencillos. La denominación corriente que recibe este tipo de blindaje es la de “Jaula de Faraday”, en honor al físico experimental inglés que en el año 1830 descubrió la inducción electromagnética. Como lo indica la figura 2.2, el blindaje electrostático surge a raíz de que las cargas eléctricas en la superficie de los metales tratan de distribuirse a si mismas de modo de cancelar el campo eléctrico al interior del metal. Por ende, de existir un vacío o volumen encerrado al interior del metal, éste estará protegido del campo eléctrico exterior.

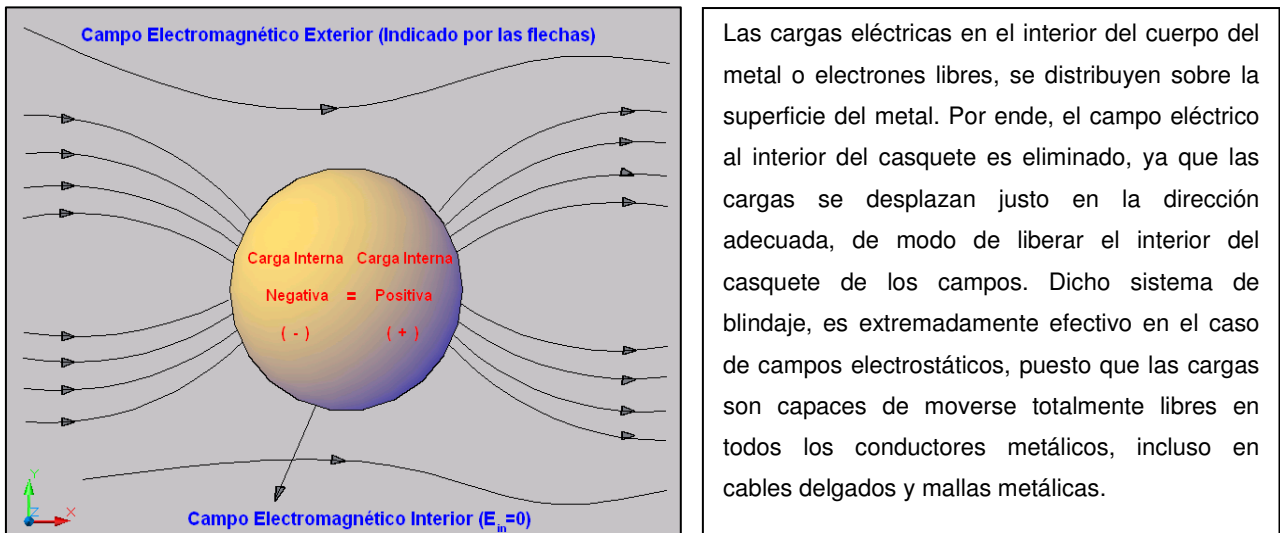


Figura 2.2: Blindaje de un campo electrostático.

Cabe señalar que al interior de los materiales conductores las cargas eléctricas son completamente móviles, incluso en láminas o papeles metálicos extremadamente delgados, las cargas móviles están presentes en suficiente cantidad como para proveer un blindaje efectivo de los campos externos gracias a que dichas cargas se distribuyen a si mismas de modo de cancelar el campo eléctrico al interior del metal.

De existir orificios en el blindaje, parte del campo eléctrico externo influirá en su interior a causa de la penetración del blindaje. Para entender el mecanismo, es bueno recordar que las líneas de campo eléctrico corren entre las cargas de distinta polaridad y simbolizan la fuerza entre las cargas. Las líneas de campo que ingresen a través de los orificios del blindaje, tendrán un efecto en las cargas al interior, pero si es que ningún objeto conductor se sitúa en las vecindades del orificio, las líneas de campo eléctrico se doblarán y terminarán en el blindaje, tal como se puede observar en la figura 2.3. Lo cual nos indica que el blindaje aún continúa siendo un modo de protección efectivo para los componentes al interior de éste.

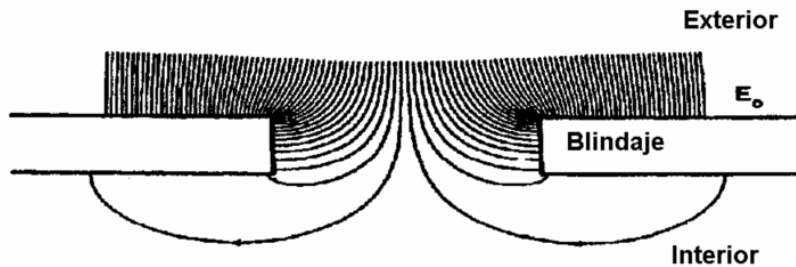


Figura 2.3: Comportamiento del campo eléctrico en las cercanías de un orificio, en un Blindaje Electroestático [5].

El blindaje se verá deteriorado en un cierto volumen alrededor del orificio, pero a la distancia de unos cuantos diámetros del orificio, el campo se irá debilitando en relación con el cubo de la distancia, ya que en el caso de grandes distancias “r” de un orificio circular de diámetro “d”, la magnitud del campo Eléctrico está dada por la ecuación (2.1) [6]:

$$|E| \approx \frac{E_o}{6\pi} \cdot \left(\frac{d}{r}\right)^3 \quad (2.1)$$

En donde E_o representa a la componente normal del campo eléctrico no perturbado incidente.

Dicha ecuación, señala que la atenuación del campo será superior a los 40dB a una distancia de solo 2 diámetros del orificio. Por ende lo importante, si el blindaje posee una o más aperturas, es localizar los equipos sensibles lejos de dichas aperturas, para poder proporcionar un blindaje electrostático efectivo.

2.2.1.2 Blindaje Magnético.

El campo magnetostático es extremadamente difícil de blindar. Una razón física básica para esto sería la asimetría en las ecuaciones de Maxwell, las cuales nos indican que existe una diferencia fundamental entre los campos Eléctricos y Magnéticos. Las cuatro ecuaciones de Maxwell están dadas por:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (2.4)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.5)$$

Como se puede observar en la “Cuarta Ecuación de Maxwell” (ecuación 2.5), el campo magnético “carece” de una fuente equivalente de cargas eléctricas ρ , las cuales generarían el campo eléctrico en concordancia con la “Tercera Ecuación” de Maxwell (ecuación 2.4). En otras palabras, no existen “cargas magnéticas”. Por ende, si son las cargas eléctricas las que se reordenan de modo de producir el blindaje eléctrico efectivo (como hemos mencionado anteriormente), es natural que en la ausencia de sus análogas para el caso del campo magnético, el blindaje magnético sea mucho más débil. Por lo tanto, solo es posible obtener un blindaje magnetostático de los materiales ferromagnéticos, cuyas permeabilidades magnéticas son relativamente altas en comparación con la del vacío. Existen cinco elementos que son ferromagnéticos a temperatura ambiente: el Hierro, Níquel, Cobalto, Gadolinio y Terbio. Los óxidos y aleaciones de estos elementos también son ferromagnéticos. En el caso de otros metales no-ferromagnéticos como: el Manganeso, Cobre y Aluminio, también pueden formar

aleaciones ferromagnéticas puesto que podrían actuar como hogar del material ferromagnético “huésped” en ellos.

Luego, si nos detenemos un poco más en las ecuaciones de Maxwell notamos que para un campo **magnetostático**, la ecuación (2.3) queda¹⁰:

$$\nabla \times \vec{H} = 0 \quad (2.6)$$

Y “ \vec{B} ” esta relacionado a “ \vec{H} ” a través de:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.7)$$

En donde “ μ ” es la permeabilidad magnética. Luego, la ecuación (2.6) hace posible que:

$$\vec{H} = -\nabla\Phi \quad (2.8)$$

En donde “ Φ ” recibe el nombre de “Potencial Magnético”. Y a partir de las ecuaciones (2.5), (2.7) y (2.8) podemos llegar finalmente, tomando en cuenta que “ μ ” es constante, a la siguiente ecuación:

$$\nabla^2\Phi = 0 \quad (2.9)$$

La ecuación anterior se conoce como la “Ecuación de Laplace”, y es necesario resolverla junto con las condiciones de borde para B y H de modo de asegurar continuidad de los campos tangenciales al pasar de un medio a otro de distinta permeabilidad, para determinar la distribución de campo magnético en el espacio.

A modo de ejemplo, veamos el Blindaje Magnetostático producido por un casquete esférico cuyos radios externos e internos están dados por R_1 y R_2 como es posible observar en la figura 2.4 descrita a continuación:

¹⁰ En el caso más general en el cual la región de interés contiene una densidad de corriente volumétrica, el campo “H” es descrito por un Potencial Vectorial. Sin embargo, en el caso que se está analizando no existe corriente y por ende $J=0$, lo cual permite la representación de “H” a través de un Potencial Escalar.

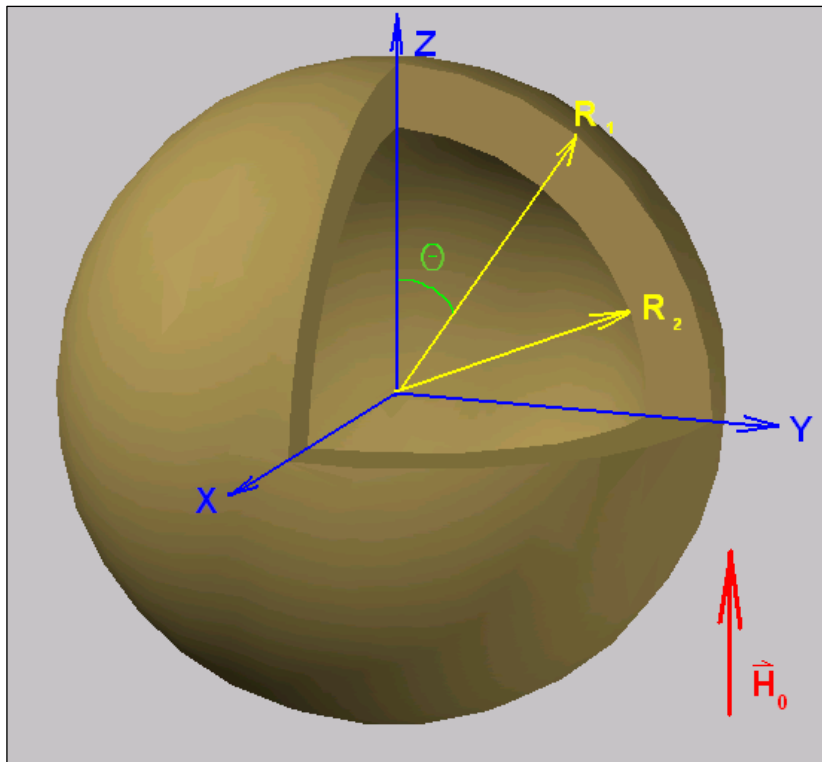


Figura 2.4: Casquete esférico de permeabilidad magnética μ , situado en un campo uniforme de magnitud H_0 .

Resolviendo la ecuación de Laplace (tomando coordenadas esféricas), la solución será de la forma:

$$\Phi_0 = \left(-H_0 R + \frac{I_0}{R^2} \right) \cdot \cos(\theta) \quad R > R_1 \quad (2.10)$$

$$\Phi_1 = \left(-H_1 R + \frac{I_1}{R^2} \right) \cdot \cos(\theta) \quad R_1 > R > R_2 \quad (2.11)$$

$$\Phi_2 = -H_2 R \cdot \cos(\theta) \quad R_2 > R \quad (2.12)$$

En donde I_0 , H_1 , I_1 y H_2 han de ser determinados a partir de las condiciones de borde en términos de H_0 . Ya que tanto los potenciales magnéticos Φ 's como sus derivadas ($\mu \partial \Phi / \partial R$) deben ser funciones continuas en $R = R_1$ y $R = R_2$. Con ello se tiene un sistema de 4 ecuaciones y 4 incógnitas, que puede ser resuelto algebraicamente. De este modo, es posible expresar el campo magnetostático "H" al interior del casquete como:

$$H_2 = \frac{H_0}{1 + \frac{2}{9} \cdot \frac{(\mu - 1)^2}{\mu} \cdot \left(1 - \frac{R_2^3}{R_1^3}\right)} \tag{2.13}$$

Dicha ecuación, da origen a un concepto fundamental dentro del área del blindaje denominado “Relación de Blindaje” o “Shielding Ratio”, el cual suele denotarse por S_i (2.14):

$$S_i = \frac{H_2}{H_0} \tag{2.14}$$

La forma en que varía la “Relación de Blindaje” con la permeabilidad, se indica en la tabla 2.1 y en la figura 2.5, para diversos valores de R_2/R_1 . Tal información señala que para $\mu = 1000$, R_2/R_1 deberá ser de 0.8 o menor, para obtener un campo al interior del casquete de menos del 1% del campo exterior aplicado.

$\mu \backslash R_2/R_1$	0,9	0,8	0,4	0,0
1	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
5	0,83843	0,74238	0,60038	0,58442
10	0,67213	0,53237	0,37247	0,35714
50	0,25695	0,16110	0,09101	0,08568
100	0,14488	0,08599	0,04676	0,04390
500	0,03227	0,01818	0,00956	0,00896
1000	0,01637	0,00916	0,00479	0,00449
5000	0,00331	0,00184	0,00096	0,00090

Tabla 2.1: Relación de Blindaje Magnético S_i para un casquete esférico.

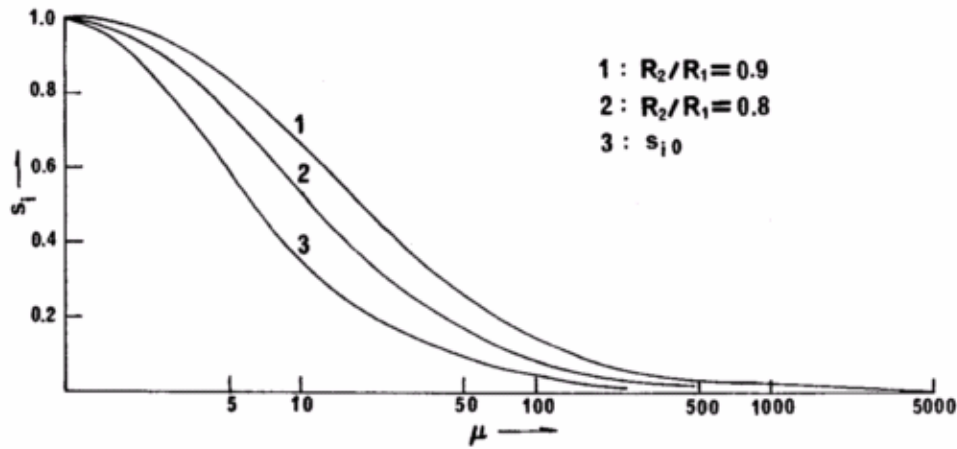


Figura 2.5: Variación en la Relación de Blindaje “ S_i ”, para un casquete esférico a medida que aumenta la permeabilidad magnética [7].¹¹

Es claro de la figura anterior, que la efectividad del blindaje nunca podrá ser menor que el valor mínimo dado por S_{i0} definido en el límite cuando $R_2/R_1 \rightarrow 0$, es decir, de la ecuación (2.13):

$$S_{i0} = \frac{1}{1 + \frac{2}{9} \cdot \frac{(\mu - 1)^2}{\mu}} = \frac{9\mu}{(2\mu + 1)(\mu + 2)} \tag{2.15}$$

La ecuación anterior resulta importante ya que provee de un límite en el efecto del blindaje, para un cierto valor de la permeabilidad μ de algún material específico. Por otro lado, de la ecuación (2.13) se desprende también que si el material del blindaje no es magnético, $\mu = 1$. Con lo que se tendría que $H_2 = H_0$. Y que para una lámina delgada de espesor $\Delta = b - a$ de un material altamente magnético ($\mu \gg 1$), el campo interno se puede aproximar por:

$$H_2 = \frac{H_0}{1 + \mu \cdot \left(\frac{2\Delta}{3a}\right)} \quad \Delta \ll a, \mu \gg 1 \tag{2.16}$$

Una manera comúnmente utilizada para representar el comportamiento de un Blindaje es a través de su “Función de Transferencia” de Campos Magnéticos, la cual no es más que la relación entre el campo al interior del Blindaje y el campo de Excitación, es decir:

¹¹ S_{i0} indicada por la curva 3, representa al caso límite en que R_2/R_1 tiende a cero.

$$T_H = \frac{H_{in}}{H_{exit}} \tag{2.17}$$

Como es posible notar, la relación de blindaje coincide con la función de transferencia en este caso. Y es así como, a partir de la relación (2.17) surge el concepto de “Efectividad del Blindaje”, el cual se define como:

$$S.E. = \frac{1}{T_H} \tag{2.18}$$

Con el fin de poder tener una magnitud de la “atenuación” que es capaz de proporcionar uno u otro blindaje, la efectividad del blindaje suele expresarse en términos de decibeles como:

$$(S.E.)_{dB} = 20 \cdot \log\left(\frac{1}{T_H}\right) \tag{2.19}$$

Los blindajes magnéticos pueden ser analizados en su mayoría, en la misma forma en que es analizado un circuito eléctrico DC. Para ello se utiliza un modelo circuital [8], aplicando una analogía del blindaje magnetostático con la “Ley de Ohm”, la cual se describe en la tabla 2.2:

Circuito Eléctrico	Circuito Magnético
Ley de Ohm: $I = G V$	Ley de Hopkinson: $\Phi = G_m I N$
$j = \sigma E$ (A/m ²)	$B = \mu H$ (T)
I = Intensidad de Corriente (A)	Φ = Flujo Magnético (Wb)
σ = Conductividad (S/m)	μ = Permeabilidad (H/m)
$1/R$ = Conductancia (S)	G_m = Permeancia (Wb/A) ¹²
R = Resistencia (Ω)	R_m = Reluctancia (A/Wb)
V = Fuerza Electromotriz (V)	IN = Fuerza Magnetomotriz (A)

Tabla 2.2: Correspondencia formal entre los circuitos Eléctricos y Magnéticos [8].

¹² En esta oportunidad la “A” es en realidad representativa de la unidad “Amper - Vueltas”.

De tal modo que para un blindaje como el que se indica en la figura 2.6, el casquete metálico desviará el flujo de la parte interior de éste, en una proporción que está dada por la relación entre las permeancias del casquete esférico y la del medio al interior del casquete. La permeancia de un casquete esférico, es proporcional a su sección transversal y permeabilidad, e inversamente proporcional a la superficie que tenga en la “dirección del flujo magnético”.

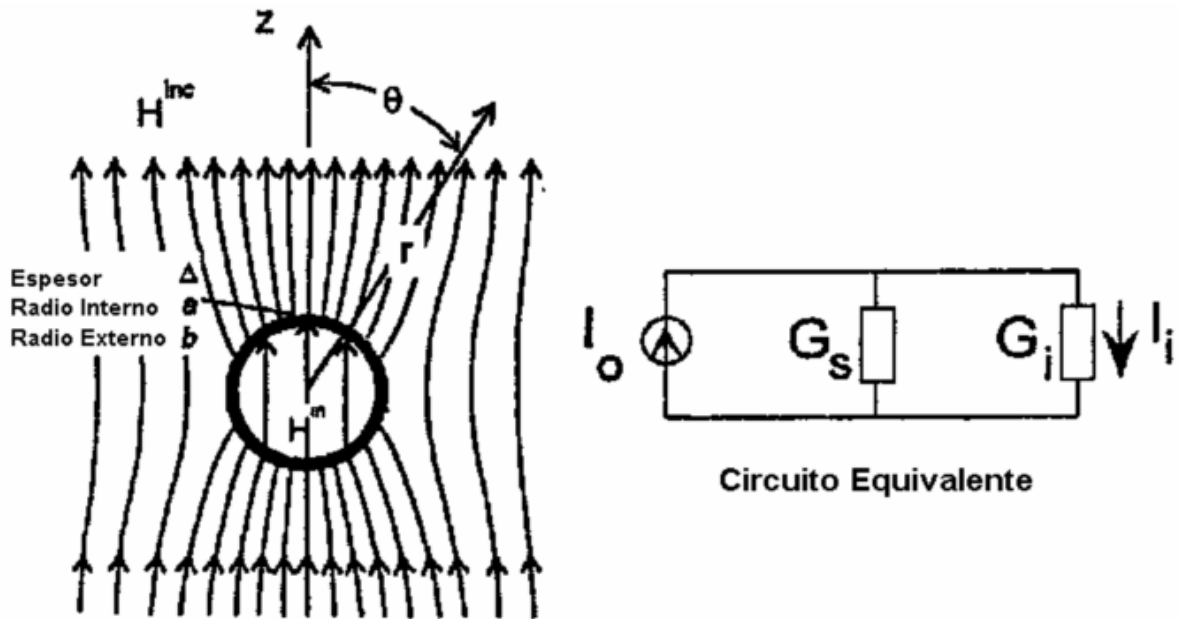


Figura 2.6: Casquete ferromagnético en un campo magnético externo [8].

Por lo tanto, en completa analogía con la Ley de Ohm, el flujo interno puede ser expresado como:

$$I_i = \text{flujo interno} = \frac{G_i \cdot I_0}{G_s + G_i} \tag{2.20}$$

Una de las dificultades en calcular la efectividad del apantallamiento de blindajes prácticos es el determinar un valor conveniente para la permeabilidad. Esto, ya que la permeabilidad varía con la intensidad del campo magnético. Ciertos materiales, como es el caso del “mu- metal” y el “supermaloy”, poseen permeabilidades muy elevadas para campos magnéticos de relativamente baja intensidad, pero tienen el problema de entrar en saturación muy rápidamente, con la consecuencia que sus permeabilidades decrecen con el incremento de la

intensidad del campo magnético. En el Anexo B-1, se presenta la conductividad y permeabilidad relativa de un grupo selecto de materiales comúnmente utilizados.

A continuación, en la figura 2.7 se puede observar el comportamiento del blindaje de un casquete esférico como el de la figura 2.6, en función del radio del casquete y de su espesor. Como se puede apreciar a simple vista, resulta difícil obtener un buen blindaje magnetostático.

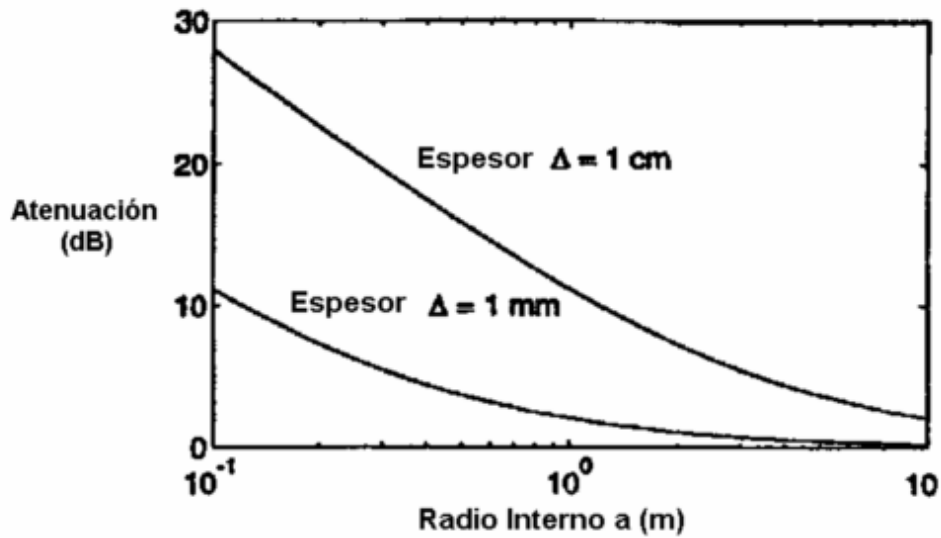


Figura 2.7: Atenuación del blindaje de un casquete esférico delgado de hierro de permeabilidad $\mu_r = 400$ [5].

Por ejemplo, un valor típico de la permeabilidad relativa de una lámina de hierro comúnmente utilizada es de $\mu_r = 400$. Luego, si para experimentación en el laboratorio se quisiese hacer un casquete esférico de 1m de radio interior “a” y 1cm de espesor, la ecuación (2.13) y (2.19) nos permiten calcular que la atenuación será de solo 16dB.

El desarrollo completo del ejemplo del casquete esférico permite sacar un par de buenas conclusiones, ya que gracias a su ayuda es posible inferir lo siguiente: “el blindaje magnetostático no depende en gran medida de la forma del blindaje (esférico, cilíndrico, rectangular, etc.), ya que la permeancia de éste no depende de dicha forma”. Por ello, el ejemplo del casquete esférico, proporciona una *buen*a aproximación sobre la eficiencia del blindaje del campo magnético de alguna otra configuración.

2.2.2 Blindaje de Campos Variables en el Tiempo.

2.2.2.1 Conceptos generales.

En los puntos anteriores, se ha estudiado los campos eléctricos y magnéticos estáticos a lo largo del tiempo. Dichos resultados, se suelen emplear también en el caso de campos de muy baja frecuencia o cuasi- estáticos. Sin embargo, a medida que la frecuencia comienza a aumentar, otro mecanismo de blindaje es el que comienza a adquirir importancia, incluso para frecuencias de algunos Hz. Dicho mecanismo es el de “Blindaje Efectivo de campos electromagnéticos a través de las corrientes de Foucault”, las cuales son inducidas a fluir en la pantalla conductora. Tales corrientes, por si mismas producen campos magnéticos en sentido opuesto al campo incidente, lo que se traduce en una disminución de la intensidad del campo total al interior del blindaje.

Un principio físico fundamental descrito por las ecuaciones de Maxwell, es que: un campo eléctrico variable en el tiempo da origen a un campo magnético y viceversa. Lo cual implica que en este caso general de campos no estacionarios, el blindaje no puede ser descrito de manera separada por “magnético” o “eléctrico”, y debe ser entendido como un fenómeno electromagnético más complejo.

Cuando se trata con problemas de blindaje de campos dinámicos, es usual describir el blindaje de algún recinto a través de una simple relación de campos, tal cual se señaló en la ecuación (2.18). Dependiendo si se trata del campo eléctrico o magnético, un determinado blindaje poseerá dos relaciones distintas de “Efectividad del Blindaje (S.E)”, por lo cual es necesario especificar claramente a cual de los dos campos se está haciendo referencia.

En el caso de los blindajes de campos dinámicos, el comportamiento de las corrientes de Foucault es bastante complejo. Cada caso particular requiere solucionar un problema electromagnético con condiciones de borde específicas. Sin embargo, para el mejor entendimiento de los mecanismos de blindaje y para encontrar una solución aproximada al problema del diseño de un blindaje, se suele estudiar una serie de recintos blindados genéricos, ya que como se ha mencionado anteriormente, la forma del blindaje no es uno de los factores fundamentales a la hora de determinar la efectividad de un blindaje. Por ende, considerando nuevamente el blindaje que provee un casquete esférico delgado de material magnético, pero en esta oportunidad para un campo electromagnético variable en el tiempo. El blindaje del

campo magnético cuasi- estático dado por la ecuación (2.13) / figura 2.7, domina por debajo de una cierta frecuencia f en donde el tamaño del blindaje (dado por el radio interno “a”) es aproximadamente igual a $\mu_r \delta$ [5], en donde δ es la profundidad pelicular dada por la ecuación (2.21)¹³ indicada a continuación:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot f \cdot \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \sigma}} \tag{2.21}$$

En donde μ_0 es la permeabilidad del vacío y σ es la conductividad del material del blindaje. La figura 2.8, muestra la profundidad pelicular como función de la frecuencia para algunos materiales comúnmente utilizados.

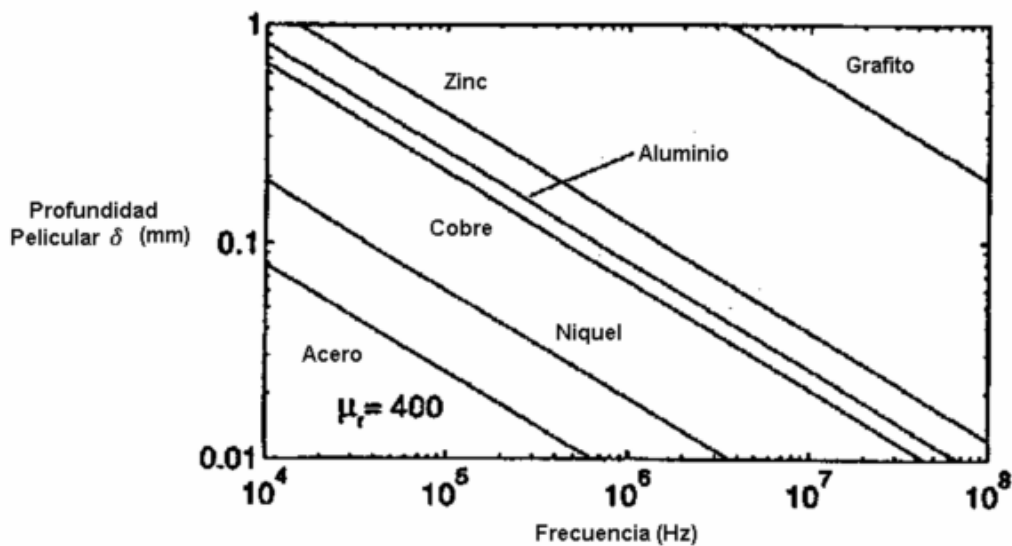


Figura 2.8: Profundidad pelicular en función de la frecuencia [5].

Para el caso de un casquete esférico hecho de hierro, con permeabilidad relativa $\mu_r=400$ y con un radio interno de “a” metros, el blindaje por medio de las corrientes de Foucault empieza a dominar a frecuencias por sobre $f = 10/a^2$ Hz [5]. Lo cual quiere decir que, en el caso de un casquete de 1m de radio interno “a” (como en el caso de un pequeño blindaje de pruebas de algún laboratorio), las corrientes de Foucault representan el mecanismo de mayor importancia a frecuencias industriales de 50 o 60 Hz.

¹³ Ver Anexo B-1 y B-2, para las constantes físicas de algunos materiales.

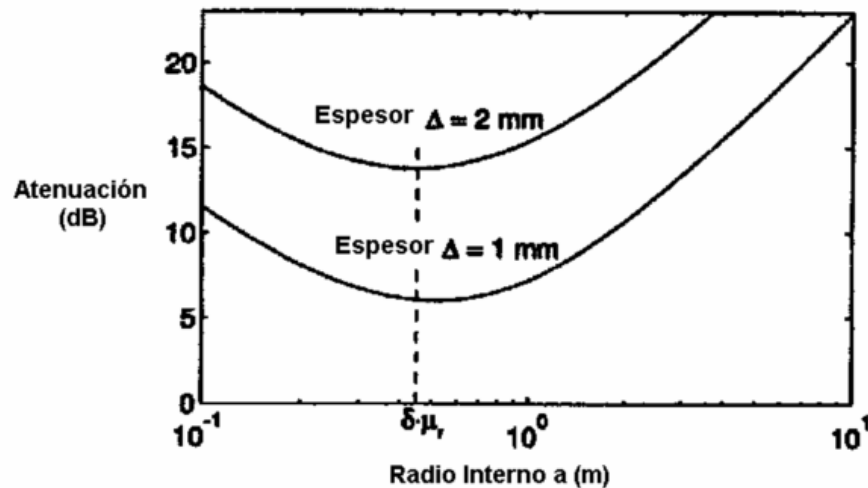


Figura 2.9: Efectividad del blindaje magnético (S.E.H) de un casquete esférico, en el caso de dos espesores distintos, con $\mu_r = 400$ y frecuencia de 50Hz [5].

Para comprender mejor lo que se ha planteado hasta ahora en cuanto a blindajes de campos variables en el tiempo, obsérvese el gráfico de la efectividad del blindaje del campo magnético (S.E.H) de un casquete esférico de hierro, inmerso en un campo de 50Hz, en el caso de dos espesores distintos y en función del radio interno “a” (ver figura 2.9). Para esferas pequeñas, el blindaje se comporta como el de la figura 2.7, siendo éste dominado por el proceso de blindaje estático. Sin embargo, a medida que el radio aumenta, la efectividad del blindaje comienza a aumentar nuevamente a medida que las corrientes de Foucault fluyen al interior del casquete de hierro.

2.2.2.2 Efecto Pelicular y Profundidad pelicular.

Cuando se hace circular una corriente continua (DC) a través de un cable altamente conductor, las cargas se desplazan de manera uniforme a través de toda la sección del conductor. Sin embargo, si la amplitud de la corriente varía con el tiempo, las cargas son forzadas hacia la superficie del conductor. Éste efecto, conocido como “desplazamiento de las corrientes” o “Efecto Pelicular”, se vuelve mucho más fuerte con el aumento de la frecuencia. No obstante, incluso a frecuencias bajas como 50 o 60 Hz, este efecto puede ser de importancia. Una consecuencia de todo aquello, es que los distribuidores de electricidad pueden reducir el peso de sus líneas de poder, haciéndolas de formas tubulares sin necesariamente afectar significativamente la resistencia de éstas, debido a que la mayor parte de la corriente es transportada cerca de la superficie del conductor.

En una placa metálica, la densidad de corriente inducida decrece exponencialmente a medida que avanzamos desde la superficie de la placa hacia dentro de ella, ya que la densidad de corriente inducida en ella se caracteriza según la ecuación indicada en (2.22):

$$j(x) = j_0 \cdot e^{-\frac{x}{\delta}} \quad (2.22)$$

En donde δ es la profundidad pelicular del material, dada por la ecuación (2.21). En la figura 2.10, se ilustra el comportamiento de ésta densidad de corriente. En muchos casos, es de utilidad aproximar la distribución exponencial por una densidad de corriente constante extendida a través de la distancia de “una” profundidad pelicular desde la superficie, como se indica también en la figura 2.10 mediante el área sombreada. De este modo la corriente en el conductor es la misma y solo la distribución varía un poco. Como se ve en la ecuación 2.21, cuando la frecuencia aumenta, la profundidad pelicular disminuye. Por otro lado, la profundidad pelicular es menor en materiales que poseen altas conductividades y altas permeabilidades.

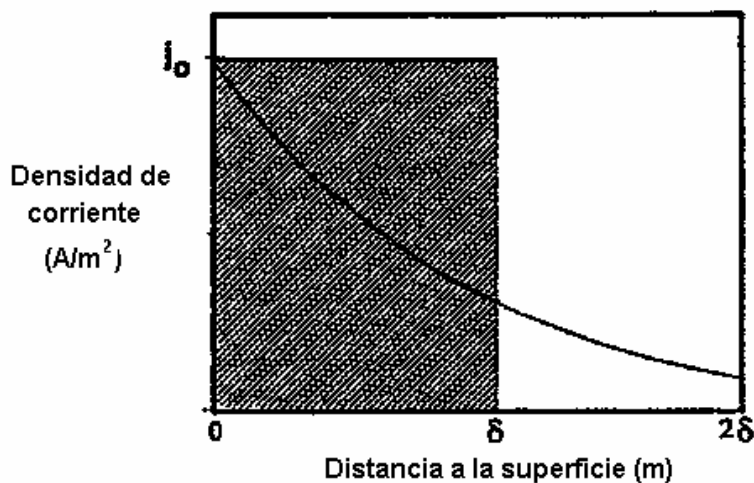


Figura 2.10: Gráfico de la densidad de corriente al interior de un conductor [5].

Para los blindajes de láminas planas de varias profundidades peliculares de espesor, el grosor de las láminas expresado en el número de profundidades peliculares, da un indicador de la capacidad del blindaje del material, acorde con la disminución de la densidad de corriente de forma exponencial. En el caso de láminas delgadas la situación es más compleja, puesto que dos láminas metálicas de distintos materiales, ambas del espesor de “una” profundidad pelicular

(δ), pueden brindar blindajes muy diferentes. Por ende, se ha de ser cuidadoso en no pensar en el blindaje solo en función de la profundidad pelicular de éste, ya que por ejemplo, podría ocurrir una atenuación significativa del campo electromagnético incidente, como consecuencia de la reflexión ocasionada al incidir dicho campo sobre la superficie del blindaje.

2.2.2.3 Propagación de Ondas Planas (PoOP).

Para tratar con propiedad este punto, primero es de importancia saber que los campos electromagnéticos variables en el tiempo pueden tratarse como un fenómeno ondulatorio. En particular, para el caso de los campos que varían sinusoidalmente, los vectores que representan las amplitudes del campo eléctrico y del campo magnético están contenidos en un plano perpendicular a la dirección de propagación, denominándose por lo tanto “Ondas Planas”.

A partir de las ecuaciones de Maxwell - ecuaciones: (2.2), (2.3), (2.4) y (2.5) - se pueden obtener ecuaciones de ondas generales para el campo eléctrico y magnético, las cuales se deducen a continuación:

- *Ecuaciones para \vec{H}* : Tomando (2.3) se tiene lo siguiente.

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{H}) = \nabla \times \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \tag{2.23}$$

$$\nabla (\nabla \cdot \vec{H}) - \nabla^2 \vec{H} = \nabla \times \vec{J} + \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \vec{D}) \tag{2.24}$$

En donde $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$ y $\vec{J} = \sigma \vec{E} + J_s$. Además, se sabe que ϵ y σ representan a la “Permitividad y Conductividad” respectivamente, y que el termino J_s indica la densidad de corriente de la fuente. Luego utilizando las ecuaciones (2.2) y (2.5), y reemplazando \vec{D} y \vec{J} en la ecuación (2.24), se puede encontrar la **ecuación general de onda para el campo magnético**:

$$\boxed{\nabla^2 \vec{H} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} - \mu \sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\nabla \times \vec{J}_s} \tag{2.25}$$

- Ecuaciones para \vec{E} : Análogamente al caso anterior, pero utilizando (2.2).

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -\nabla \times \left(\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) = -\mu \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \vec{H}) \quad (2.26)$$

$$\nabla (\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{J}}{\partial t} - \mu \frac{\partial^2 \vec{D}}{\partial t^2} \quad (2.27)$$

Utilizando la ecuación (2.4), y reemplazando \vec{J} en (2.27) se obtiene la **ecuación general de onda para el campo eléctrico [9]**.

$$\boxed{\nabla^2 \vec{E} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \nabla \left(\frac{\rho}{\epsilon} \right) + \mu \frac{\partial \vec{J}_s}{\partial t}} \quad (2.28)$$

Como se puede observar, estas ecuaciones no son homogéneas porque incluyen las cargas y corrientes aplicadas que originan el campo. Sin embargo, la situación se simplifica cuando las cargas y las corrientes aplicadas son nulas (por lo tanto se desconocen los orígenes del campo). En este caso las ecuaciones son homogéneas y de la forma:

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = 0 \quad (2.29)$$

$$\nabla^2 \vec{H} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = 0 \quad (2.30)$$

Dichas ecuaciones representan las leyes de la variación en el tiempo y en el espacio del campo electromagnético que se supone generado de alguna manera fuera de la región del espacio considerado. Por consiguiente, para campos que varían sinusoidalmente en el tiempo y en el espacio libre, se cumple que [9]:

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} = -\omega^2 \quad , \quad \sigma = 0 \quad , \quad \epsilon = \epsilon_0 \quad (2.31)$$

Por ende, la ecuación (2.29) se reduce a lo siguiente:

$$\nabla^2 \vec{E} + \omega^2 \mu_0 \epsilon_0 \vec{E} = 0 \tag{2.32}$$

$$\boxed{\nabla^2 \vec{E} + k_0^2 \vec{E} = 0} \tag{2.33}$$

La ecuación anterior, se suele denominar como la “**Ecuación de Helmholtz**”. En ella, el término “ k_0 ” se denomina “Número de Onda en el Espacio Libre” y está dado por:

$$k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{c} = \frac{2\pi}{\lambda_0} \tag{2.34}$$

En donde:

- c : Velocidad de la Luz, igual a $2.99 \cdot 10^8$ m/s.
- λ_0 : Longitud de Onda (m).

A continuación, como \vec{E} es un fasor complejo independiente del tiempo, la ecuación (2.33) se puede expandir de la siguiente forma:

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{dx^2} + \frac{\partial^2 \vec{E}}{dy^2} + \frac{\partial^2 \vec{E}}{dz^2} + k_0^2 \vec{E} = 0 \tag{2.35}$$

Ecuación que es válida para cada componente de \vec{E} , de modo que se puede resolver para cada una de sus componentes: x, y, z. Luego, resolviendo la ecuación de Helmholtz mediante el método de “Separación de Variables”, se obtiene que la solución completa será [9]:

$$\boxed{\vec{E} = \vec{E}_0 \cdot e^{-j \vec{k} \cdot \vec{r}}} \tag{2.36}$$

En donde:

$$\vec{E}_0 = A \hat{i} + B \hat{j} + C \hat{k} \text{ , con A, B y C coeficientes de amplitud.}$$

$$\vec{k} = k_x \hat{i} + k_y \hat{j} + k_z \hat{k} \text{ , denominado “Vector de Propagación” .}$$

$$\vec{r} = r_x \hat{i} + r_y \hat{j} + r_z \hat{k} \text{ , denominado “Vector de Posición” .}$$

De la ecuación (2.36) se desprenden una serie de conceptos importantes, ya que al imponer la condición $\nabla \cdot \vec{E} = 0$, se tiene que:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \nabla \cdot \vec{E}_0 e^{-j\vec{k} \cdot \vec{r}} = \vec{E}_0 \cdot \nabla e^{-j\vec{k} \cdot \vec{r}} = -j\vec{k} \cdot \vec{E}_0 e^{-j\vec{k} \cdot \vec{r}} \quad (2.37)$$

Por ende:

$$\vec{k} \cdot \vec{E}_0 = 0 \quad (2.38)$$

De la ecuación anterior, es posible apreciar que la condición dada restringe las amplitudes A, B y C de manera que \vec{E}_0 es perpendicular a la dirección especificada por el vector de propagación.

Como consecuencia de lo anterior, la solución a la ecuación de Helmholtz dada por (2.36), es una “Onda Plana Uniforme”, puesto que las superficies de fase constante dadas por $\vec{k} \cdot \vec{r} = cte$ son “Planos” y el campo “E” no varía en un plano de fase constante.

Finalmente y haciendo uso de todo aquello, en conjunto con la ecuación de Maxwell (2.2), es posible obtener la solución para el campo magnético. Dicha solución sería la siguiente:

$$\vec{H} = -\frac{1}{j\omega\mu_0} \nabla \times \vec{E}_0 \cdot e^{-j\vec{k} \cdot \vec{r}} = -\frac{1}{j\omega\mu_0} \vec{E}_0 \times \nabla \cdot e^{-j\vec{k} \cdot \vec{r}} \quad (2.39)$$

$$\vec{H} = \frac{1}{\omega\mu_0} \vec{k} \times \vec{E}_0 \cdot e^{-j\vec{k} \cdot \vec{r}} = \frac{k_0}{\omega\mu_0} \hat{n} \times \vec{E} \quad (2.40)$$

$$\vec{H} = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \hat{n} \times \vec{E} = Y_0 \hat{n} \times \vec{E} \quad (2.41)$$

Donde “ Y_0 ” tiene dimensiones de Admitancia y se llama “Admitancia Intrínseca del Espacio Libre”. Nótese que \vec{H} es perpendicular a \vec{E} y a \hat{n} , de modo que tanto \vec{E} como \vec{H} están contenidos en los planos de fase constante. Por esta razón, una onda de este tipo se llama transversal electromagnética (denominada también como “Onda TEM”).

A continuación, a través del análisis del caso más simple en el cual una onda plana TEM incide normalmente en un plano conductor como el que se indica en la figura 2.11, se pretende deducir las características esenciales del comportamiento del campo electromagnético en la superficie de un buen conductor.

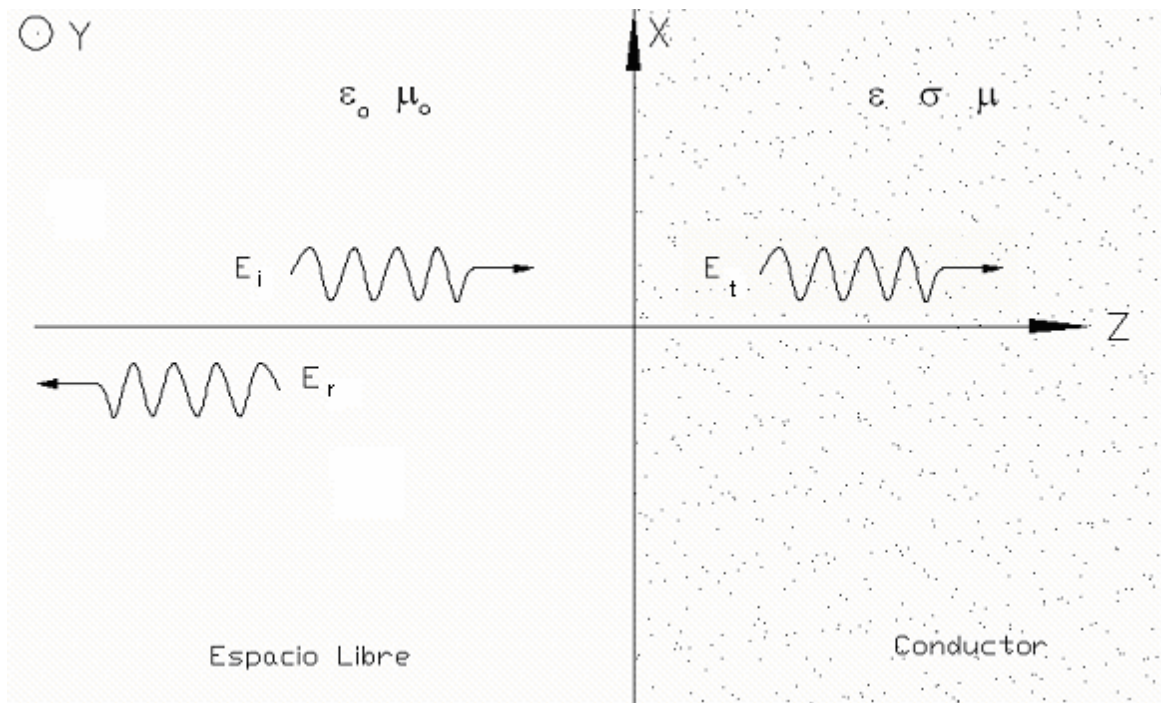


Figura 2.11: Onda plana incidiendo normalmente en un plano conductor.

Para ello, se supondrá el campo eléctrico polarizado en el sentido del “Eje x” de modo que los campos “incidente” y “reflejado” pueden expresarse como:

$$\vec{E}_i = E_1 \cdot \hat{i} \cdot e^{-j \cdot k_0 \cdot z} \quad (2.42)$$

$$\vec{H}_i = Y_0 E_1 \cdot \hat{j} \cdot e^{-j \cdot k_0 \cdot z} \quad (2.43)$$

$$\vec{E}_r = \Gamma E_1 \cdot \hat{i} \cdot e^{j \cdot k_0 \cdot z} \quad (2.44)$$

$$\vec{H}_r = -Y_0 \Gamma E_1 \cdot \hat{j} \cdot e^{j \cdot k_0 \cdot z} \quad (2.45)$$

Donde $\Gamma = E_2/E_1$ representa el **coeficiente de reflexión**. Por otro lado en el medio conductor, la corriente de conducción (termino “ σE ” de la ecuación (2.29)), es mucho mayor que la corriente de desplazamiento, de manera que la ecuación de Helmholtz se reduce a:

$$\nabla^2 \vec{E} - j \omega \mu \sigma \vec{E} = 0 \quad (2.46)$$

El campo transmitido es entonces solución de:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} - j \omega \mu \sigma \right) \cdot \vec{E}_t = 0 \quad (2.47)$$

Ya que se ha supuesto que el campo no varía en “x” o “y”. Por ende, la solución para una onda que sólo tiene componentes según “x – y”, que se propaga en la dirección “z” es:

$$\vec{E}_t = E_3 \hat{i} e^{-\gamma z} \quad (2.48)$$

Con el campo magnético correspondiente:

$$\vec{H}_t = -\frac{1}{j \omega \mu} \nabla \times \vec{E}_t = \frac{\gamma}{j \omega \mu} \hat{j} E_3 e^{-\gamma z} \quad (2.49)$$

Donde:

$$\gamma = \sqrt{j \omega \mu \sigma} = \frac{1 + j}{\delta} \quad (2.50)$$

Por otro lado, la impedancia intrínseca del metal es:

$$Z_m = \frac{j\omega\mu}{\gamma} = \frac{j\omega\mu}{\sqrt{j\omega\mu\sigma}} = \frac{1+j}{\sigma\delta} \quad (2.51)$$

La cual es muy pequeña en comparación con la impedancia intrínseca del espacio libre Z_0 .

Reemplazando (2.51) en (2.49), \vec{H}_t puede escribirse como:

$$\vec{H}_t = \frac{1}{Z_m} \hat{j} E_3 e^{-\gamma z} = Y_m \hat{j} E_3 e^{-\gamma z} \quad (2.52)$$

Y volviendo al problema e imponiendo la condición de borde relativa a la continuidad de los campos tangenciales en $z = 0$, se obtiene:

$$(1 + \Gamma) \cdot E_1 = E_3 = T E_1 \quad (2.53)$$

$$(1 - \Gamma) \cdot Y_0 E_1 = H_3 = Y_m E_3 = Y_m T E_1 \quad (2.54)$$

Donde $T = E_3/E_1$ es el **coeficiente de transmisión**. Por lo tanto, resolviendo las ecuaciones anteriores, es posible obtener que:

$$\Gamma = \frac{Z_m - Z_0}{Z_m + Z_0} \quad (2.55)$$

$$T = \frac{2 \cdot Z_m}{Z_m + Z_0} \quad (2.56)$$

Como el modulo de $Z_m \ll Z_0$, el coeficiente de reflexión “ Γ ” es aproximadamente igual a “-1”, y el coeficiente de transmisión “ T ” es aproximadamente igual a cero. Es decir, que casi toda la potencia incidente es reflejada en la superficie metálica. A medida que la conductividad del material tienda a ser infinita, Z_m tiende a ser igual a “cero”. Por lo tanto en el límite cuando ($\sigma \rightarrow \infty$), el coeficiente de reflexión $\Gamma = -1$ y el coeficiente de transmisión $T = 0$. Por lo tanto, para un conductor perfecto, el campo eléctrico tangencial a la superficie es nulo, y el campo magnético tangencial a la superficie es igual al doble del de la onda incidente.

Capítulo 3: Análisis y Modelación del Blindaje de la Sala TEM.

El presente capítulo contiene dos grandes temas: en el primero, se efectuará el análisis acabado del efecto sobre el campo eléctrico y magnético, que es proporcionado a través de un “Blindaje Generalizado”. Dicho blindaje será estudiado a través de un ejemplo de interés particular, que sin embargo permite extrapolar sus resultados a muchos otros problemas cotidianos. El segundo tema tiene por objetivo integrar todos los conceptos básicos descritos en los capítulos anteriores en un solo y completo modelo matemático, el cual sea capaz de describir el comportamiento del campo electromagnético dentro y fuera del blindaje físico que se realizará en la Sala TEM. Para ello se estudiará el llamado “Método de los momentos modales (Modal/MoM)”, el cual es capaz de modelar el comportamiento del campo electromagnético en todo el espacio, para un blindaje efectuado a cualquier recinto de tipo rectangular, el cual posea aperturas también de tipo rectangular en sus muros.

A continuación, la resolución del Modal/MoM y la obtención de los resultados numéricos teóricos, se efectuará mediante el uso de un software disponible en el comercio denominado “FEKO” [10], el cual utiliza un algoritmo híbrido entre MoM y técnicas como: MLFMM, FEM, PO y UTD (Ver glosario y referencia [10] para mayores detalles). Lo cual reduce los requerimientos computacionales, permitiendo el análisis de problemas extremadamente complejos.

3.1 Análisis del Blindaje Generalizado.

Como se señaló en el segundo capítulo (punto 2.2), un blindaje electromagnético no necesariamente debe estar constituido por alguna pantalla o superficie metálica identificada, puesto que el concepto de “Blindaje Generalizado” hace mención a evitar completamente el acoplamiento entre circuitos o llevar dicho acoplamiento hasta un cierto nivel permisible. Por ende, el Blindaje Generalizado es un mecanismo de blindaje efectivo, en el cual el factor fundamental a considerar es la relación existente entre los campos eléctricos y magnéticos con respecto a la distancia. Por tal motivo, para poder determinar el Blindaje Generalizado necesario y aplicable en la sala TEM, a continuación se estudiarán en detalle las variaciones del campo electromagnético con respecto a la distancia.

Para comenzar tal estudio, considérese como ejemplo un conductor situado sobre el Eje Z (ver figura 3.1 / A), el cual posee una distribución rectilínea de carga de densidad λ por unidad de longitud (constante), y su largo es igual a $(l_1 + l_2)$.

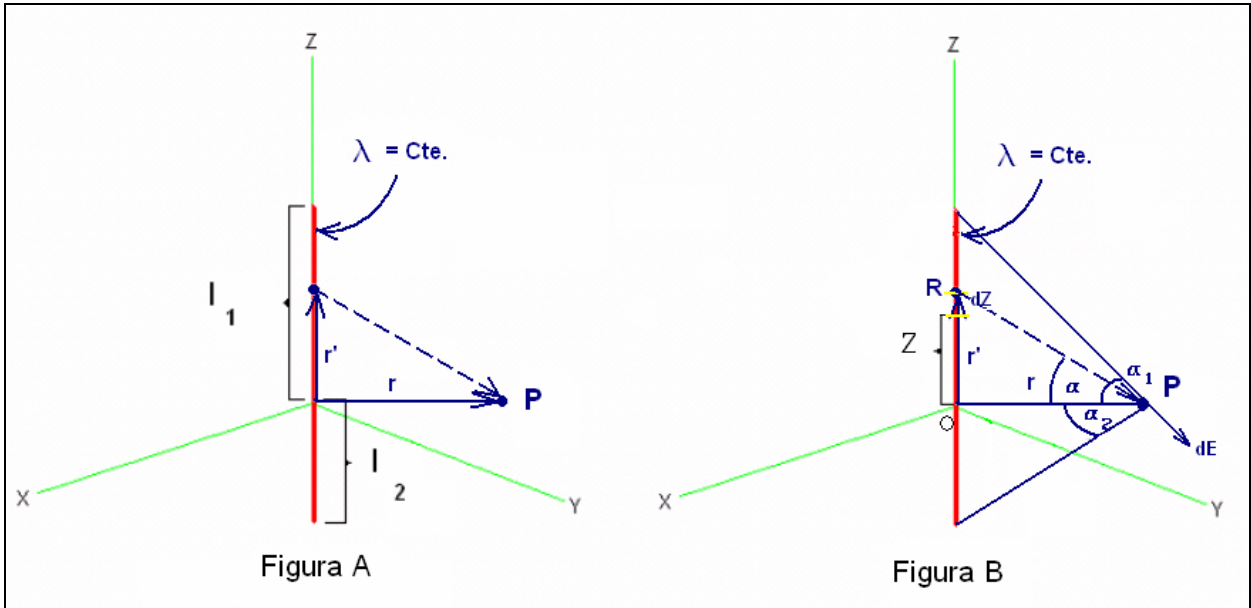


Figura 3.1: Conductor de longitud $l_1 + l_2$ y densidad de carga λ .

Separando el problema en dos, se puede determinar en primer lugar la forma que poseerá el campo eléctrico que es generado por dicha fuente en cualquier punto del espacio, para luego abordar de manera independiente la forma que poseerá el campo magnético inducido por el conductor en las inmediaciones éste. Para ello, se considera la simetría cilíndrica en torno al Eje OZ, de modo que los módulos de éstos solo dependerán de los parámetros: r , l_1 y l_2 .

3.1.1 Determinación del campo eléctrico alrededor de un conductor.

De la teoría electromagnética básica, se puede determinar el campo eléctrico en cualquier punto “P” del espacio, a través de la ecuación (3.1):

$$d\vec{E}(P) = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{dq(\vec{r}')}{\|\vec{r} - \vec{r}'\|^3} \cdot (\vec{r} - \vec{r}') \quad (3.1)$$

En donde:

$$\left(\vec{r} - \vec{r}' \right) = r \hat{r} - z \hat{k} \quad (3.2)$$

$$\|\vec{r} - \vec{r}'\| = \sqrt{r^2 + z^2} \quad (3.3)$$

$$dq(r') = \lambda \cdot dz \quad (3.4)$$

Posteriormente, si se observa la figura 3.1 - B, se aprecia que la variable de integración más cómoda es el ángulo “ α ” formado por los vectores \vec{PR} y \vec{PO} . Los límites de integración entonces serían α_1 y $-\alpha_2$ (ángulo superior e inferior, respectivamente). Por ello, expresando todas las variables existentes en función de “ α ”, es posible obtener lo siguiente:

$$\frac{z}{r} = \tan(\alpha) \quad (3.5.A)$$

$$\frac{r}{\sqrt{z^2 + r^2}} = \cos(\alpha) \quad (3.5.B)$$

$$\frac{z}{\sqrt{z^2 + r^2}} = \text{sen}(\alpha) \quad (3.5.C)$$

$$\cos(\alpha_{1,2}) = \frac{r}{\sqrt{l_{1,2}^2 + r^2}} \quad (3.6.A)$$

$$\text{sen}(\alpha_{1,2}) = \frac{l_{1,2}}{\sqrt{l_{1,2}^2 + r^2}} \quad (3.6.B)$$

Luego:

$$\frac{\left(\begin{matrix} \vec{r} - \vec{r}' \\ \|\vec{r} - \vec{r}'\|^3 \end{matrix} \right)}{\left(\begin{matrix} r \hat{r} - z \hat{k} \\ (\sqrt{r^2 + z^2})^3 \end{matrix} \right)} = \frac{\cos(\alpha) \hat{r} - \text{sen}(\alpha) \hat{k}}{r^2 \cdot \sec^2(\alpha)} \quad (3.7)$$

$$dz = \frac{dz}{d\alpha} \cdot d\alpha = r \cdot \sec^2(\alpha) \cdot d\alpha \quad (3.8)$$

Entonces:

$$d\vec{E}(P) = \frac{\lambda \cdot r \cdot \sec^2(\alpha) \cdot d\alpha}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{\cos(\alpha) \hat{r} - \text{sen}(\alpha) \hat{k}}{r^2 \cdot \sec^2(\alpha)} \quad (3.9)$$

$$d\vec{E}(P) = \frac{\lambda}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r} \cdot \left(\cos(\alpha) \hat{r} - \text{sen}(\alpha) \hat{k} \right) \cdot d\alpha \quad (3.10)$$

$$\vec{E}(P) = \int_{-\alpha_2}^{\alpha_1} d\vec{E}(P) \quad (3.11)$$

Resolviendo la integral y reemplazando senos y cosenos por las ecuaciones (3.6.A) y (3.6.B), se tiene lo siguiente:

$$\vec{E}(P) = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 r} \cdot \left[\left(\frac{l_2}{\sqrt{l_2^2 + r^2}} + \frac{l_1}{\sqrt{l_1^2 + r^2}} \right) \hat{r} + \left(\frac{r}{\sqrt{l_2^2 + r^2}} - \frac{r}{\sqrt{l_1^2 + r^2}} \right) \hat{k} \right] \quad (3.12)$$

Por lo tanto, se ha podido llegar a una fórmula general que permite determinar el campo eléctrico para un punto “P” situado en cualquier parte del espacio. Por ende, resulta interesante el estudio de dicha fórmula en los siguientes casos particulares:

- Primer Caso: $r \ll l_1, l_2$
$$\begin{cases} l_2^2 + r^2 \approx l_2^2 \\ l_1^2 + r^2 \approx l_1^2 \end{cases}$$

Caso en el cual:

$$\vec{E}(P) = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 r} \cdot \left[2 \cdot \hat{r} + \left(\frac{1}{l_2} - \frac{1}{l_1} \right) \cdot r \hat{k} \right] \quad (3.13)$$

- Segundo Caso: $r \gg l_1, l_2$
$$\begin{cases} l_2^2 + r^2 \approx r^2 \\ l_1^2 + r^2 \approx r^2 \end{cases}$$

Caso en el cual:

$$\vec{E}(P) = \frac{\lambda \cdot (l_1 + l_2)}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r^2} \cdot \hat{r} \quad (3.14)$$

- Tercer Caso: $l_1, l_2 \rightarrow \infty$, entonces: $\alpha_1, \alpha_2 \rightarrow \frac{\pi}{2}$

$$\vec{E}(P) = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 r} \cdot \left[\left(\sin\left(\frac{\pi}{2}\right) + \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) \right) \hat{r} + \left(\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) - \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) \right) \hat{k} \right] \quad (3.15)$$

$$\vec{E}(P) = \frac{\lambda}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r} \cdot \hat{r} \quad (3.16)$$

De lo anterior es posible inferir que, la ecuación (3.13) permite obtener el “campo eléctrico cercano” generado por el conductor. Se puede observar también de dicha ecuación, que para el caso del “campo cercano” existiría una relación inversamente proporcional con la distancia. Sin embargo, a medida que “P” se aleja del conductor (ver segundo caso), el campo eléctrico se atenúa en relación al cuadrado de la distancia (como se observa en la ecuación (3.14)), quedando de manifiesto que para distancias muy grandes (P en el infinito), el campo eléctrico se comporta como si el conductor se tratara de una carga eléctrica puntual. No obstante aquello, si el conductor fuese infinitamente largo (ver el tercer caso) cualquier punto del espacio

sería considerado como “cercano” al conductor y por ende la ecuación (3.16) indica la relación inversamente proporcional del campo eléctrico con respecto a la distancia “r”.

Nótese además que, si el conductor cumpliera con que “ $l_1 = l_2$ ”, entonces el campo eléctrico dado por la ecuación (3.13) nos indica que las componentes aportadas por la sección superior e inferior del conductor en el eje “z” se anularían mutuamente, obteniéndose una igualdad entre las ecuaciones (3.13) y (3.16).

Además es posible observar que, cuando el conductor es infinitamente largo, el campo eléctrico es perpendicular al eje “z” puesto a que la distribución de carga es infinita y homogénea, y el espacio tiene simetría cilíndrica con respecto al eje OZ, en consecuencia, las líneas de campo serán rectas que parten perpendicularmente desde el eje OZ y llegan al infinito, siendo atenuadas acorde a: $1/r$ y $1/r^2$ a medida que “P” se ubica más y más lejos del conductor.

A continuación se procederá a desarrollar mediante el software “FEKO”, el modelamiento de la situación descrita en la figura 3.1- A y B, el cual quedará (gráficamente) de la manera indicada en la figura 3.2.A, que se entrega a continuación:

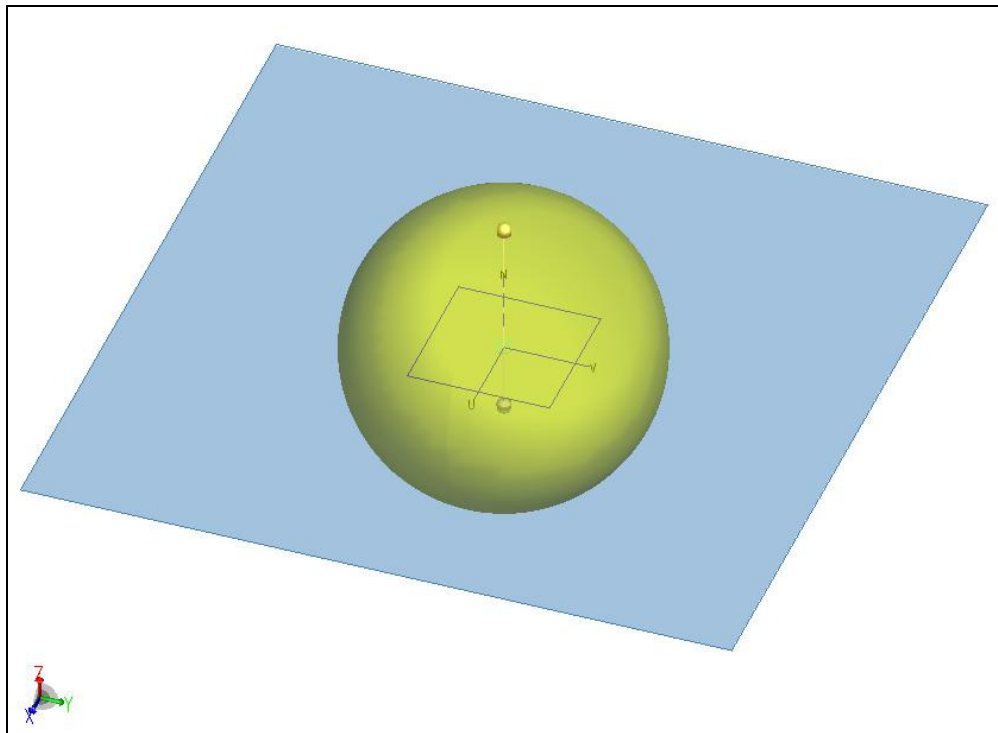


Figura 3.2.A: Modelación en “FEKO” de un conductor eléctrico con: una fuente de 220V, $l_1 = 2\text{m}$, $l_2 = 1\text{m}$ y 10A de corriente circulando por él.

Del modelamiento indicado en la “figura 3.2.A”, es posible obtener luego los resultados teóricos del campo eléctrico y magnético generado en todo el espacio alrededor del conductor. En la “figura 3.2.B” se entregan los resultados del campo eléctrico obtenido, mediante un diagrama de curvas de nivel.

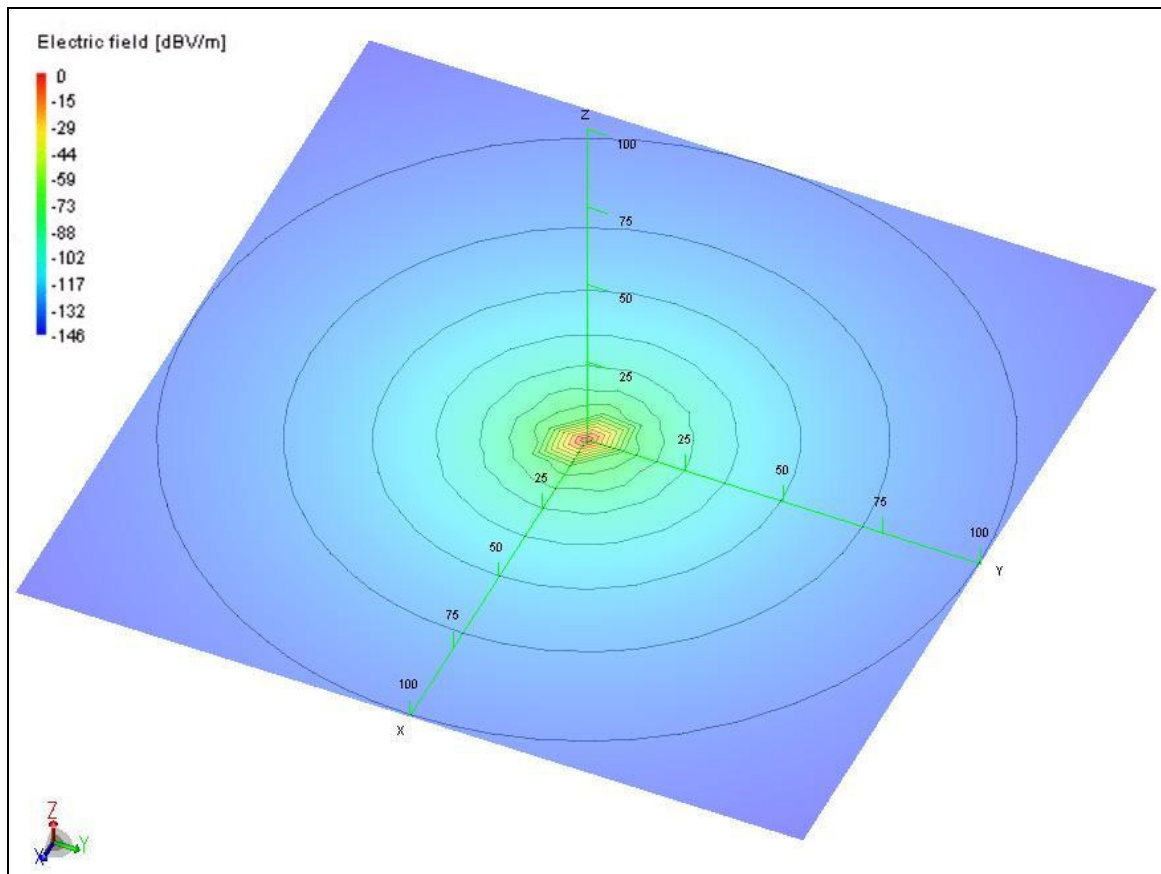


Figura 3.2.B: Atenuación del Campo Eléctrico en función de la distancia al conductor.
(Conductor con $l_1= 2m$, $l_2= 1m$. A 220V y 10A)

La tabla 3.1 que se entrega más adelante, describe la atenuación del campo eléctrico en función de la distancia. En ella, se presenta en detalle las magnitudes del campo eléctrico obtenido alrededor del conductor desde 0m a 50 m de distancia del conductor, y se compara los resultados de tres casos particulares: las magnitudes del campo eléctrico en función de la distancia obtenidas con la simulación de la figura 3.2.B, las magnitudes obtenidas a partir de la aproximación lineal de los datos obtenidos con la simulación y las magnitudes obtenidas a partir de la aproximación cuadrática de los datos. Dicha tabla, permite observar claramente las dependencias existentes entre el campo eléctrico y las relaciones: $1/r$ (para campo cercano) y $1/r^2$ (para campo lejano), a través de la representación de sus datos mediante la figura 3.3.

Atenuación del campo Eléctrico en (dBV/m)			
Distancia (m)	Simulación	$\frac{1}{r}$	$\frac{1}{r^2}$
0,0	0,000	-13,078	-59,316
0,5	-18,853	-18,352	-60,378
1,0	-27,241	-23,626	-61,431
1,5	-33,711	-28,901	-62,474
2,0	-39,146	-34,175	-63,507
2,5	-43,799	-39,449	-64,531
3,0	-47,841	-44,723	-65,545
3,5	-51,396	-49,998	-66,550
4,0	-54,561	-55,272	-67,546
4,5	-57,406	-60,546	-68,531
5,0	-59,987	-65,821	-69,508
10	-77,496	-118,564	-78,748
15	-87,954	-171,306	-87,036
20	-95,412	-224,049	-94,373
25	-101,210	-276,792	-100,758
30	-105,950	-329,535	-106,191
35	-109,960	-382,278	-110,673
40	-113,440	-435,021	-114,203
45	-116,500	-487,764	-116,782
50	-119,250	-540,507	-118,409

Tabla 3.1: Atenuación del Campo Eléctrico en función de la distancia al conductor obtenida mediante simulación y estimación: lineal y cuadrática.

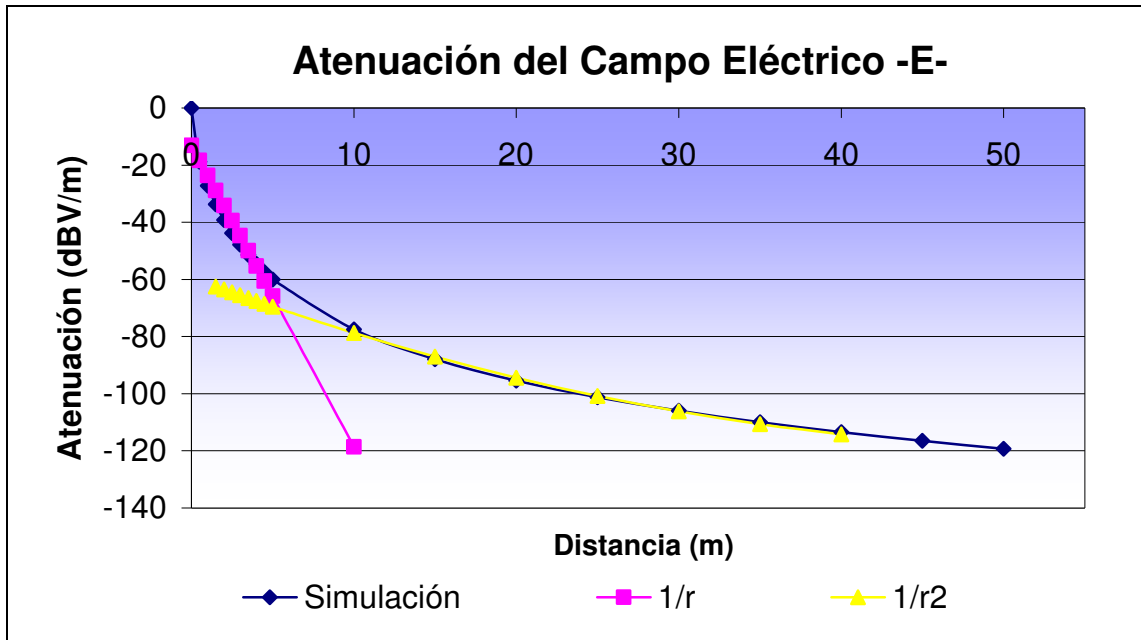


Figura 3.3: Gráfico obtenido con los datos de la Tabla 3.1.

Como se ve en la figura 3.3, en las “cercañas” del conductor (entre 0 y 4m), claramente la dependencia de atenuación del campo esta ligada con 1/r (recta rosada en la figura 3.3). En cambio para distancias superiores a 5m, el comportamiento de la atenuación del campo esta ligado a “1/r²” (curva amarilla en la figura 3.3). O en otras palabras, cuando el punto “P” se considera “infinitamente lejano”, el conductor se comporta como si se tratara de una carga eléctrica puntual.

Todo aquello, concuerda con lo descrito en los desarrollos matemáticos dados anteriormente (ecuaciones (3.13), (3.14) y (3.16)) y por ende, brinda una noción fundamentalmente importante a la hora de considerar un “Blindaje Generalizado”.

3.1.2 Determinación del campo magnético alrededor de un conductor.

En el caso del cálculo del campo magnético inducido en las inmediaciones del conductor en un punto “P” (ver figura 3.1 - A), el procedimiento es análogo al caso del campo eléctrico. Se tiene entonces que la inducción magnética está dada por:

$$\vec{B}(P) = \frac{\mu_0 \cdot I}{4 \cdot \pi} \cdot \int \frac{d\vec{r}' \times \left(\frac{\vec{r} - \vec{r}'}{\|\vec{r} - \vec{r}'\|^3} \right)}{\|\vec{r} - \vec{r}'\|^3} \quad (3.17)$$

Utilizando la misma descomposición de la figura 3.1/B, y por ende las ecuaciones descritas en (3.2), (3.3), (3.4), (3.5) y (3.6). Se tiene entonces lo siguiente:

$$\vec{B}(P) = \frac{\mu_0 \cdot I}{4 \cdot \pi} \cdot \int_{-l_2}^{l_1} \frac{dz \hat{k} \times \left(r \hat{r} - z \hat{k} \right)}{\left(\sqrt{r^2 + z^2} \right)^3} \quad (3.18)$$

$$\vec{B}(P) = \frac{\mu_0 \cdot I}{4 \cdot \pi} \cdot \int_{-l_2}^{l_1} \frac{r dz \hat{\theta}}{\left(\sqrt{r^2 + z^2} \right)^3} \quad (3.19)$$

Utilizando el cambio de variable adecuado:

$$\vec{B}(P) = \frac{\mu_0 \cdot I}{4 \cdot \pi} \cdot \hat{\theta} \cdot \int_{-\alpha_2}^{\alpha_1} \frac{\cos^3(\alpha)}{r^2} \cdot r \cdot \sec^2(\alpha) \cdot d\alpha \quad (3.20)$$

Resolviendo dicha ecuación:

$$\vec{B}(P) = \frac{\mu_0 \cdot I}{4 \cdot \pi \cdot r} \cdot \left(\text{sen}(\alpha_1) + \text{sen}(\alpha_2) \right) \cdot \hat{\theta} \quad (3.21)$$

Reemplazando α_1 y α_2 con las ecuaciones (3.6) a y b:

$$\vec{B}(P) = \frac{\mu_0 \cdot I}{4 \cdot \pi \cdot r} \cdot \left(\frac{l_1}{\sqrt{l_1^2 + r^2}} + \frac{l_2}{\sqrt{l_2^2 + r^2}} \right) \cdot \hat{\theta} \quad (3.22)$$

La ecuación anterior representa a la inducción magnética en un punto "P" en cualquier parte del espacio, observándose en ella que las líneas de campo estarán dadas por circunferencias

concéntricas alrededor del conductor. Luego, tal cual se hizo con el campo eléctrico, se analizarán a continuación una serie de casos de interés particular.

- Primer Caso: $r \ll l_1, l_2$ $\begin{cases} l_2^2 + r^2 \approx l_2^2 \\ l_1^2 + r^2 \approx l_1^2 \end{cases}$

Entonces:

$$\vec{B}(P) = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r} \cdot \hat{\theta} \tag{3.23}$$

- Segundo Caso: $r \gg l_1, l_2$ $\begin{cases} l_2^2 + r^2 \approx r^2 \\ l_1^2 + r^2 \approx r^2 \end{cases}$

Con lo cual:

$$\vec{B}(P) = \frac{\mu_0 \cdot I}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \cdot (l_1 + l_2) \cdot \hat{\theta} \tag{3.24}$$

- Tercer Caso: $l_1, l_2 \rightarrow \infty$, entonces: $\alpha_1, \alpha_2 \rightarrow \frac{\pi}{2}$

Efectuando el reemplazo de α_1 y α_2 , para luego tomar el límite se tiene:

$$\vec{B}(P) = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r} \cdot \hat{\theta} \tag{3.25}$$

- Cuarto caso: Si el punto “P” estuviese en el infinito. Entonces $\vec{RP} = \vec{OP} = \vec{r}$ (ver figura 3.1 / B), por lo tanto la ecuación (3.17) quedaría como sigue:

$$\vec{B}(P) = \frac{\mu_0 \cdot I}{4 \cdot \pi} \cdot \int \frac{d\vec{r}' \times \vec{r}}{\|\vec{r}\|^3} \tag{3.26}$$

$$\vec{B}(P) = \frac{\mu_0 \cdot I}{4 \cdot \pi} \cdot \int_{-l_2}^{l_1} \frac{dz \cdot \hat{k} \times (x \hat{i} + y \hat{j} + z \hat{k})}{r^3} \quad (3.27)$$

$$\vec{B}(P) = \frac{\mu_0 \cdot I}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{(x \hat{j} - y \hat{i})}{r^3} \cdot (l_1 + l_2) \quad (3.28)$$

De todo lo anteriores, es posible inferir que la ecuación (3.23) permite obtener la inducción magnética del “campo cercano” producida por el conductor. Además se aprecia que existiría una relación inversamente proporcional entre la magnitud de la inducción magnética y la distancia al conductor cuando el punto “P” está muy cercano al conductor.

Por otra parte a medida que “P” se aleja del conductor (ver segundo caso), existe una atenuación en relación al cuadrado de la distancia (como se observa en la ecuación (3.24)). Cabe señalar también, que si el conductor fuese infinitamente largo (ver el tercer caso), de manera análoga a lo que ocurre con el campo eléctrico, cualquier punto del espacio sería considerado como “cercano” al conductor y por ende la ecuación (3.25) indica la relación inversamente proporcional existente entre la inducción magnética y la distancia “r”. Pero a diferencia de lo que ocurre con el campo eléctrico, al analizar el “cuarto caso”, es posible concluir con la ecuación (3.28) que cuando el punto “P” se encuentra en el infinito, la inducción magnética se atenúa en relación a la distancia al cubo. En resumen, a medida que el punto “P” se aleja del conductor, el campo decrece a razón de: 1/r, 1/r² y 1/r³, mientras más alejado se tome dicho punto “P” del conductor.

Análogamente a lo ocurrido en el caso del campo eléctrico, a continuación se presenta la figura 3.4, que describe la forma en que varía la atenuación de la intensidad del campo magnético en función de la distancia al conductor que induce dicho campo (los datos han sido representados mediante un diagrama de curvas de nivel del campo magnético). Tales resultados, se obtuvieron a partir de la simulación computacional del caso analizado en cuestión, descrito en las figuras: Figura 3.1.A/B y Figura 3.2.A.

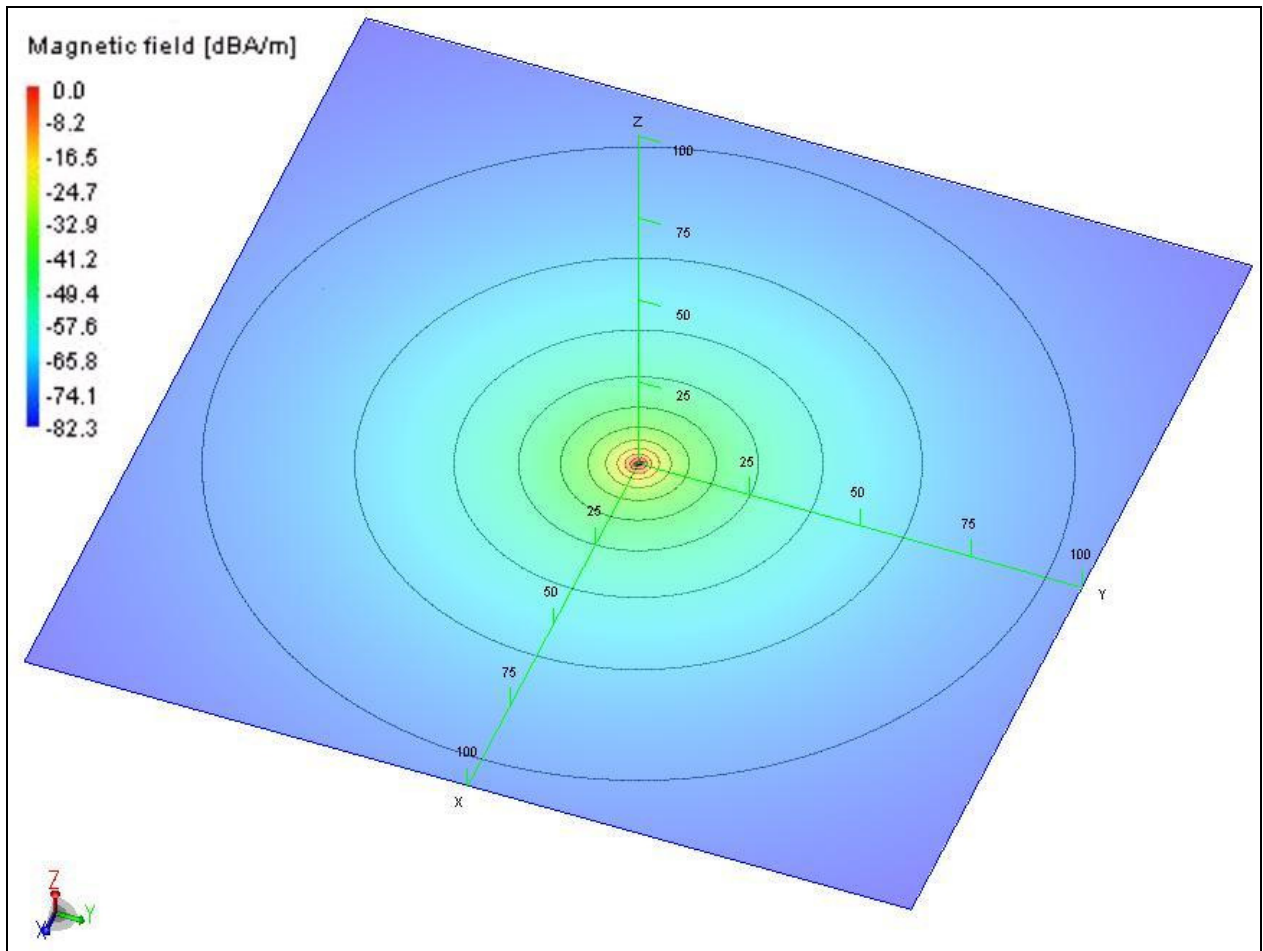


Figura 3.4: Atenuación de la intensidad del Campo Magnético en función de la distancia al conductor (Conductor con $l_1= 2m$, $l_2= 1m$. A 220V y 10A).

Análogamente a lo hecho para el caso del campo eléctrico, se procederá entonces a desarrollar una tabla en la cual se puedan comparar: los datos teóricos obtenidos de la simulación con “FEKO” de la atenuación del campo magnético en función de la distancia (descrita en la “figura 3.4”, anteriormente señalada), y los datos obtenidos mediante una estimación: lineal, cuadrática y cúbica. Dicha tabla comparativa, es la tabla 3.2 descrita a continuación:

Atenuación de la intensidad de Campo Magnético -H- en (dBA/m)				
Distancia (m)	Simulación	$\frac{1}{r}$	$\frac{1}{r^2}$	$\frac{1}{r^3}$
0,0	infi.	-1,49	-28,09	-12,94
0,5	0,00	-4,84	-28,85	-14,65
1,0	-7,69	-8,19	-29,61	-16,33
1,5	-13,06	-11,54	-30,36	-17,98
2,0	-17,27	-14,89	-31,10	-19,60
2,5	-20,71	-18,24	-31,84	-21,19
3,0	-23,62	-21,59	-32,57	-22,75
3,5	-26,13	-24,94	-33,30	-24,28
4,0	-28,34	-28,29	-34,02	-25,78
4,5	-30,30	-31,64	-34,73	-27,25
5,0	-32,07	-35,00	-35,44	-28,69
10	-43,93	-68,50	-42,16	-41,57
20	-55,92	-135,50	-53,70	-59,81
30	-62,95	-202,51	-62,71	-69,86
40	-67,95	-269,51	-69,20	-73,90
50	-71,82	-336,52	-73,15	-74,15
60	-73,30	-403,52	-74,57	-72,80
70	-75,20	-470,53	-73,47	-72,05
80	-78,60	-537,53	-69,83	-74,10
90	-82,60	-604,54	-63,66	-81,15
100	-91,70	-671,54	-54,97	-95,39

Tabla 3.2: Atenuación del campo magnético en función de la distancia al conductor mediante simulación y estimación: lineal, cuadrática y cúbica.

La información descrita en la “Tabla 3.2”, permite fácilmente observar las dependencias existentes entre la intensidad de campo magnético y las relaciones: $1/r$, $1/r^2$ y $1/r^3$, si es que sus datos se despliegan de manera gráfica. Es por dicha razón que a continuación se entrega la figura (3.5), en la cual se ha resumido toda la información de la Tabla 3.2.

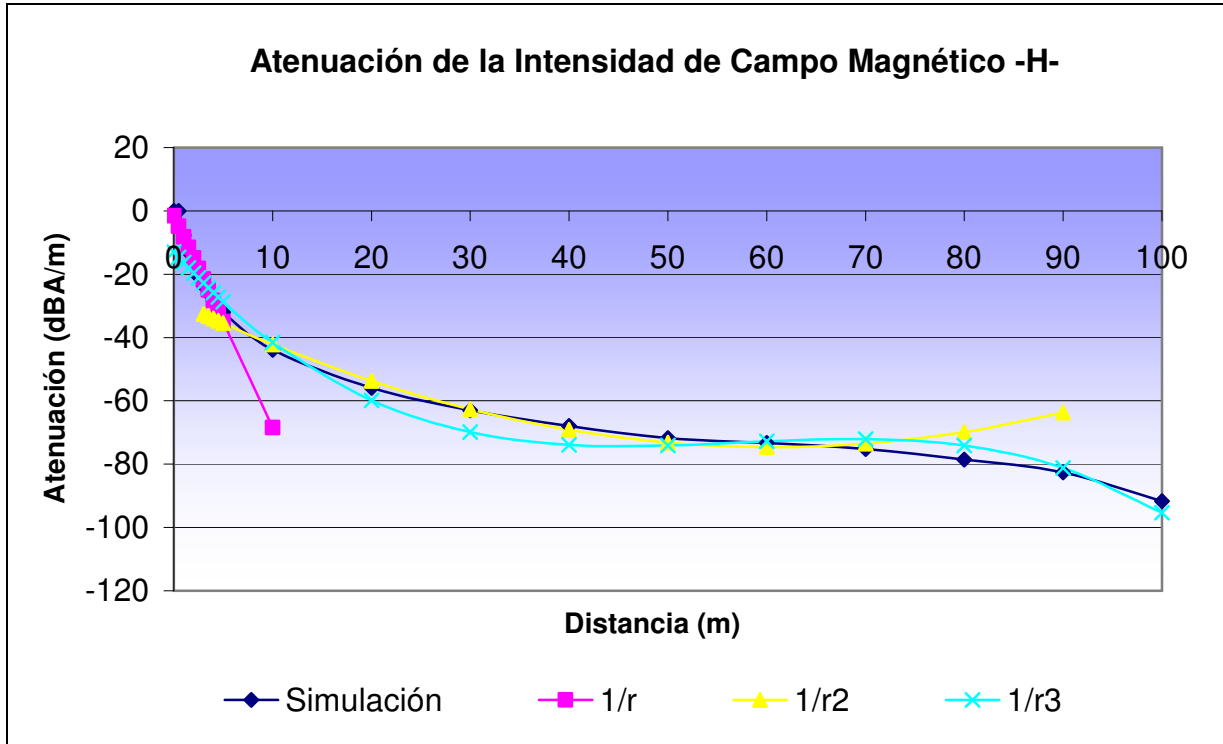


Figura 3.5: Gráfico “Resumen” de los datos pertenecientes a la Tabla 3.2.

La figura anterior, demuestra lo descrito en las ecuaciones: (3.23), (3.24) y (3.28). Ya que, para el caso del campo cercano (de 0 a 4m), la atenuación se comporta como una función dependiente de $1/r$ (recta rosada de la figura 3.5). Luego, para distancias entre 4m y 70m, la mejor aproximación del comportamiento exacto del campo (descrito por la ecuación (3.22)), estará dada por una función dependiente de $1/r^2$ (curva amarilla de la figura 3.5). Finalmente para distancias superiores a 70m, es decir cuando “r” tiende a infinito, la mejor aproximación de la atenuación del campo estará dada por una función dependiente de $1/r^3$ (curva celeste de la figura 3.5). Cabe señalar también, que los resultados obtenidos anteriormente son “netamente teóricos” y sirven para entender el comportamiento del campo electromagnético en general, y en condiciones totalmente “ideales”. En el caso del ejemplo de la figura 3.1.A/B, no existe ninguna otra fuente de campo que pueda acoplarse con ésta, ni elementos a su alrededor que puedan cortocircuitar las líneas de campo. Por ende, en la “Ingeniería Práctica”, se suele considerar como regla general a aquella del “factor 3” para cuantificar el concepto de: “mucho mayor que” [5]. Es decir, en el caso del “campo lejano”, se puede considerar a éste como aquel situado a una distancia “tres veces mayor” al radio del blindaje equivalente (R_2 en la figura 2.4).

3.2 Análisis del Blindaje EM de la Sala TEM mediante MoM.

El método de los momentos modales (Modal/MoM) es un método computacional de cálculo numérico utilizado en la resolución de ecuaciones diferenciales lineales en derivadas parciales, las cuales han sido formuladas mediante ecuaciones integrales. Dicho método, no solo es aplicable en el área del electromagnetismo, sino que también tiene aplicaciones dentro de áreas como: mecánica de fluidos, acústica, resistencia de materiales, entre muchas otras. Sin embargo, en las otras áreas de la ingeniería se le suele llamar por “Método de los Elementos de Contorno” o “Boundary Element Method (BEM)”.

En el caso particular de la Sala TEM, se utilizará dicho método en la determinación de la efectividad de dicho blindaje en presencia de aperturas importantes, tales como: ventanas, puertas y ductos de ventilación. Para ello, se expresará el campo electromagnético en términos de: las funciones de Green en la cavidad (para el interior del blindaje), y de las funciones de Green en el espacio libre (para el exterior del blindaje). Obteniéndose así, al imponer la continuidad de la componente tangencial de los campos eléctricos y magnéticos a través de las aperturas, ecuaciones integrales en las cuales la incógnita estará dada por la componente tangencial del campo eléctrico en la apertura. Luego, mediante el uso del Modal/MoM, las ecuaciones integrales serán resueltas para despejar dichas incógnitas. Y finalmente se determinarán los campos electromagnéticos al interior del blindaje rectangular, a partir de los campos determinados anteriormente en las aperturas, acorde con las fuentes externas de campo electromagnético a las cuales es sometido el blindaje.

3.2.1 Formulación del Problema.

La figura 3.6, indica la geometría de un recinto rectangular que posee aperturas (también rectangulares), en cada uno de sus muros opuestos. Debido a que las aperturas rectangulares a ciertas frecuencias actúan como verdaderas antenas, también se convierten en fuentes de interferencias electromagnéticas (EMI) para las emisiones electromagnéticas. Pudiéndose ocasionar con ello, que la energía electromagnética radiada por los conductores al interior del blindaje pueda escapar a través de las aperturas y causar interferencias a algún otro componente electrónico externo.

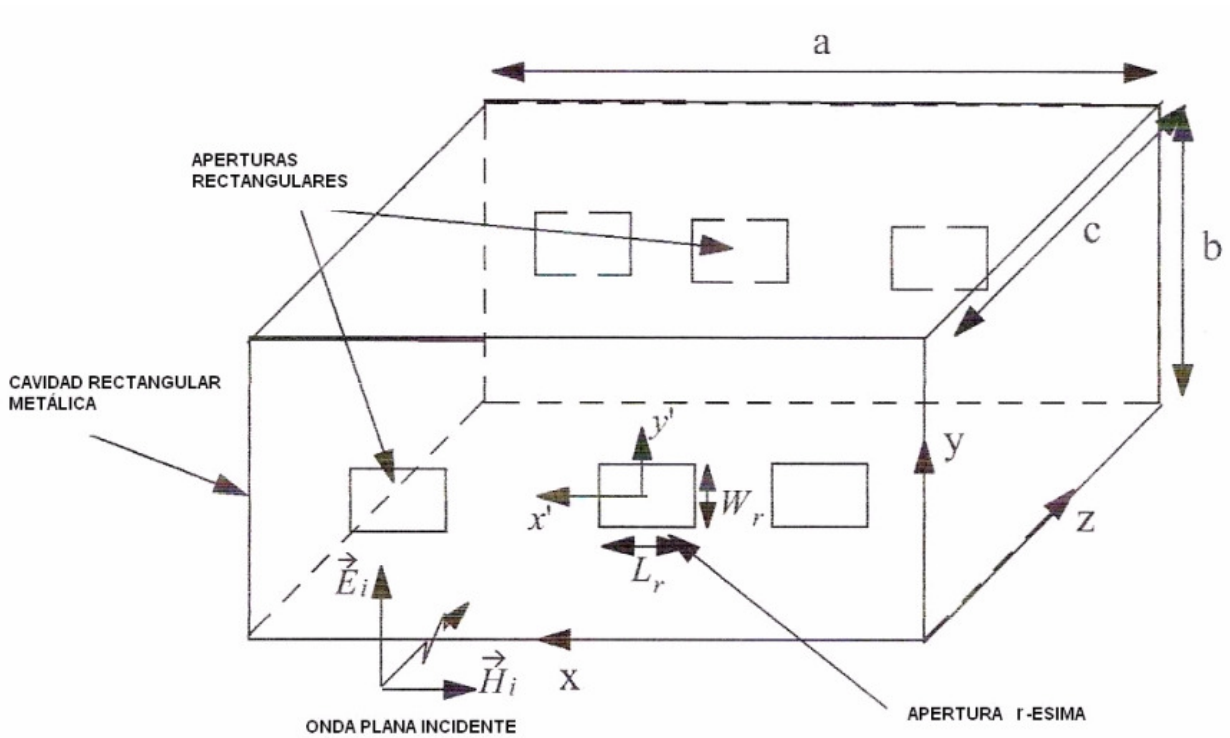


Figura 3.6: Geometría de un blindaje rectangular con aperturas excitado mediante una onda plana de incidencia normal [11].

Además, la energía electromagnética de las fuentes externas al blindaje atravesará por medio de las aperturas rectangulares hacia el interior del blindaje, pudiendo causar serias interferencias a equipos con circuitos electrónicos situados al interior del blindaje. Por lo tanto el caso antes señalado resulta ser, sin lugar a dudas, de vital importancia debido a las altas exigencias en los niveles de campo electromagnético que requiere el microscopio electrónico de transmisión para poder ser instalado y funcionar en forma correcta en todos sus modos de operación.

Para determinar la efectividad del blindaje rectangular indicado en la figura 3.6, el cual está sometido a radiaciones EM externas, se asumirá como fuente, una onda plana que incide de manera normal sobre éste. Por ende, el campo eléctrico tangencial inducido en las aperturas, acorde con la onda plana incidente estará dado por (3.29) [11]:

$$\vec{E}_{apt} = \sum_{r=1}^R \left[\hat{y} \cdot \sum_p \sum_q U_{rpq} \cdot \text{sen} \left(\frac{p \cdot \pi}{L_r} \cdot \left(\frac{L_r}{2} + x - x_{cr} \right) \right) \cdot \cos \left(\frac{q \cdot \pi}{W_r} \cdot \left(\frac{W_r}{2} + y - y_{cr} \right) \right) + \hat{x} \cdot \sum_p \sum_q V_{rpq} \cdot \cos \left(\frac{p \cdot \pi}{L_r} \cdot \left(\frac{L_r}{2} + x - x_{cr} \right) \right) \cdot \text{sen} \left(\frac{q \cdot \pi}{W_r} \cdot \left(\frac{W_r}{2} + y - y_{cr} \right) \right) \right] \quad (3.29)$$

En donde, (x_{cr}, y_{cr}) son las coordenadas del centro de la apertura r-ésima. U_{rpq} y V_{rpq} son dos voltajes desconocidos del pq-ésimo modo y de la r-ésima apertura. Además, W_r y L_r son el ancho y el largo de la r-ésima apertura. Y \hat{x} , \hat{y} son los vectores unitarios en las direcciones x e y, respectivamente. Cabe señalar también, que se ha supuesto que existen “R” aperturas en el plano $z=0$, y que:

$$\left. \begin{array}{l} U_{rpq} \neq 0 \\ y \\ V_{rpq} \neq 0 \end{array} \right\} \text{ si } \begin{array}{l} x_{cr} - \frac{L_r}{2} \leq x \leq x_{cr} + \frac{L_r}{2} \\ y_{cr} - \frac{W_r}{2} \leq y \leq y_{cr} + \frac{W_r}{2} \end{array} \quad (3.30 \text{ a})$$

$$y \quad U_{rpq} = V_{rpq} = 0 \quad \text{en otro caso} \quad (3.30 \text{ b})$$

Por ende, utilizando el principio de equivalencia, las aperturas en $z=0$ (ver superíndice) pueden ser reemplazadas por las corrientes magnéticas dadas por:

$$\vec{M}_{apt}^{z0} = \sum_{r=1}^R \left[\hat{x} \sum_p \sum_q U_{rpq} \cdot \Psi_{rpqx} - \hat{y} \sum_p \sum_q V_{rpq} \cdot \Phi_{rpqy} \right] = \sum_{r=1}^R \vec{M}_{r1} \quad (3.31)$$

$$\vec{M}_{apt}^{z0} = \sum_{r=1}^R \left[\vec{u}_r m_{rx} + \vec{v}_r m_{ry} \right]$$

Del mismo modo, las aperturas en el plano $z=c$ pueden ser reemplazadas por las corrientes magnéticas dadas por:

$$\vec{M}_{apt}^{zc} = \sum_{r=1}^R \left[\hat{y} \sum_p \sum_q A_{rpq} \cdot \Phi_{rpqy} - \hat{x} \sum_p \sum_q B_{rpq} \cdot \Psi_{rpqx} \right] = \sum_{r=1}^R \vec{M}_{r2} \quad (3.32)$$

$$\vec{M}_{apt}^{zc} = \sum_{r=1}^R \left[a_r \vec{m}_{ry} + b_r \vec{m}_{rx} \right]$$

En donde, las incógnitas “ A_{rpq} y B_{rpq} ” son las amplitudes modales análogas a “ U_{rpq} y V_{rpq} ”, pero correspondientes a las aperturas en el plano “ $z=c$ ”. Por lo que, tales amplitudes modales responden a las condiciones de “ x ” e “ y ” dadas en las ecuaciones (3.33 a) y (3.33 b), como se indica a continuación.

$$\left. \begin{array}{l} A_{rpq} \neq 0 \\ y \\ B_{rpq} \neq 0 \end{array} \right\} \text{ si } \begin{array}{l} x_{cr} - \frac{L_r}{2} \leq x \leq x_{cr} + \frac{L_r}{2} \\ y_{cr} - \frac{W_r}{2} \leq y \leq y_{cr} + \frac{W_r}{2} \end{array} \quad (3.33 \text{ a})$$

$$y \quad A_{rpq} = B_{rpq} = 0 \quad \text{en otro caso} \quad (3.33 \text{ b})$$

Además, se entiende por “ Φ ” y “ Ψ ” dentro de las ecuaciones (3.31) y (3.32) a:

$$\Phi_{rpqy} = \cos\left(\frac{p\pi}{L_r}\left(\frac{L_r}{2} + x - x_{cr}\right)\right) \cdot \text{sen}\left(\frac{q\pi}{W_r}\left(\frac{W_r}{2} + y - y_{cr}\right)\right) \quad (3.34)$$

$$\Psi_{rpqx} = \text{sen}\left(\frac{p\pi}{L_r}\left(\frac{L_r}{2} + x - x_{cr}\right)\right) \cdot \cos\left(\frac{q\pi}{W_r}\left(\frac{W_r}{2} + y - y_{cr}\right)\right) \quad (3.35)$$

Por ende, el problema del acoplamiento electromagnético a través de las aperturas de un recinto rectangular blindado, puede entonces ser dividido en dos:

- El problema de la región interna.
- Y el problema de la región externa.

Luego, tomando como supuesto que los planos $z = 0$ y $z = c$ son “planos infinitos” (de modo de evitar el acoplamiento entre las aperturas de uno y otro muro), el problema en conjunto puede ser dividido en tres zonas o regiones de interés:

- Región I para $z \leq 0$
- Región II para $0 \leq z \leq c$
- Región III para $z \geq c$

De tal forma que el problema de la región interna consistirá en el análisis del volumen rectangular encerrado por el blindaje, el cual se encontrará iluminado por una serie de fuentes de corrientes magnéticas equivalentes. En cambio, el problema de la región externa consistirá en el análisis de las fuentes de corrientes magnéticas atrás de los planos de tierra infinitos, dados por cada uno de los muros ubicados en los planos $z = 0$ y $z = c$. (Ver Figura 3.7)

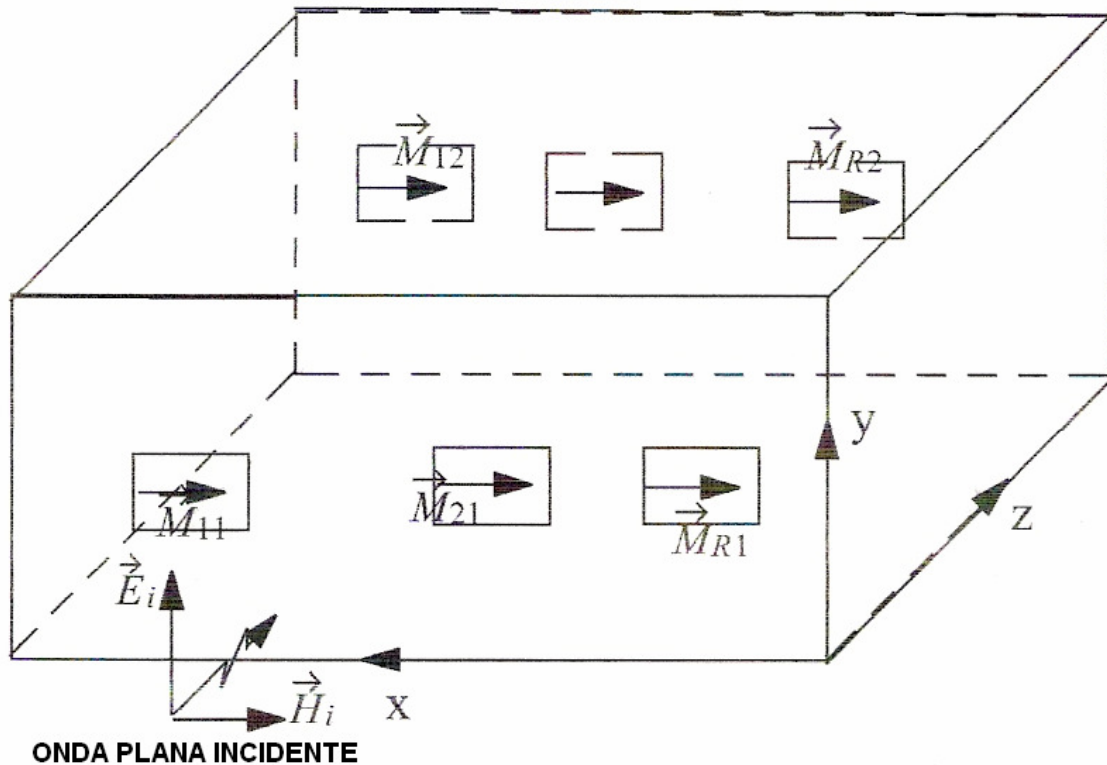


Figura 3.7: Geometría del problema equivalente, en donde las aperturas son reemplazadas por las fuentes de corrientes magnéticas [11].

3.2.1.1 Campo Electromagnético al exterior del Blindaje.

El campo electromagnético total fuera del blindaje, se obtiene mediante la superposición del campo producto de la onda plana incidente y del campo dispersado por las aperturas rectangulares. Es por ello que a continuación ambas componentes del campo electromagnético total fuera del blindaje se describen en detalle.

A.- Campo Electromagnético producto de la onda plana incidente:

El campo magnético que incide sobre el blindaje con una variación en el tiempo de $e^{j\omega t}$, puede escribirse de la siguiente manera:

$$\vec{H}_i = \left(\hat{\theta}_i \cdot H_{\theta_i} + \hat{\phi}_i \cdot H_{\phi_i} \right) \cdot e^{-\vec{k}_i \cdot \vec{r}} \tag{3.36}$$

$$\vec{H}_i = \left(\hat{\theta}_i \cdot |H_i| \cdot \cos(\alpha_o) + \hat{\phi}_i \cdot |H_i| \cdot \text{sen}(\alpha_o) \right) \cdot e^{-\vec{k}_i \cdot \vec{r}}$$

Donde:

- $\vec{k}_i \cdot \vec{r} = k_0 \cdot x \cdot \text{sen}(\theta_i) \cdot \cos(\phi_i) + k_0 \cdot y \cdot \text{sen}(\theta_i) \cdot \text{sen}(\phi_i) + k_0 \cdot z \cdot \cos(\theta_i)$.
- k_0 : Número de onda en el espacio libre ($\omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$).
- (θ_i, ϕ_i) : Ángulos de la onda plana incidente.
- α_o : Polarización de la onda plana incidente.

Por lo que se desprende de la ecuación (3.36), que las componentes en los ejes X, Y y Z del campo magnético incidente, están dadas respectivamente por:

$$H_{xi} = H_{\theta_i} \cdot \cos(\theta_i) \cdot \cos(\phi_i) - H_{\phi_i} \cdot \text{sen}(\phi_i) \tag{3.37}$$

$$H_{yi} = H_{\theta_i} \cdot \cos(\theta_i) \cdot \text{sen}(\phi_i) + H_{\phi_i} \cdot \cos(\phi_i) \tag{3.38}$$

$$H_{zi} = -H_{\theta_i} \cdot \text{sen}(\theta_i) \tag{3.39}$$

Teniéndose por lo tanto que, para un campo magnético que incide de manera normal:

$$\alpha_0=0 \quad \theta_i = 0 \quad \phi_i = 0 \quad (3.40)$$

De dicho modo, el campo incidente en el plano $z = 0$ estará dado por:

$$H_{xi} = \left| \vec{H}_i \right| \quad H_{yi} = 0 \quad H_{zi} = 0 \quad (3.41)$$

B.- Campo Electromagnético producto del “Scattering” en las aperturas:

Considérese la r -ésima apertura del plano $z = 0$. El campo electromagnético producto de \vec{M}_r (ver ecuación (3.31)), se puede obtener mediante [12]:

$$\vec{E}^I(\vec{M}_r) = -\frac{1}{\epsilon_0} \cdot \nabla \times \vec{F}^I \quad (3.42)$$

$$\vec{H}^I(\vec{M}_r) = -\frac{j\omega}{k_0^2} \cdot \left(k_0^2 \cdot \vec{F}^I + \nabla \left(\nabla \cdot \vec{F}^I \right) \right) \quad (3.43)$$

En donde el vector potencial eléctrico \vec{F}^I ¹⁴ está dado por:

$$\vec{F}^I = \frac{\epsilon_0}{4\pi} \iint_{Apt} 2 \cdot \vec{M}_r \cdot \frac{e^{-jk_0 \left| \vec{r} - \vec{r}' \right|}}{\left| \vec{r} - \vec{r}' \right|} \cdot ds \quad (3.44)$$

En la ecuación anterior, el factor “Dos” se incluye debido a que se considera el efecto de la imagen. Y en la ecuación (3.43), se ha supuesto que el plano $z = 0$ es un plano infinito. Luego, expresando entonces el factor exponencial de la ecuación (3.44) en términos de “Ondas Planas” como se describe a continuación [12]:

¹⁴ El súper índice “I” indica que el potencial pertenece a la zona 1.

$$\frac{e^{-jk_0|\vec{r}-\vec{r}'|}}{|\vec{r}-\vec{r}'|} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \frac{e^{-jk_z|z-z'|}}{k_z} \cdot e^{jk_x(x-x')+jk_y(y-y')} dk_x dk_y \quad (3.45)$$

El vector potencial eléctrico puede escribirse de la siguiente forma:

$$\vec{F}^I = \frac{\epsilon_0}{4\pi^2} \cdot \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \left(\frac{e^{-jk_z|z-z'|} \cdot \vec{m}'_r}{jk_z} \right) \cdot e^{jk_x x + jk_y y} dk_x dk_y \quad (3.46)$$

En donde:

$$\vec{m}'_{r1} = \iint M_{r1} \cdot e^{jk_x(-x') + jk_y(-y')} ds \quad (3.47)$$

y

$$k_z = \sqrt{k_0^2 - k_x^2 - k_y^2} \quad \text{para} \quad k_0^2 \geq k_x^2 + k_y^2 \quad (3.48)$$

$$k_z = -j\sqrt{k_x^2 + k_y^2 - k_0^2} \quad \text{para} \quad k_0^2 \leq k_x^2 + k_y^2 \quad (3.49)$$

Por lo que, sustituyendo la ecuación (3.46) en las ecuaciones (3.42) y (3.43), es posible obtener el campo eléctrico y magnético, producto del efecto scattering en la r-ésima apertura. Y luego, mediante la superposición del campo electromagnético producto del efecto scattering de todas las aperturas en $z = 0$, es posible obtener el campo total producto de la dispersión en las aperturas como¹⁵:

$$E_x^I = \sum_{r=1}^R \sum_{p,q} \frac{-V_{rpq}}{4\pi^2} \cdot \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} e^{-jk_z|z-z'|} \cdot \phi_{rpqy} \cdot e^{jk_x x + jk_y y} dk_x dk_y \quad (3.50)$$

¹⁵ Desde la ecuación (3.50) hasta la ecuación (3.55), ϕ_{rpqy} y ψ_{rpqx} representan las transformadas de Fourier de Φ_{rpqy} y Ψ_{rpqx} respectivamente, y sus expresiones se pueden encontrar dentro del "Anexo C-1. A".

$$E_y^I = \sum_{r=1}^R \sum_{p,q} \frac{-U_{rpq}}{4\pi^2} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-jk_z|z-z'|} \cdot \psi_{rpqx} \cdot e^{jk_x x + jk_y y} dk_x dk_y \quad (3.51)$$

$$E_z^I = \sum_{r=1}^R \sum_{p,q} \frac{-1}{4\pi^2} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-jk_z|z-z'|} \cdot \frac{(V_{rpq} \cdot \phi_{rpqy} \cdot k_x + U_{rpq} \cdot \psi_{rpqx} \cdot k_y)}{k_z} \cdot e^{jk_x x + jk_y y} dk_x dk_y \quad (3.52)$$

$$H_x^I = \sum_{r=1}^R \sum_{p,q} \frac{\omega \epsilon_0 U_{rpq}}{4\pi^2 k_0^2} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-jk_z|z-z'|} \cdot \psi_{rpqx} \cdot \frac{(k_0^2 - k_x^2)}{k_z} \cdot e^{jk_x x + jk_y y} dk_x dk_y +$$

$$+ \sum_{r=1}^R \sum_{p,q} \frac{-\omega \epsilon_0 V_{rpq}}{4\pi^2 k_0^2} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-jk_z|z-z'|} \cdot \phi_{rpqy} \cdot \frac{(-k_x k_y)}{k_z} \cdot e^{jk_x x + jk_y y} dk_x dk_y \quad (3.53)$$

$$H_y^I = \sum_{r=1}^R \sum_{p,q} \frac{-\omega \epsilon_0 V_{rpq}}{4\pi^2 k_0^2} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-jk_z|z-z'|} \cdot \phi_{rpqy} \cdot \frac{(k_0^2 - k_y^2)}{k_z} \cdot e^{jk_x x + jk_y y} dk_x dk_y +$$

$$+ \sum_{r=1}^R \sum_{p,q} \frac{\omega \epsilon_0 U_{rpq}}{4\pi^2 k_0^2} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-jk_z|z-z'|} \cdot \psi_{rpqx} \cdot \frac{(-k_x k_y)}{k_z} \cdot e^{jk_x x + jk_y y} dk_x dk_y \quad (3.54)$$

$$H_z^I = \sum_{r=1}^R \sum_{p,q} \frac{-\omega \epsilon_0}{4\pi^2 k_0^2} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-jk_z|z-z'|} \cdot (U_{rpq} \cdot \psi_{rpqx} \cdot k_x - V_{rpq} \cdot \phi_{rpqy} \cdot k_y) \cdot e^{jk_x x + jk_y y} dk_x dk_y \quad (3.55)$$

Continuando con el problema, si ahora se considera de manera análoga al caso anterior, la r -ésima apertura del plano $z = c$. El campo eléctrico y magnético disperso producto de \vec{M}_{r2} se puede obtener siguiendo el mismo procedimiento, y su resultado es:

$$E_x^{III} = \sum_{r=1}^R \sum_{p,q} \frac{A_{rpq}}{4\pi^2} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-jk_z|z-z'|} \cdot \phi_{rpqy} \cdot e^{jk_x x + jk_y y} dk_x dk_y \quad (3.56)$$

$$E_y^{III} = \sum_{r=1}^R \sum_{p,q} \frac{B_{rpq}}{4\pi^2} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-jk_z|z-z'|} \cdot \psi_{rpqx} \cdot e^{jk_x x + jk_y y} dk_x dk_y \quad (3.57)$$

$$E_z^{III} = \sum_{r=1}^R \sum_{p,q} \frac{1}{4\pi^2} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-jk_z|z-z'|} \cdot \frac{(A_{rpq} \cdot \phi_{rpqy} \cdot k_x + B_{rpq} \cdot \psi_{rpqx} \cdot k_y)}{k_z} \cdot e^{jk_x x + jk_y y} dk_x dk_y \quad (3.58)$$

$$H_x^{III} = \sum_{r=1}^R \sum_{p,q} \frac{-\omega \epsilon_0 B_{rpq}}{4\pi^2 k_0^2} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-jk_z|z-z'|} \cdot \psi_{rpqx} \cdot \frac{(k_0^2 - k_x^2)}{k_z} \cdot e^{jk_x x + jk_y y} dk_x dk_y +$$

$$+ \sum_{r=1}^R \sum_{p,q} \frac{\omega \epsilon_0 A_{rpq}}{4\pi^2 k_0^2} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-jk_z|z-z'|} \cdot \phi_{rpqy} \cdot \frac{(-k_x k_y)}{k_z} \cdot e^{jk_x x + jk_y y} dk_x dk_y \quad (3.59)$$

$$H_y^{III} = \sum_{r=1}^R \sum_{p,q} \frac{\omega \epsilon_0 A_{rpq}}{4\pi^2 k_0^2} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-jk_z|z-z'|} \cdot \phi_{rpqy} \cdot \frac{(k_0^2 - k_y^2)}{k_z} \cdot e^{jk_x x + jk_y y} dk_x dk_y +$$

$$+ \sum_{r=1}^R \sum_{p,q} \frac{-\omega \epsilon_0 B_{rpq}}{4\pi^2 k_0^2} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-jk_z|z-z'|} \cdot \psi_{rpqx} \cdot \frac{(-k_x k_y)}{k_z} \cdot e^{jk_x x + jk_y y} dk_x dk_y \quad (3.60)$$

$$H_z^{III} = \sum_{r=1}^R \sum_{p,q} \frac{-\omega \epsilon_0}{4\pi^2 k_0^2} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-jk_z|z-z'|} \cdot (B_{rpq} \cdot \psi_{rpqx} \cdot k_x - A_{rpq} \cdot \phi_{rpqy} \cdot k_y) \cdot e^{jk_x x + jk_y y} dk_x dk_y \quad (3.61)$$

3.2.1.2 Campo Electromagnético al interior del Blindaje.

Las fuentes equivalentes de corrientes magnéticas presentes en las aperturas del recinto rectangular, irradian campos electromagnéticos al interior de dicho recinto. Por lo cual, el campo electromagnético total en cualquier punto ubicado al interior de éste, se obtiene mediante la superposición de campos provenientes de cada fuente de corrientes magnéticas.

Considérese entonces la r -ésima apertura nuevamente, el campo eléctrico y magnético al interior del recinto que proviene de tal apertura se puede obtener de la siguiente manera:

$$\vec{E}^H(\vec{M}_r) = -\frac{1}{\epsilon_0} \cdot \nabla \times \vec{F}^H \quad (3.62)$$

$$\vec{H}^H(\vec{M}_r) = -\frac{j\omega}{k_o^2} \cdot \left(k_o^2 \cdot \vec{F}^H + \nabla \left(\nabla \cdot \vec{F}^H \right) \right) \quad (3.63)$$

En donde el vector potencial eléctrico \vec{F}^H satisface la ecuación de onda no homogénea siguiente:

$$\nabla^2 \vec{F}^H(x, y, z) + k_o^2 \vec{F}^H = -\epsilon_0 \vec{M}_r(x, y, z) \quad (3.64)$$

Luego, si $\tilde{G}_m(x, y, z / x', y', z')$ es la Función de Green en la cavidad del recinto rectangular para una unidad $\vec{I}(x', y', z') = x' \hat{x} + y' \hat{y} + z' \hat{z}$ en su interior, entonces el vector potencial eléctrico \vec{F}^H puede ser escrito como:

$$\vec{F}^H(x, y, z) = \iiint_{Fuente} \tilde{G}_m(x, y, z / x', y', z') \cdot \vec{M}_r(x', y', z') \cdot dx' dy' dz' \quad (3.65)$$

Y reemplazando (3.65) en la ecuación (3.64), se tiene entonces que:

$$\nabla^2 \tilde{G}_m + k_o^2 \tilde{G}_m = -\epsilon_0 \vec{I} \delta(x - x') \cdot \delta(y - y') \cdot \delta(z - z') \quad (3.66)$$

Sin embargo, como las aperturas están dentro del plano X-Y para $Z = 0$ y $Z=C$, entonces \vec{M}_r posee tanto la dirección X como Y. Por lo que $\vec{I}(x', y', z') = x' \hat{x} + y' \hat{y}$, lo que permite separar por componentes la ecuación (3.66) en:

$$\nabla^2 G_{mxx} + k_o^2 G_{mxx} = -\epsilon_0 \cdot \delta(x - x') \cdot \delta(y - y') \cdot \delta(z - z') \quad (3.67)$$

$$\nabla^2 G_{myy} + k_o^2 G_{myy} = -\epsilon_0 \cdot \delta(x - x') \cdot \delta(y - y') \cdot \delta(z - z') \quad (3.68)$$

A.- Campo Electromagnético producto del “Scattering” en las aperturas en $z = 0$.

Considerando la componente “X” de la corriente magnética y utilizando las condiciones de borde apropiadas para $z = 0$, la solución de la ecuación (3.67) es la siguiente [11]:

$$G_{mxx} = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_{om} \cdot \epsilon_{on}}{k_1 \cdot a \cdot b} \cdot \text{sen}\left(\frac{m\pi x'}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y'}{b}\right) \frac{\cos(k_1(z-c))}{\text{sen}(k_1 c)} \cdot \text{sen}\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \delta(z') \quad (3.69)$$

En donde:

$$k_1 = \sqrt{k_o^2 - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad \text{para} \quad k_o^2 \geq \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 \quad (3.70)$$

$$k_1 = -j\sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 - k_o^2} \quad \text{para} \quad k_o^2 \leq \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 \quad (3.71)$$

$$\epsilon_{0m,n} = 1 \quad \text{para} \quad m, n = 0 \quad (3.72)$$

$$\epsilon_{0m,n} = 2 \quad \text{para} \quad m, n \neq 0 \quad (3.73)$$

Por lo tanto, si se sustituye la ecuación (3.69) en la ecuación (3.65), es posible obtener el vector potencial eléctrico \vec{F}^{IIx0} - producto de la componente “x” de la fuente \vec{M}_r en el plano $z = 0$, es decir:

$$F_x^{IIx0} = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-\epsilon_0 \cdot \epsilon_{om} \cdot \epsilon_{on}}{k_1 \cdot a \cdot b} \cdot \frac{\cos(k_1(z-c))}{\text{sen}(k_1 c)} \cdot \text{sen}\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \cdot \iint_r \left(\left(\vec{M}_r(x', y', 0) \cdot \hat{x} \right) \cdot \text{sen}\left(\frac{m\pi x'}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y'}{b}\right) \right) dx' dy' \quad (3.74)$$

Luego el vector potencial eléctrico total producto de todas las aperturas, se obtiene a través de la superposición, como se indica a continuación:

$$F_x^{IIx0} = \sum_{r=1}^R \sum_{p,q} U_{rpq} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-\epsilon_0 \cdot \epsilon_{om} \cdot \epsilon_{on}}{k_1 \cdot a \cdot b} \cdot \frac{\cos(k_1(z-c))}{\text{sen}(k_1 c)} \cdot \text{sen}\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \cdot \iint_r \left(\left(\vec{\Psi}_{rpq}(x', y') \cdot \hat{x} \right) \cdot \text{sen}\left(\frac{m\pi x'}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y'}{b}\right) \right) dx' dy' \quad (3.75)$$

Pero como $\vec{\Psi}_{rpq}(x', y') = \hat{x} \cdot \Psi_{rpqx}(x', y')$, la ecuación anterior se puede escribir según componente como sigue:

$$F_x^{IIx0} = \sum_{r=1}^R \sum_{p,q} U_{rpq} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-\epsilon_0 \cdot \epsilon_{om} \cdot \epsilon_{on}}{k_1 \cdot a \cdot b} \cdot \frac{\cos(k_1(z-c))}{\text{sen}(k_1 c)} \cdot \text{sen}\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \cdot \iint_r \left(\Psi_{rpqx}(x', y') \cdot \text{sen}\left(\frac{m\pi x'}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y'}{b}\right) \right) dx' dy' \quad (3.76)$$

Finalmente, el campo magnético total al interior del recinto es obtenido a partir de las ecuaciones (3.63) y (3.75). A continuación se detalla el resultado de dicho campo magnético total producto del scattering en $z = 0$, tomando en cuenta la componente “x” de las fuentes de corrientes magnéticas M_r , según componentes “x,y,z”.

$$H_x^{II, x0} = \frac{-j\omega}{k_0^2} \sum_{r=1}^R \sum_{p,q} U_{rpq} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-\epsilon_0 \cdot \epsilon_{om} \cdot \epsilon_{on}}{k_1 \cdot a \cdot b} \cdot \left(k_0^2 - \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 \right) \cdot \text{sen} \left(\frac{m\pi x}{a} \right) \cos \left(\frac{n\pi y}{b} \right) \cdot \frac{\cos(k_1(z-c))}{\text{sen}(k_1 c)} \cdot I_{rpqmnx} \quad (3.77)$$

$$H_y^{II, x0} = \frac{-j\omega}{k_0^2} \sum_{r=1}^R \sum_{p,q} U_{rpq} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-\epsilon_0 \cdot \epsilon_{om} \cdot \epsilon_{on}}{k_1 \cdot a \cdot b} \cdot \left(\frac{m\pi}{a} \right) \cdot \left(-\frac{n\pi}{b} \right) \cdot \cos \left(\frac{m\pi x}{a} \right) \text{sen} \left(\frac{n\pi y}{b} \right) \cdot \frac{\cos(k_1(z-c))}{\text{sen}(k_1 c)} \cdot I_{rpqmnx} \quad (3.78)$$

$$H_z^{II, x0} = \frac{-j\omega}{k_0^2} \sum_{r=1}^R \sum_{p,q} U_{rpq} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-\epsilon_0 \cdot \epsilon_{om} \cdot \epsilon_{on}}{k_1 \cdot a \cdot b} \cdot \left(\frac{m\pi}{a} \right) \cdot (-k_1) \cdot \cos \left(\frac{m\pi x}{a} \right) \cos \left(\frac{n\pi y}{b} \right) \cdot \frac{\text{sen}(k_1(z-c))}{\text{sen}(k_1 c)} \cdot I_{rpqmnx} \quad (3.79)$$

En donde¹⁶:

$$I_{rpqmnx} = \iint_r \Psi_{rpqx}(x', y') \cdot \text{sen} \left(\frac{m\pi x'}{a} \right) \cdot \cos \left(\frac{n\pi y'}{b} \right) dx' dy' \quad (3.80)$$

Por consiguiente, siguiendo el mismo procedimiento anteriormente utilizado, pero ahora considerando el caso de la componente “y” de la fuente de corrientes magnéticas M_r y tomando en cuenta las condiciones de borde apropiadas, se tendrá como solución de la ecuación (3.68) (para $z = 0$), la ecuación (3.81) siguiente:

$$G_{myy} = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-\epsilon_0 \cdot \epsilon_{om} \cdot \epsilon_{on}}{k_1 \cdot a \cdot b} \cdot \cos \left(\frac{m\pi x'}{a} \right) \text{sen} \left(\frac{n\pi y'}{b} \right) \frac{\cos(k_1(z-c))}{\text{sen}(k_1 c)} \cdot \cos \left(\frac{m\pi x}{a} \right) \text{sen} \left(\frac{n\pi y}{b} \right) \delta(z') \quad (3.81)$$

¹⁶ Ver “Anexo C- 1. B”.

Luego, sustituyendo la ecuación (3.81) en la ecuación (3.65), es posible obtener el vector potencial eléctrico $\vec{F}^{II y0}$ - producto de la componente “y” de la fuente \vec{M}_r en el plano $z = 0$, es decir:

$$F_y^{II y0} = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-\epsilon_0 \cdot \epsilon_{om} \cdot \epsilon_{on}}{k_1 \cdot a \cdot b} \cdot \frac{\cos(k_1(z-c))}{\text{sen}(k_1 c)} \cdot \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \text{sen}\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \cdot \iint_r \left(\left(\vec{M}_r(x', y') \cdot \hat{y} \right) \cdot \cos\left(\frac{m\pi x'}{a}\right) \text{sen}\left(\frac{n\pi y'}{b}\right) \right) dx' dy' \quad (3.82)$$

Y como ya es sabido, el vector potencial eléctrico producto de todas las aperturas, se obtiene a través de la superposición de todas las fuentes equivalentes de corrientes magnéticas como se indica a continuación en la ecuación (3.83):

$$F_y^{II y0} = \sum_{r=1}^R \sum_{p,q} V_{rpq} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-\epsilon_0 \cdot \epsilon_{om} \cdot \epsilon_{on}}{k_1 \cdot a \cdot b} \cdot \frac{\cos(k_1(z-c))}{\text{sen}(k_1 c)} \cdot \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \text{sen}\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \cdot \iint_r \left(\left(\vec{\Phi}_{rpq}(x', y') \cdot \hat{y} \right) \cdot \cos\left(\frac{m\pi x'}{a}\right) \text{sen}\left(\frac{n\pi y'}{b}\right) \right) dx' dy' \quad (3.83)$$

Pero como $\vec{\Phi}_{rpq}(x', y') = -\hat{y} \cdot \Phi_{rpqy}(x', y')$, la ecuación anterior se puede escribir según componente como se indica a continuación en la ecuación (3.84):

$$F_y^{II y0} = \sum_{r=1}^R \sum_{p,q} -V_{rpq} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-\epsilon_0 \cdot \epsilon_{om} \cdot \epsilon_{on}}{k_1 \cdot a \cdot b} \cdot \frac{\cos(k_1(z-c))}{\text{sen}(k_1 c)} \cdot \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \text{sen}\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \cdot \iint_r \left(\Phi_{rpqy}(x', y') \cdot \cos\left(\frac{m\pi x'}{a}\right) \text{sen}\left(\frac{n\pi y'}{b}\right) \right) dx' dy' \quad (3.84)$$

Finalmente, el campo magnético total al interior del recinto es obtenido a partir de las ecuaciones (3.63) y (3.84). A continuación se detalla el resultado de dicho campo magnético total producto del scattering en $z = 0$, tomando en cuenta la componente “y” de las fuentes de corrientes magnéticas M_r , según componentes “x,y,z”.

$$H_x^{II y0} = \frac{-j\omega}{k_0^2} \sum_{r=1}^R \sum_{p,q} -V_{rpq} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-\epsilon_0 \cdot \epsilon_{om} \cdot \epsilon_{on}}{k_1 \cdot a \cdot b} \cdot \left(\frac{-m\pi}{a}\right) \cdot \left(\frac{n\pi}{b}\right) \cdot \text{sen}\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \cdot \frac{\cos(k_1(z-c))}{\text{sen}(k_1 c)} \cdot I_{rpqmn y} \quad (3.85)$$

$$H_y^{II y0} = \frac{-j\omega}{k_0^2} \sum_{r=1}^R \sum_{p,q} -V_{rpq} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-\epsilon_0 \cdot \epsilon_{om} \cdot \epsilon_{on}}{k_1 \cdot a \cdot b} \cdot \left(k_0^2 - \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2\right) \cdot \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \text{sen}\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \cdot \frac{\cos(k_1(z-c))}{\text{sen}(k_1 c)} \cdot I_{rpqmn y} \quad (3.86)$$

$$H_z^{II y0} = \frac{-j\omega}{k_0^2} \sum_{r=1}^R \sum_{p,q} -V_{rpq} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-\epsilon_0 \cdot \epsilon_{om} \cdot \epsilon_{on}}{k_1 \cdot a \cdot b} \cdot \left(\frac{n\pi}{b}\right) \cdot (-k_1) \cdot \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \cdot \frac{\text{sen}(k_1(z-c))}{\text{sen}(k_1 c)} \cdot I_{rpqmn y} \quad (3.87)$$

En donde¹⁷:

$$I_{rpqmn y} = \iint_r \Phi_{rpqy}(x', y') \cdot \cos\left(\frac{m\pi x'}{a}\right) \cdot \text{sen}\left(\frac{n\pi y'}{b}\right) dx' dy' \quad (3.88)$$

B.- Campo Electromagnético producto del “Scattering” en las aperturas en z = c.

Nuevamente aplicando el mismo procedimiento anterior, considérese la componente “x” de la fuente de corrientes magnéticas. Mediante el uso de las condiciones de borde correctas para z = c, la solución de la ecuación (3.67) será la indicada en (3.89) [11]:

¹⁷ Ver “Anexo C- 1. C”.

$$G_{mxx} = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-\epsilon_0 \cdot \epsilon_{om} \cdot \epsilon_{on}}{k_1 \cdot a \cdot b} \cdot \text{sen}\left(\frac{m\pi x'}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y'}{b}\right) \frac{\cos(k_1 z)}{\text{sen}(k_1 c)} \cdot \text{sen}\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \delta(z-c)$$

(3.89)

Reemplazando la ecuación (3.89) en la ecuación (3.65), es posible obtener el vector potencial eléctrico - $\vec{F}^{II\,xc}$ - producto de la componente "x" de la fuente \vec{M}_r en el plano $z = c$, es decir:

$$F_x^{II\,xc} = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-\epsilon_0 \cdot \epsilon_{om} \cdot \epsilon_{on}}{k_1 \cdot a \cdot b} \cdot \frac{\cos(k_1 z)}{\text{sen}(k_1 c)} \cdot \text{sen}\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \cdot \iint_r \left(\left(\vec{M}_r(x', y', c) \cdot \hat{x} \right) \cdot \text{sen}\left(\frac{m\pi x'}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y'}{b}\right) \right) dx' dy'$$

(3.90)

Como ya es sabido, mediante la superposición es posible obtener el vector potencial eléctrico total producto del efecto de todas las aperturas en $z = c$.

$$F_x^{II\,xc} = \sum_{r=1}^R \sum_{p,q} B_{rpq} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-\epsilon_0 \cdot \epsilon_{om} \cdot \epsilon_{on}}{k_1 \cdot a \cdot b} \cdot \frac{\cos(k_1 z)}{\text{sen}(k_1 c)} \cdot \text{sen}\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \cdot \iint_r \left(\left(\vec{\Psi}_{rpq}(x', y', c) \cdot \hat{x} \right) \cdot \text{sen}\left(\frac{m\pi x'}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y'}{b}\right) \right) dx' dy'$$

(3.91)

Pero como $\vec{\Psi}_{rpq}(x', y', c) = -\hat{x} \cdot \Psi_{rpqx}(x', y')$, la ecuación anterior se puede escribir según componente como a continuación se indica en la ecuación (3.92):

$$F_x^{II\,xc} = \sum_{r=1}^R \sum_{p,q} -B_{rpq} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-\epsilon_0 \cdot \epsilon_{om} \cdot \epsilon_{on}}{k_1 \cdot a \cdot b} \cdot \frac{\cos(k_1 z)}{\text{sen}(k_1 c)} \cdot \text{sen}\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \cdot \iint_r \left(\Psi_{rpqx}(x', y') \cdot \text{sen}\left(\frac{m\pi x'}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y'}{b}\right) \right) dx' dy'$$

(3.92)

Finalmente, el campo magnético total al interior del recinto es obtenido a partir de las ecuaciones (3.63) y (3.92). A continuación se detalla el resultado de dicho campo magnético total producto del scattering en $z = c$, tomando en cuenta la componente “x” de las fuentes de corrientes magnéticas M_r , según componentes “x,y,z”.

$$H_x^{II,xc} = \frac{-j\omega}{k_0^2} \sum_{r=1}^R \sum_{p,q} -B_{rpq} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-\epsilon_0 \cdot \epsilon_{om} \cdot \epsilon_{on}}{k_1 \cdot a \cdot b} \cdot \left(k_0^2 - \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 \right) \cdot \text{sen} \left(\frac{m\pi x}{a} \right) \cos \left(\frac{n\pi y}{b} \right) \cdot \frac{\cos(k_1 z)}{\text{sen}(k_1 c)} \cdot I_{rpqmnx} \quad (3.93)$$

$$H_y^{II,xc} = \frac{-j\omega}{k_0^2} \sum_{r=1}^R \sum_{p,q} -B_{rpq} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-\epsilon_0 \cdot \epsilon_{om} \cdot \epsilon_{on}}{k_1 \cdot a \cdot b} \cdot \left(\frac{m\pi}{a} \right) \cdot \left(-\frac{n\pi}{b} \right) \cdot \cos \left(\frac{m\pi x}{a} \right) \text{sen} \left(\frac{n\pi y}{b} \right) \cdot \frac{\cos(k_1 z)}{\text{sen}(k_1 c)} \cdot I_{rpqmnx} \quad (3.94)$$

$$H_z^{II,xc} = \frac{-j\omega}{k_0^2} \sum_{r=1}^R \sum_{p,q} -B_{rpq} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-\epsilon_0 \cdot \epsilon_{om} \cdot \epsilon_{on}}{k_1 \cdot a \cdot b} \cdot \left(\frac{m\pi}{a} \right) \cdot (-k_1) \cdot \cos \left(\frac{m\pi x}{a} \right) \cos \left(\frac{n\pi y}{b} \right) \cdot \frac{\text{sen}(k_1 z)}{\text{sen}(k_1 c)} \cdot I_{rpqmnx} \quad (3.95)$$

Y resolviéndose ahora el mismo problema anterior, pero esta vez considerando la componente “y” de la fuente de corrientes magnéticas. Mediante el uso de las condiciones de borde correctas para $z = c$, la solución de la ecuación (3.68) será la señalada en la ecuación (3.96) indicada a continuación [11]:

$$G_{myy} = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-\epsilon_0 \cdot \epsilon_{om} \cdot \epsilon_{on}}{k_1 \cdot a \cdot b} \cdot \cos \left(\frac{m\pi x'}{a} \right) \text{sen} \left(\frac{n\pi y'}{b} \right) \frac{\cos(k_1 z)}{\text{sen}(k_1 c)} \cdot \cos \left(\frac{m\pi x}{a} \right) \text{sen} \left(\frac{n\pi y}{b} \right) \delta(z - c) \quad (3.96)$$

Reemplazando la ecuación (3.96) en la ecuación (3.65), es posible obtener el vector potencial eléctrico $\vec{F}^{II\ y c}$ - producto de la componente “y” de la fuente \vec{M}_r en el plano $z = c$, es decir:

$$F_y^{II\ y c} = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-\epsilon_0 \cdot \epsilon_{om} \cdot \epsilon_{on}}{k_1 \cdot a \cdot b} \cdot \frac{\cos(k_1 z)}{\text{sen}(k_1 c)} \cdot \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \text{sen}\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \cdot \iint_r \left(\left(\vec{M}_r(x', y', c) \cdot \hat{y} \right) \cdot \cos\left(\frac{m\pi x'}{a}\right) \text{sen}\left(\frac{n\pi y'}{b}\right) \right) dx' dy' \quad (3.97)$$

El vector potencial eléctrico producto de todas las aperturas, se obtiene a través de la superposición de todas las fuentes equivalentes de corrientes magnéticas, i.e:

$$F_y^{II\ y c} = \sum_{r=1}^R \sum_{p,q} A_{rpq} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-\epsilon_0 \cdot \epsilon_{om} \cdot \epsilon_{on}}{k_1 \cdot a \cdot b} \cdot \frac{\cos(k_1 z)}{\text{sen}(k_1 c)} \cdot \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \text{sen}\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \cdot \iint_r \left(\left(\vec{\Phi}_{rpq}(x', y', c) \cdot \hat{y} \right) \cdot \cos\left(\frac{m\pi x'}{a}\right) \text{sen}\left(\frac{n\pi y'}{b}\right) \right) dx' dy' \quad (3.98)$$

Como $\vec{\Phi}_{rpq}(x', y', c) = \hat{y} \cdot \Phi_{rpqy}(x', y')$, la ecuación anterior se puede escribir según componente como sigue en la ecuación (3.99):

$$F_y^{II\ y c} = \sum_{r=1}^R \sum_{p,q} A_{rpq} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-\epsilon_0 \cdot \epsilon_{om} \cdot \epsilon_{on}}{k_1 \cdot a \cdot b} \cdot \frac{\cos(k_1 z)}{\text{sen}(k_1 c)} \cdot \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \text{sen}\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \cdot \iint_r \left(\Phi_{rpqy}(x', y') \cdot \cos\left(\frac{m\pi x'}{a}\right) \text{sen}\left(\frac{n\pi y'}{b}\right) \right) dx' dy' \quad (3.99)$$

Finalmente, el campo magnético total al interior del recinto es obtenido a partir de las ecuaciones (3.63) y (3.98). A continuación se detalla el resultado de dicho campo magnético total producto del scattering en $z = c$, tomando en cuenta la componente “y” de las fuentes de corrientes magnéticas M_r , según componentes “x,y,z”.

$$H_x^{II\ y c} = \frac{-j\omega}{k_0^2} \sum_{r=1}^R \sum_{p,q} A_{rpq} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-\epsilon_0 \cdot \epsilon_{om} \cdot \epsilon_{on}}{k_1 \cdot a \cdot b} \cdot \left(-\frac{m\pi}{a}\right) \left(\frac{n\pi}{b}\right) \cdot \text{sen}\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \cdot \frac{\cos(k_1 z)}{\text{sen}(k_1 c)} \cdot I_{rpqmn y} \quad (3.100)$$

$$H_y^{II\ y c} = \frac{-j\omega}{k_0^2} \sum_{r=1}^R \sum_{p,q} A_{rpq} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-\epsilon_0 \cdot \epsilon_{om} \cdot \epsilon_{on}}{k_1 \cdot a \cdot b} \cdot \left(k_0^2 - \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2\right) \cdot \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \text{sen}\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \cdot \frac{\cos(k_1 z)}{\text{sen}(k_1 c)} \cdot I_{rpqmn y} \quad (3.101)$$

$$H_z^{II\ y c} = \frac{-j\omega}{k_0^2} \sum_{r=1}^R \sum_{p,q} A_{rpq} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-\epsilon_0 \cdot \epsilon_{om} \cdot \epsilon_{on}}{k_1 \cdot a \cdot b} \cdot (-k_1) \cdot \left(\frac{n\pi}{b}\right) \cdot \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \cdot \frac{\text{sen}(k_1 z)}{\text{sen}(k_1 c)} \cdot I_{rpqmn y} \quad (3.102)$$

3.2.1.3 Derivación de Ecuaciones Integrales y Sistema Matricial.

Para obtener unicidad en la solución del problema, los campos electromagnéticos pertenecientes a las tres regiones deben satisfacer las relaciones de continuidad en las superficies comunes. Por lo tanto, la componente tangencial del campo eléctrico en las aperturas ha de ser continuo, al igual que la componente tangencial del campo magnético en las aperturas. De ello surgen una serie de ecuaciones integrales que en conjunto con el método de los momentos, permiten despejar las incógnitas del problema, que en este caso serían las magnitudes de las corrientes magnéticas en las aperturas del recinto rectangular. De esta manera, el campo magnético tangencial total al interior del recinto rectangular con aperturas en dos de sus muros opuestos es [11]:

$$H_x^{II} = \left(H_x^{II\ x0} + H_x^{II\ y0} + H_x^{II\ xc} + H_x^{II\ yc} \right) \quad (3.103)$$

$$H_y^{II} = \left(H_y^{II\ x0} + H_y^{II\ y0} + H_y^{II\ xc} + H_y^{II\ yc} \right) \quad (3.104)$$

Luego, utilizando la continuidad del campo magnético tangencial en el plano $z = 0$ se tiene que:

$$H_{xi} \Big|_{z=0} + H_x^I \Big|_{z=0} = \left(H_x^{II\ x0} + H_x^{II\ y0} + H_x^{II\ xc} + H_x^{II\ yc} \right) \Big|_{z=0} \quad (3.105)$$

$$H_{yi} \Big|_{z=0} + H_y^I \Big|_{z=0} = \left(H_y^{II\ x0} + H_y^{II\ y0} + H_y^{II\ xc} + H_y^{II\ yc} \right) \Big|_{z=0} \quad (3.106)$$

Análogamente para el plano $z = c$.

$$\left(H_x^{II\ x0} + H_x^{II\ y0} + H_x^{II\ xc} + H_x^{II\ yc} \right) \Big|_{z=c} = H_x^{III} \Big|_{z=c} \quad (3.107)$$

$$\left(H_y^{II\ x0} + H_y^{II\ y0} + H_y^{II\ xc} + H_y^{II\ yc} \right) \Big|_{z=c} = H_y^{III} \Big|_{z=c} \quad (3.108)$$

Cabe señalar que en las ecuaciones anteriores se ha supuesto que sobre el recinto rectangular incide una onda plana desde $z = -\infty$.

Finalmente, las ecuaciones (3.105) a la (3.108) anteriormente señaladas, representan al conjunto de ecuaciones integrales que gracias a la ayuda del “Método de Galerkin”, dan origen al sistema de ecuaciones matriciales de la forma $[A][X]=[B]$, que ha de ser resuelto numéricamente para poder obtener la magnitud de las corrientes magnéticas en las aperturas del recinto rectangular. Dicho sistema matricial, se describe a continuación¹⁸ mediante la ecuación (3.109):

$$\begin{bmatrix} Y_{rpq^t p^t q^t}^{x1x1} & Y_{rpq^t p^t q^t}^{x1y1} & Y_{rpq^t p^t q^t}^{x1y2} & Y_{rpq^t p^t q^t}^{x1x2} \\ Y_{rpq^t p^t q^t}^{y1x1} & Y_{rpq^t p^t q^t}^{y1y1} & Y_{rpq^t p^t q^t}^{y1y2} & Y_{rpq^t p^t q^t}^{y1x2} \\ Y_{rpq^t p^t q^t}^{x2x1} & Y_{rpq^t p^t q^t}^{x2y1} & Y_{rpq^t p^t q^t}^{x2y2} & Y_{rpq^t p^t q^t}^{x2x2} \\ Y_{rpq^t p^t q^t}^{y2x1} & Y_{rpq^t p^t q^t}^{y2y1} & Y_{rpq^t p^t q^t}^{y2y2} & Y_{rpq^t p^t q^t}^{y2x2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{rpq} \\ V_{rpq} \\ A_{rpq} \\ B_{rpq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{r' p' q' xi} \\ I_{r' p' q' yi} \\ O \\ O \end{bmatrix} \quad (3.109)$$

¹⁸ Ver también referencia [13], en donde se muestra sistema reducido producto de aperturas en un solo muro (en $z=0$).

En donde la matriz $[A]$ es obtenida a partir de los parámetros físicos dados por la geometría del problema. El vector $[X]$, está dado por las amplitudes modales (desconocidas) de las corrientes magnéticas equivalentes inducidas en las aperturas, de acuerdo al campo incidente dado. Tales amplitudes modales, generalmente toman valores “distintos de cero” en las aperturas y “cero” en otro caso (ver ecuaciones: (3.30 a), (3.30 b), (3.33 a) y (3.33 b)). Finalmente el vector $[B]$, estará determinado por la onda incidente que actúa como campo de excitación, en donde “ $I_{r'p'q'xi}$ ” representa al acoplamiento de la función de prueba con la componente “x” de la onda plana incidente e “ $I_{r'p'q'yi}$ ” representa al acoplamiento de la función de prueba con la componente “y” de la onda plana incidente¹⁹.

3.2.2 Elección del material adecuado para efectuar el blindaje.

Hoy en día, los materiales más comúnmente utilizados en el área de los blindajes electromagnéticos son: el Acero, el Cobre y el Aluminio. Siendo este último debido a su peso, costos de ensamble y las características de oxidación, generalmente el preferido en aplicaciones en donde el peso es una limitante fundamental (como en el caso de los aviones y sistemas móviles de blindaje). Sin embargo, no es recomendable para el caso de instalaciones en un lugar fijo, en las cuales por lo general se suele utilizar Cobre. La mayor ventaja del Cobre es su fácil trabajo, y es justamente por ello que generalmente es la primera alternativa en la que se piensa cuando se desea efectuar un blindaje, sin embargo existen muchos factores determinantes de la efectividad del blindaje, por lo que no es posible elegir cualquier material de manera libre. Entre dichos factores, se encuentran los que dependen directamente de las propiedades del material, como es el caso de: la respuesta de frecuencia del material, su permeabilidad, su conductividad, el espesor de éste, etc. Además cabe señalar, que también a la hora de diseñar un blindaje electromagnético determinado, existirán restricciones de “presupuesto” y “disponibilidad del material”, que son puntos no menos importantes a considerar a la hora de realizar el proyecto.

Por otro lado, en las nuevas construcciones, el Acero con bajo porcentaje de Carbono es el material preferido, ya que su costo es relativamente bajo y posee excelentes propiedades para el blindaje de campos magnéticos de baja frecuencia. La única desventaja del Acero, es su tendencia a corroerse cuando se expone a ambientes húmedos. No obstante aquello, el Acero

¹⁹ El detalle de los parámetros representados en el sistema de la ecuación (3.109) se encuentra en el “Anexo C-2”.

galvanizado podría solucionar este problema, pero sin embargo es difícil de soldar ya que produce gases tóxicos, y por ende, requiere de un sistema de ventilación especial para que el equipo encargado de su montaje quede protegido de dichos gases. Generalmente, lo que se utiliza es proteger las soldaduras del Acero con una pintura con un alto contenido de Zinc, la cual actúa como ánodo de sacrificio evitando la corrosión del acero. Tal pintura se suele llamar “Pintura de Galvanizado en Frío” y es de fácil acceso, ya que en cualquier tienda del ramo es posible encontrarla²⁰. Cabe señalar también, que el espesor de las láminas de Acero se relaciona exclusivamente con los requerimientos de efectividad del blindaje y la facilidad que existe para soldar dichas láminas. Puesto que el mínimo espesor que tolera ser soldado con confiabilidad (evitando cualquier tipo de filtraciones de interferencias electromagnéticas), es de alrededor de 1.3mm (18 AWG).

En resumen, producto que las frecuencias existentes en las inmediaciones de la Sala TEM y dentro de ella son de tipo industrial, y a causa de que principalmente se debe blindar el campo magnético perturbador para que el microscopio electrónico pueda funcionar en todos sus modos de operación y obtener máxima resolución (utilizar el Modo S-TEM), es requerido un material altamente permeable. De dicho modo, y luego de observar la efectividad del blindaje proporcionado por diversos materiales²¹, en conjunto con el análisis de las características del “Fierro Silicoso de Grano Orientado M- 4”²², se ha escogido efectuar el blindaje de la Sala TEM con este último material, ya que brinda para “este caso en particular” las más altas prestaciones.

3.2.3 Efectividad del Blindaje mediante MoM del material escogido.

Como ya se ha desarrollado el MoM y se ha especificado el tipo de material con el cual se llevará a cabo el blindaje, el paso siguiente es entonces poder calcular la efectividad del blindaje que proporcionaría el Fierro Silicoso de Grano Orientado M-4 mediante la aplicación del método de los momentos.

Para realizar dicho cálculo, es de suma importancia notar que la Sala TEM posee una altura interior de alrededor de 3m (sin contar el cielo falso), y que además su largo y ancho son de

²⁰ Dicha pintura se “dice” ser conductora, pero en realidad la cantidad de Zinc en ella no es lo suficientemente alta como para darle un carácter de “Pintura Conductora”. Ver experimentos realizados en el “Anexo C-3”

²¹ Lo cual se indica en los gráficos que se entregan en el “Anexo C- 4”.

²² En el “Anexo C- 5”, se entrega la ficha técnica del Fierro Silicoso de Grano Orientado M-4.

alrededor de 5.75m y 4.50m respectivamente. Tales medidas físicas del recinto, son por lo demás muy superiores a las estimadas como el espacio mínimo requerido según las especificaciones del fabricante del microscopio “FEI Company”, quienes sugieren como espacio mínimo para el cuarto del microscopio “Tecnai F20 UT” una sala de unos 4.5m de largo por 3m de ancho y 2,5m de alto, incluyendo en tal espacio una “ante- cámara” y un “cuarto de servicio” como es posible observar en la figura 3.8 entregada a continuación:

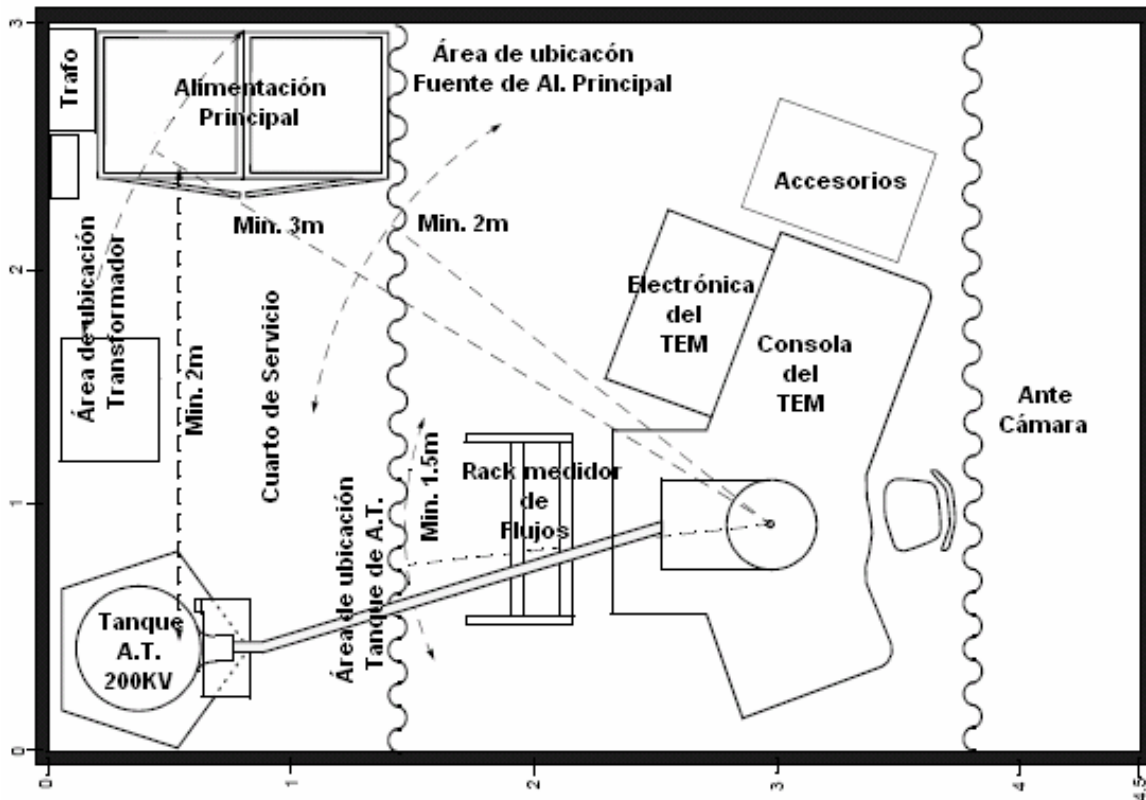


Figura 3.8: Tecnai F20 U.T, disposición de equipos en un cuarto cuyas dimensiones son las mínimas aceptables.

Es así como se ha decidido que el blindaje de la Sala TEM tenga las dimensiones descritas en la “Figura 3.9”, la cual muestra el modelo gráfico del blindaje electromagnético de lámina simple en Fierro Silicoso M-4 desarrollado mediante el Software “FEKO”. Dichas dimensiones pasan a ser indicadas a continuación:

- Largo : 4.20 m.
- Ancho : 4.50 m.
- Alto : 2.95 m.

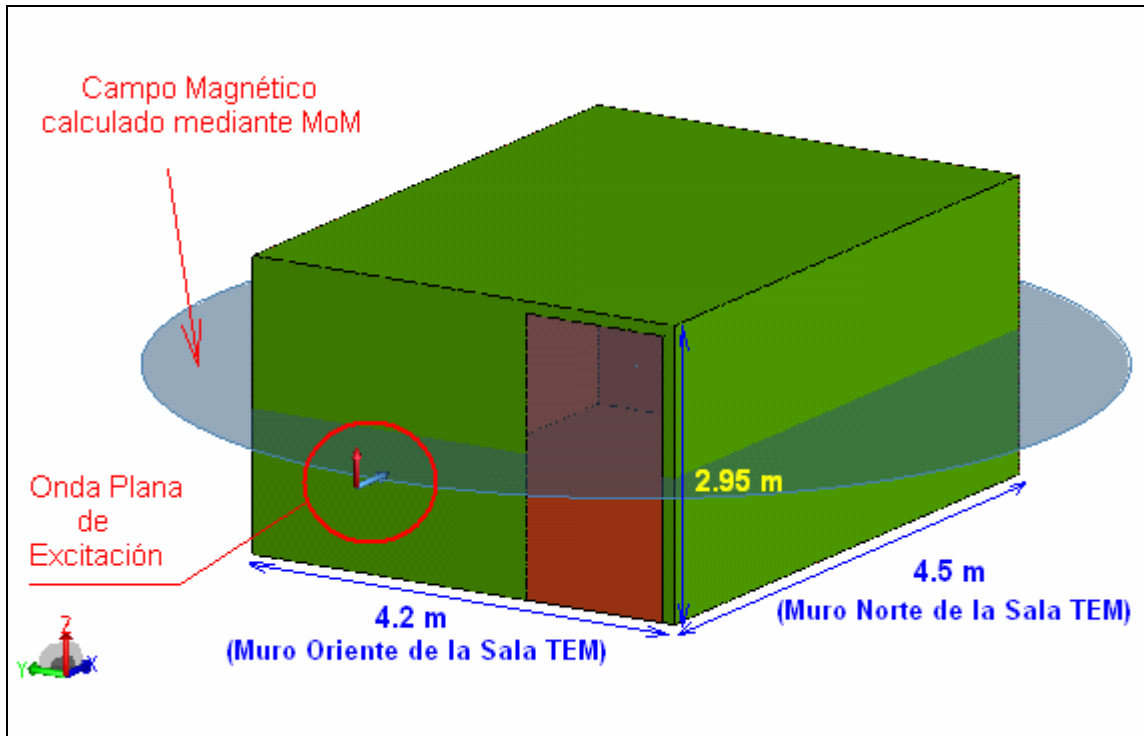


Figura 3.9: Configuración física del blindaje electromagnético estimado para la Sala TEM - Implementación con lámina simple de Fierro Silicoso de grano orientado M-4, mediante la aplicación gráfica de el software FEKO denominada “CAD – FEKO”.

De las medidas anteriormente señaladas, es claro observar que el espacio que falta para completar los 5.75m de largo, se ha reservado para instalar en él un “Cuarto de Servicio”. Dicho cuarto contendrá toda la alimentación eléctrica del TEM, bombas de vacío y algún mueble de accesorios. A continuación se entregan las dimensiones del cuarto de servicio:

- Largo : 1.55m.
- Ancho : 4.50m.
- Alto : 2.95m.

De esta forma entonces, se logra cumplir con los requerimientos espaciales y las distancias mínimas requeridas por el fabricante del equipo. Además, de paso, es posible aislar al microscopio electrónico de transmisión de las EMI que son generadas por: la fuente de alimentación principal, el tanque de alta tensión de 200kV y el transformador principal, entre muchas otras.

Una vez señalado todo lo anterior, a continuación se entregarán los resultados obtenidos del cálculo mediante MoM del blindaje electromagnético que albergaría en su interior al microscopio electrónico de transmisión. Dicho blindaje, como es posible al observar en el modelo de la figura 3.9, está constituido por una sola capa del material y presenta una gran apertura rectangular. Esta última, tiene por objetivo simular el efecto de la puerta de acceso a la Sala TEM cuando se encuentra completamente abierta. De tal forma, se estaría efectuando el cálculo de la efectividad del blindaje de la Sala TEM en la peor condición en la cual se podría estar trabajando con el microscopio al interior del cuarto (es decir: con la puerta abierta, y por ende un alto porcentaje de ingreso de EMI a la Sala TEM como consecuencia de las filtraciones externas por la puerta de acceso principal).

A continuación se presentaran las figuras 3.10 y 3.11, en las cuales es posible observar el modelo diseñado en “CAD FEKO” del blindaje de la Sala TEM. En ellas es posible observar la onda plana que se ha utilizado como medio de excitación, además se observa también la “grilla” que se requiere montar sobre el objeto modelado de manera de “equiespaciarse” el cálculo en la superficie del blindaje, que para este caso particular es de alrededor de 20cm.

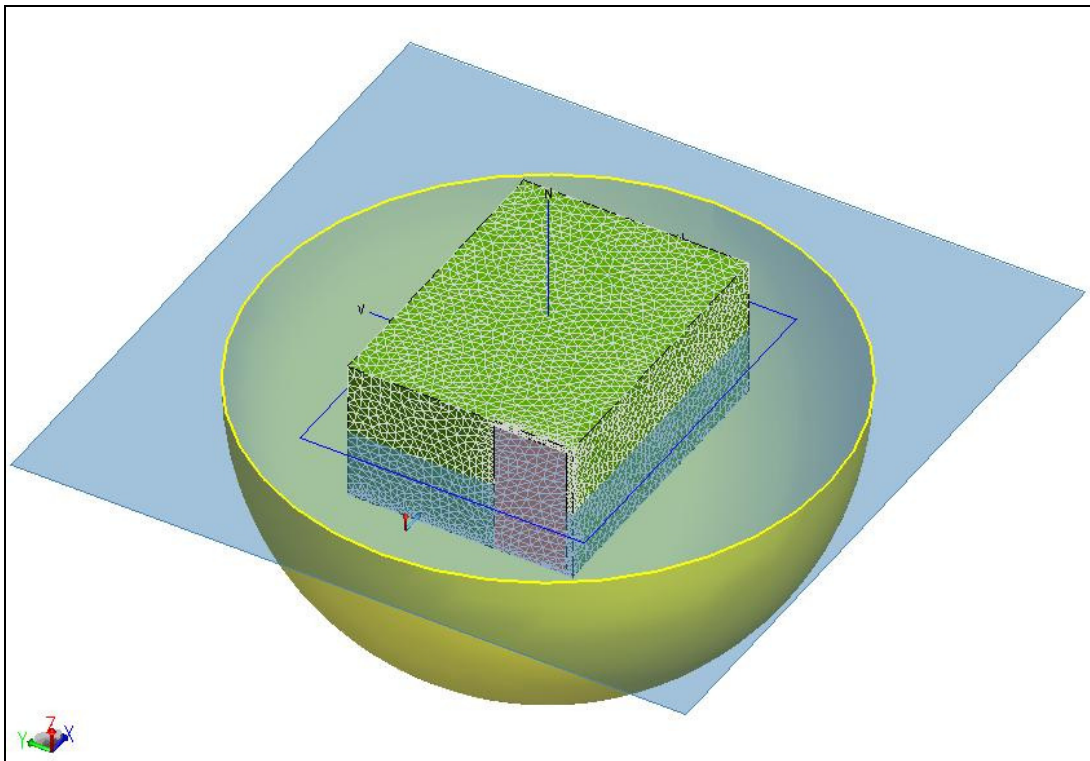


Figura 3.10: Modelamiento en “CAD FEKO” del blindaje de la Sala TEM.

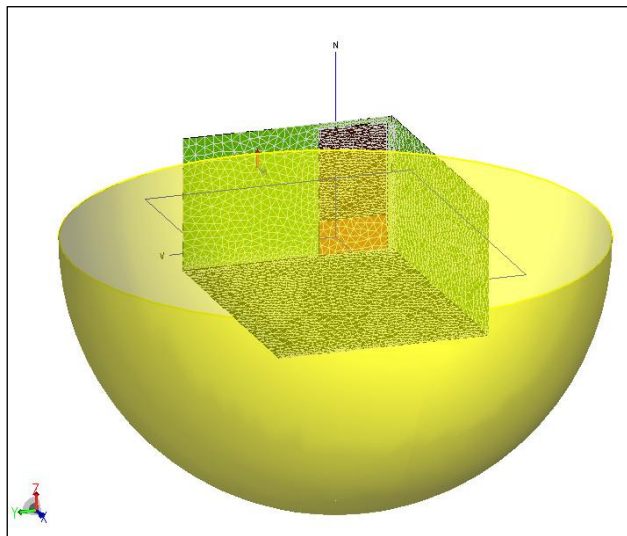


Figura 3.11: Vista inferior del modelamiento en “CAD FEKO” del blindaje de la Sala TEM.

Como consecuencia de lo anterior, se tiene que los resultados para la S.E._B de la a sala TEM obtenida del cálculo mediante la simulación con el software “FEKO” (Figuras 3.9, 3.10 y 3.11) y el algoritmo de cálculo dado por el MoM, son los indicados en las figuras 3.12 y 3.13 siguientes:

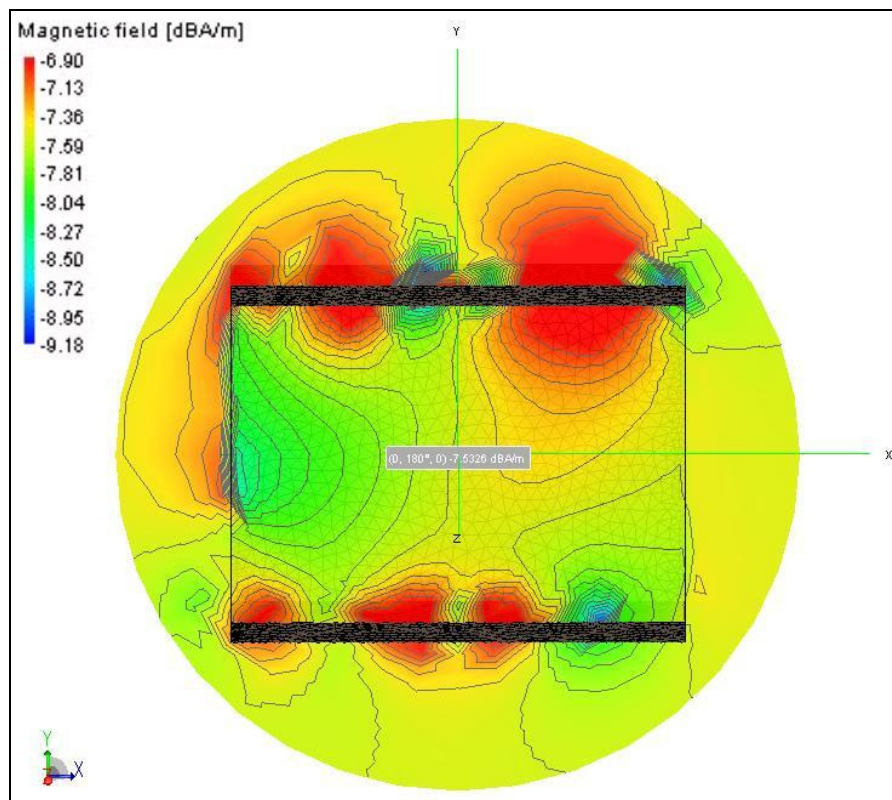


Figura 3.12: Cálculo de la S.E._B mediante MoM del blindaje electromagnético proporcionado por una sola lámina de Fierro Silicoso de Grano Orientado M-4 (Plano X-Y) – Puerta abierta.

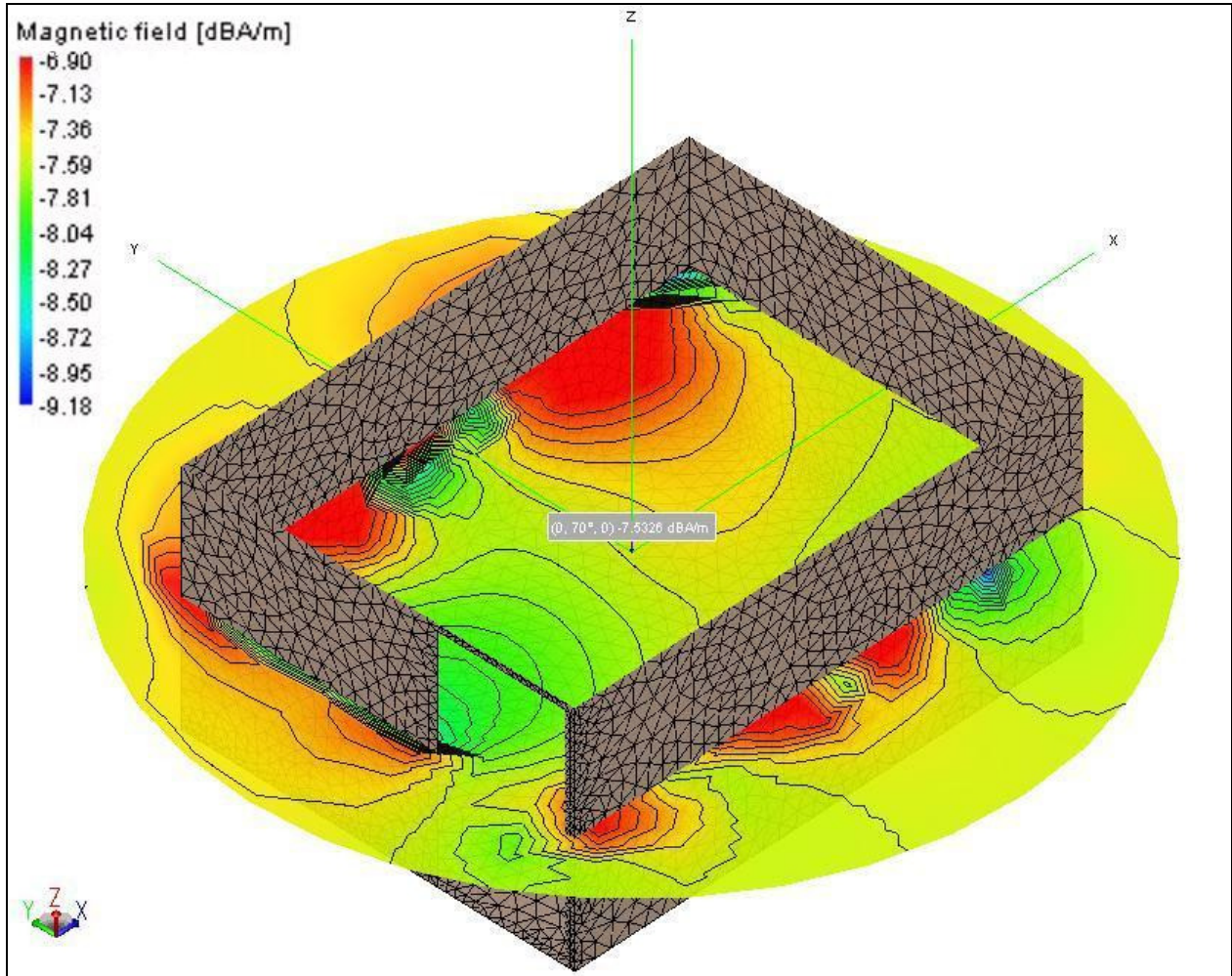


Figura 3.13: Cálculo de la S.E._B mediante MoM del blindaje electromagnético proporcionado por una sola lámina de Fierro Silicoso de Grano Orientado M-4 – Puerta abierta.

Como es posible observar en las figuras anteriores, si por algún descuido es dejada abierta la puerta de la Sala TEM mientras el microscopio está siendo utilizado, entonces el modulo de la atenuación efectiva del campo magnético incidente sobre el muro en el cual se ubica dicha puerta de acceso principal, será de alrededor de 7.53dB en el centro de la Sala TEM.

Por otra parte, también es interesante observar los resultados obtenidos para la efectividad del blindaje del campo eléctrico. Por ello a continuación se entregan dichos resultados, en la figura 3.14 y la figura 3.15.

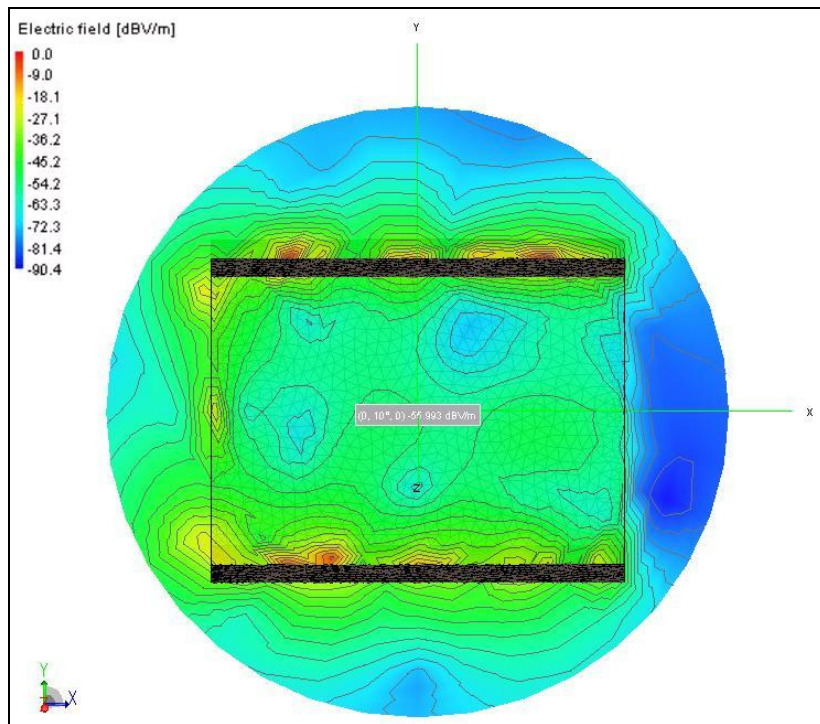


Figura 3.14: Cálculo en FEKO, S.E._E para blindaje Sala TEM (Plano X-Y) – Puerta abierta.

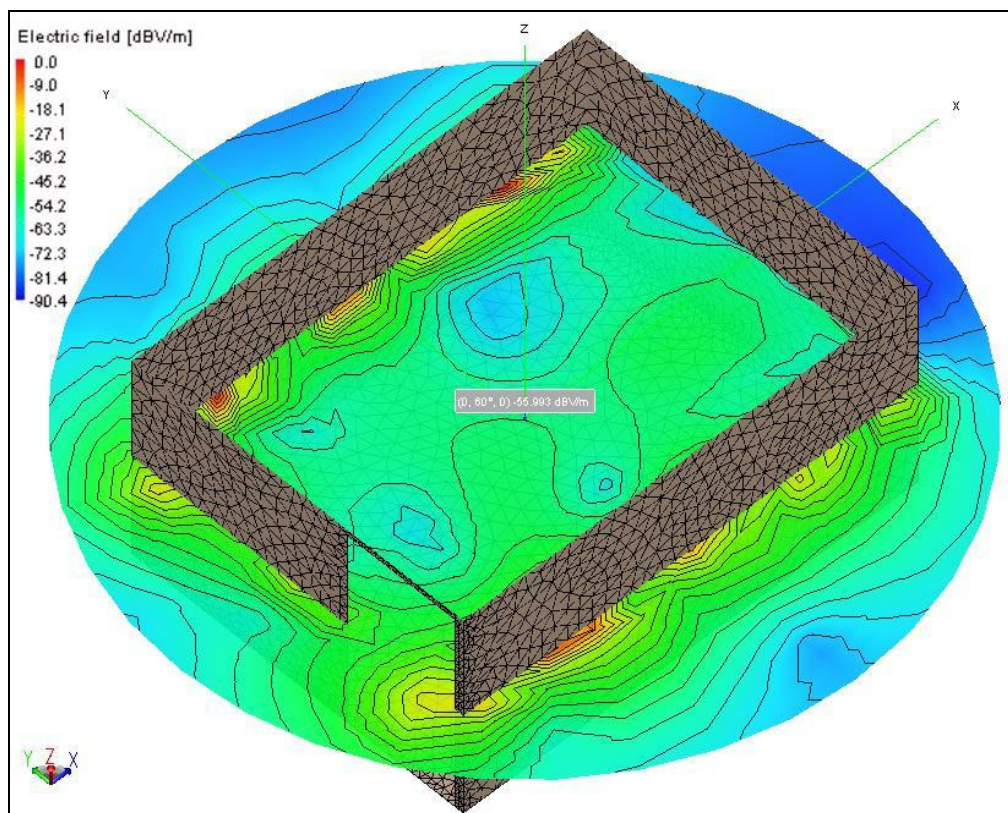


Figura 3.15: Cálculo en FEKO, S.E._E blindaje de la Sala TEM – Puerta abierta.

De las figuras 3.14 y 3.15, es posible observar que en el centro de la Sala TEM el módulo de la efectividad del blindaje del campo eléctrico será de 55.99dB. Lo cual comprueba que pese a existir una apertura de tamaño considerable, resulta muy fácil blindar el campo eléctrico. Puesto que como se ha visto en la ecuación (2.19), que la $(S.E.E)_{dB}$ sea de 55.99dB implicaría que:

$$(S.E.E)_{dB} = 20 \cdot \log\left(\frac{1}{T_E}\right) = 55.99 \text{ dB} \quad (3.110)$$

Por lo tanto:

$$T_E = 0.001586 \quad (3.111)$$

Y según la ecuación (2.17) y (2.18):

$$\frac{E_{in}}{E_{exit}} = 0.001586 \quad (3.112)$$

Es decir que el campo eléctrico que logra pasar al interior de la Sala TEM es equivalente a “una milésima” del campo eléctrico que incide sobre el muro en el cual se encuentra la puerta. Por lo que efectivamente es posible notar que el campo eléctrico al interior de la Sala TEM será prácticamente nulo, pese a la existencia de la puerta abierta.

3.2.4 Efectividad del Blindaje Sala TEM para el caso ideal.

Otra pregunta que resulta interesante de responder es la siguiente: ¿Qué pasaría en el caso que la puerta de la Sala TEM se cerrara en forma correcta, y el blindaje electromagnético de la Sala TEM actuase en su condición “ideal”?.

Para poder responder a tal interrogante, a continuación se entregarán los resultados de la modelación del blindaje de la Sala TEM, para el caso en que la puerta se encuentra totalmente cerrada. Como el MoM aplica para el caso en que existen aperturas en los muros del blindaje (vector $[X]$ de la ecuación (3.109) distinto de cero), la modelación en FEKO (para este caso particular) fue resuelta por medio del método de los elementos finitos. Los resultados encontrados se entregan en las figuras 3.16, 3.17, 3.18 y 3.19 siguientes:

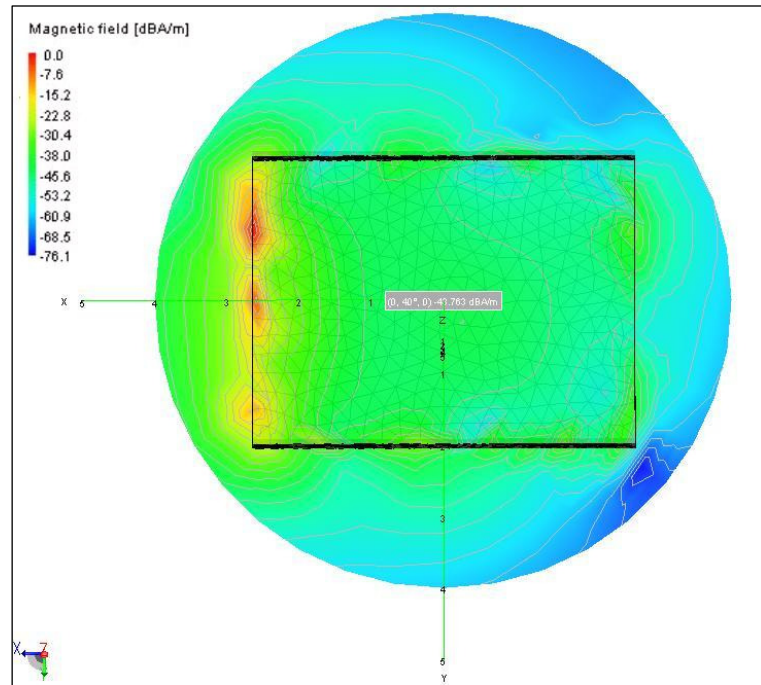


Figura 3.16: Cálculo en FEKO, S.E._B blindaje Sala TEM (Plano X-Y) – “Caso ideal”.

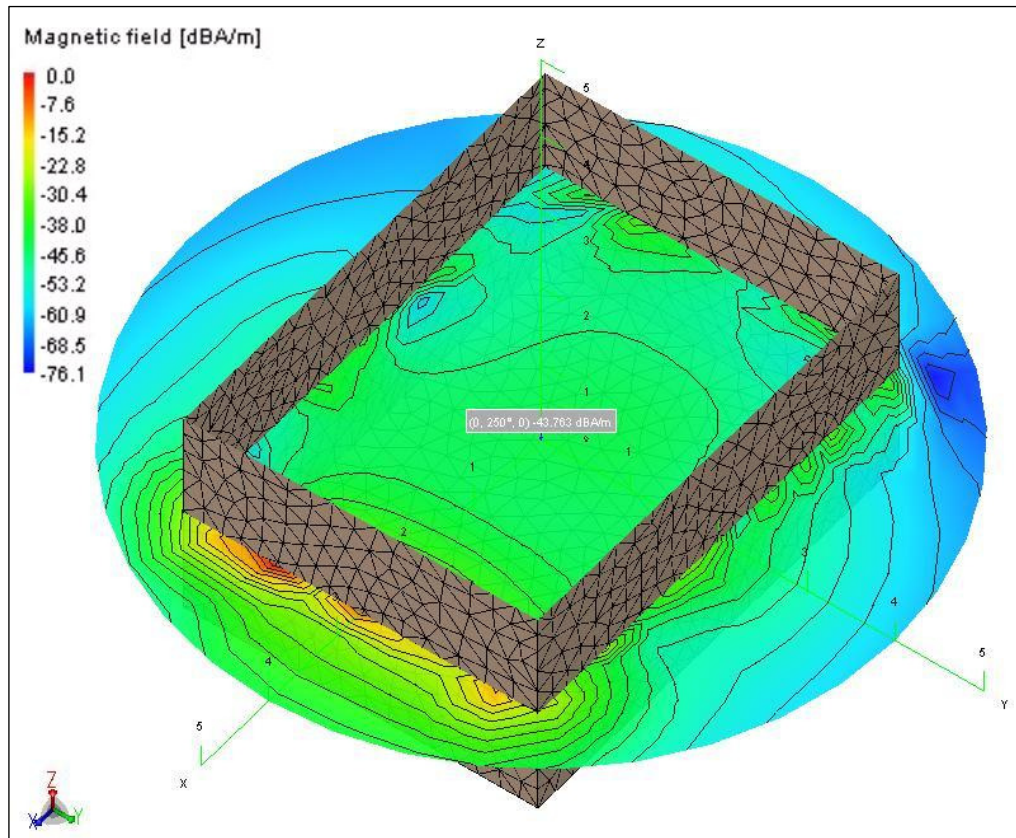


Figura 3.17: Cálculo en FEKO, S.E._B blindaje Sala TEM – “Caso ideal”.

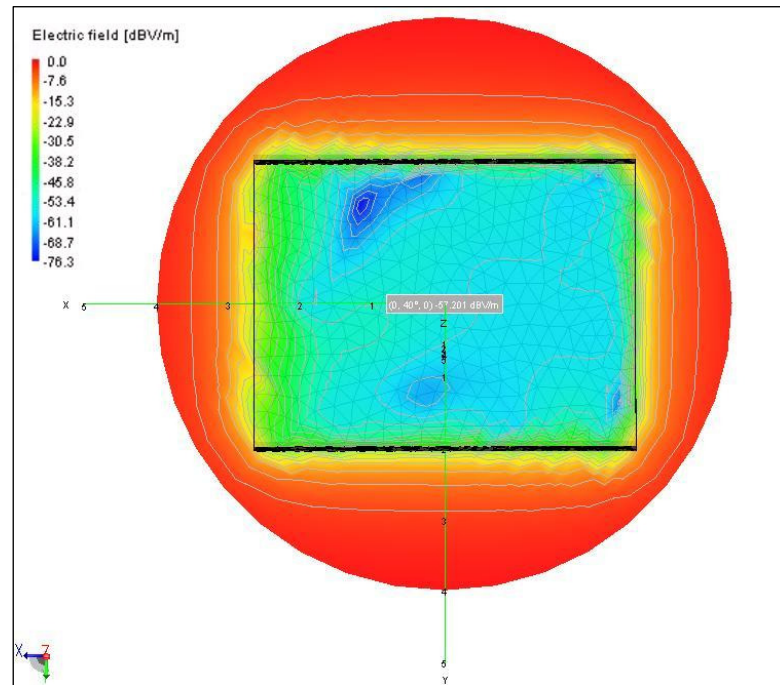


Figura 3.18: Cálculo en FEKO, S.E._E blindaje Sala TEM (Plano X-Y) – “Caso ideal”.

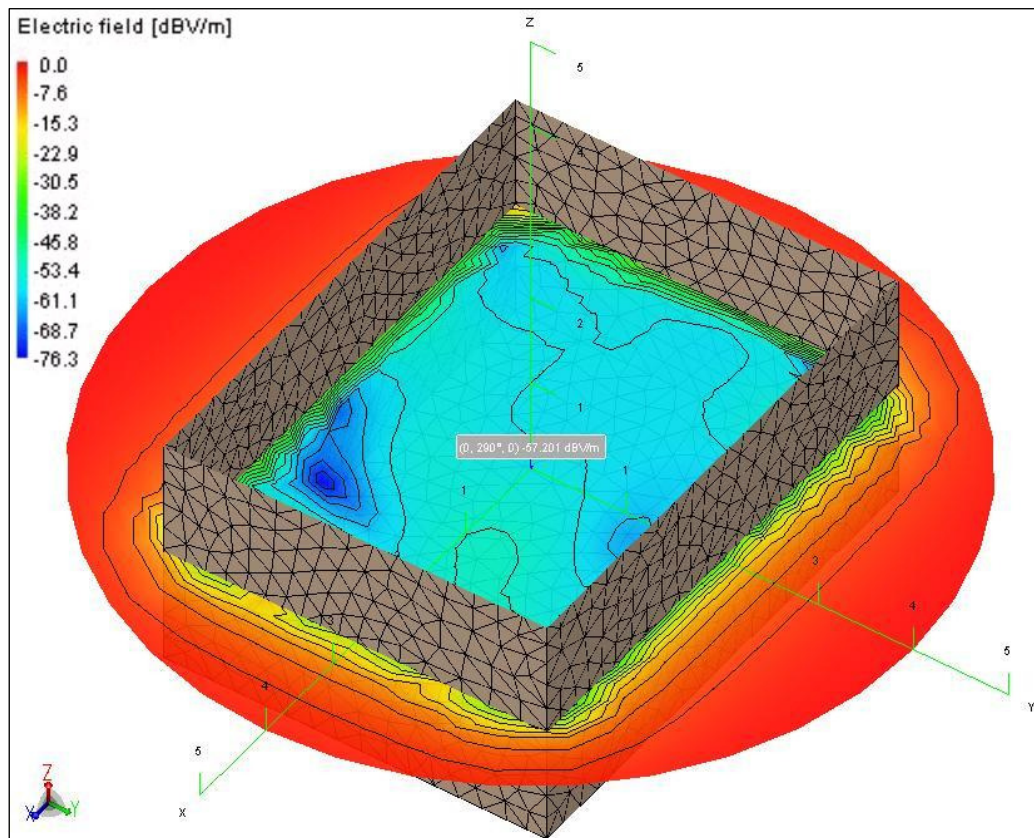


Figura 3.19: Cálculo en FEKO, S.E._E blindaje Sala TEM – “Caso ideal”.

De los resultados entregados en las figuras 3.16 y 3.17, se observa que la atenuación del campo magnético ($S.E._B$) es de 43.76dB. Dicho resultado es sin duda alguna muy alentador, puesto que ahora se sabe entonces que la efectividad del blindaje magnético de la Sala TEM (fabricado con una sola lámina de Fierro Silicoso de grano orientado M-4), variará entre 7.53 dB (en el peor de los casos) y 43.76dB (en el mejor de los casos).

Análogamente a lo efectuado anteriormente para el caso de la $S.E._E$ (con la puerta abierta) en las ecuaciones (3.10), (3.11) y (3.12). Que la $S.E._B$ sea de 43.76dB para el caso ideal en el cual la puerta se encuentra cerrada, significa lo siguiente:

$$(S.E._B)_{dB} = 20 \cdot \log\left(\frac{1}{T_B}\right) = 43.76 \text{ dB} \quad (3.113)$$

Por lo tanto:

$$T_B = \frac{B_{in}}{B_{exit}} = 0.00649 \quad (3.114)$$

Lo cual implicaría entonces que para el caso ideal en el cual la puerta de la Sala TEM se encuentra completamente cerrada, el campo magnético al interior de la sala (producto de las ondas externas que inciden sobre ella), debiese ser prácticamente nulo.

Otro punto importante de señalar es que, si bien ya se había indicado que aunque la puerta de la Sala TEM se dejase por accidente abierta, el campo eléctrico al interior de la sala (producto de las ondas incidentes externas) sería prácticamente nulo. En las figuras 3.18 y 3.19 es posible observar que para el caso ideal en el cual la puerta se encuentra completamente cerrada, la efectividad del blindaje del campo eléctrico aumenta a 57.20dB. Diferencia casi mínima, en comparación con el caso en el cual la puerta se encontraba abierta. Lo cual se puede explicar, ya que como se mencionó anteriormente, el campo eléctrico es prácticamente “devorado” por las estructuras conductoras, porque las cargas superficiales de los cuerpos conductores tienden a reordenarse y equipararse, por ello en ambos casos la atenuación del campo eléctrico es tan alta que se considera que el campo eléctrico al interior de la Sala TEM resulta ser cero, tal cual lo dice Faraday.

Resulta interesante también poder observar en las figuras (3.16), (3.17), (3.18) y (3.19), como es que las líneas de campo (tanto para el caso del campo magnético como del caso del campo eléctrico) se encuentran en mayor intensidad en el muro opuesto al que fue sometido a la onda plana de excitación. Para este caso particular, se puede añadir que los muros del blindaje actúan como grandes “Guías de Onda”, los cuales dividen en dos flujos idénticos al campo que incide sobre el blindaje, haciéndolos converger luego en su conjunto, en el muro opuesto al que recibe la onda plana incidente.

Muy por el contrario, no ocurre lo mismo para el caso en el cual la puerta se encuentra completamente abierta. Esto último, ya que para dicho caso, la existencia de una apertura rectangular de tamaño considerable en el blindaje, se traduce en la introducción de una nueva fuente de interferencia EMI producto que la apertura actúa como una verdadera antena. Es por tal razón, y debido a las numerosas reflexiones al interior del blindaje, que en las figuras 3.12, 3.13, 3.14 y 3.15, la mayor concentración de los niveles de campos electromagnéticos se encuentran distribuidos entre el muro en el cual la onda plana incide ortogonalmente y los muros laterales, pero en ningún caso la mayor concentración de campos se ubica en el muro opuesto al que recibe la onda plana incidente (en este caso el muro “opuesto” al de la onda plana incidente vendría a ser el muro poniente de la Sala TEM. Ver Figura 3.9).

Como un aporte completamente adicional, en el “Anexo C – 6” adjunto al presente trabajo de Tesis, se entrega también al lector un completo análisis de la efectividad del blindaje de una lamina de Fierro Silicoso de grano orientado M-4, determinado a través del método de “Propagación de Onda Plana - PoOP”. La finalidad de esto, es brindar al lector un análisis del blindaje de la Sala TEM con un método alternativo de cálculo relativamente simple. Dicho método por lo general se utiliza solo para ver casos “ideales”, puesto que su naturaleza implica la suposición a priori, que la onda plana incide en una *superficie plana infinita*. Por consiguiente dicha suposición no es acorde con que: “cualquier blindaje en la realidad, posee un tamaño finito”. Como resultado de la aplicación de tal supuesto, generalmente las magnitudes de las atenuaciones efectivas de los campos electromagnéticos obtenidas mediante dicho método, son extremadamente altas, y por ende bastante irreales. Pues como se ha mencionado en reiteradas ocasiones, siempre existen filtraciones de EMI que logran penetrar al interior de los blindajes pasivos, y dichas filtraciones de EMI no son consideradas por el método de PoOP. Por lo que no es posible aplicar dicho método a la problemática “real” de la Sala TEM.

No obstante lo dicho anteriormente, resulta muy curioso observar los resultados obtenidos en el “Anexo C – 6” y compararlos con los resultados indicados en las figuras 3.16, 3.17, 3.18 y 3.19. Puesto que la aplicación de ambos métodos en los casos “ideales” de blindaje, arrojan resultados bastante dispares. A continuación se observan los resultados de ambas soluciones, los cuales se entregan en forma resumida en la “Tabla 3.3”.

	Método			
	FEM		PoOP	
	Atenuación (dB)	Función de Transferencia (T)	Atenuación (dB)	Función de Transferencia (T)
S.E.ₑ	57.20	0.00138	67.67	0.00041
S.E.ₑ	43.76	0.00649	67.67	0.00041

Tabla 3.3: Tabla comparativa de las efectividades del blindaje, obtenidas en condiciones ideales a través de dos métodos diferentes – FEM vs PoOP.

Claramente se observa en la tabla anterior, que la diferencia de los resultados es bastante grande. Lo cual confirma que la técnica de PoOP, es un mecanismo de cálculo cuyos resultados efectivamente se encuentran sumamente sobre estimados²³. Sin embargo, tampoco hay que alarmarse con una diferencia tan grande entre uno u otro método, pues cabe recordar que el cálculo de la “Shielding Effectiveness - S.E.” está hecho mediante una función logarítmica, y que para los niveles de atenuación descritos en la tabla 3.3, las funciones de transferencia nos indican que “en realidad” la atenuación del campo electromagnético incidente será siempre superior al 99.3%. Valor que representa al peor de los casos de la tabla 3.3, es decir calculando la S.E.ₑ con el método FEM.

En el próximo capítulo, se procederá a realizar las medidas de campo magnético al interior de la Sala TEM y sus inmediaciones. La idea fundamental, es poder observar si el blindaje de una sola lámina de Fierro Silicoso se ajusta a las necesidades del microscopio electrónico de transmisión, o si es necesario desarrollar un blindaje “multi- capa” para suplir los requerimientos indicados por el fabricante para que éste funcione de manera adecuada.

²³ Incluso es mencionado por otros autores, como es posible apreciar en la pagina 519 de la referencia bibliográfica [5]

Capítulo 4: Medidas de campo magnético en la Sala TEM e inmediaciones.

A principios del año 2005 se logró concretar la compra del microscopio electrónico de transmisión (TEM) “Tecnai 20 Ultra Twin” marca FEI, adquirido por el Proyecto MECESUP “Red Nacional de Programas de Doctorados en Ciencia de los Materiales”. En consecuencia, existía la necesidad impostergable de realizar los estudios de campos electromagnéticos en las dependencias del Zócalo del Edificio de Geología de la Universidad de Chile, lugar físico en el cual sería instalado el microscopio electrónico de transmisión. En el caso en que las medidas de campos electromagnéticos arrojaran magnitudes de campos demasiado elevados, sería necesario entonces realizar también todas las modificaciones pertinentes tanto en el sistema eléctrico como en el de equipos de aire acondicionado del Zócalo del Edificio de Geología. Todo aquello, con miras a lograr cumplir con los requerimientos de campos magnéticos máximos especificados por el fabricante del equipo en su ficha técnica y respectivo manual de instalación²⁴.

En el presente capítulo, se entregará un resumen de las medidas realizadas en los estudios de campos magnéticos que surgieron en respuesta a las necesidades antes señaladas, tanto para la Sala TEM como sus inmediaciones. Para ello se hablará en un principio del instrumento con el cual fueron realizadas las mediciones y sus características. Posteriormente, se pasará de lleno a las mediciones de las condiciones iniciales de campos magnéticos de la Sala TEM. Con ello se pretende poder entender por completo la magnitud del problema enfrentado, y observar la necesidad ineludible de la implementación previa de un “Blindaje Generalizado”. Finalmente se entregará nuevas medidas de los campos magnéticos en la Sala TEM luego de realizado el blindaje generalizado, de modo de ver la magnitud de la atenuación obtenida a partir de éste y poder tomar dichos niveles de campo magnético medidos, como las nuevas condiciones de borde que habrán de ser utilizadas más adelante, en la determinación del diseño del blindaje pasivo que será sugerido llevar a cabo para proteger por completo la Sala TEM de las filtraciones de interferencias electromagnéticas.

²⁴ Ver “Anexo A-1: Extracto especificaciones técnicas TECNAI F20 UT”.

4.1 Medidor de Campos Electromagnéticos EMDEX II.

El instrumento empleado en las mediciones de campo electromagnético fue el “EMDEX II” (fabricado por la empresa ENERTECH). Dicho instrumento, es un equipo programable de medida y adquisición de información, el cual posee una naturaleza de carácter “Tri- Axial”, capaz de medir de manera independiente las componentes “X, Y, Z” del campo magnético mediante tres sensores situados en direcciones ortogonales al interior del equipo, cumpliendo con los requisitos presentes en la norma IEEE Std 644- 1994. Gracias a ello y a su unidad de procesamiento central, el EMDEX II calcula de modo interno el valor “RMS – Root Mean Square” de la componente resultante del campo magnético, ver ecuación (4.1). Magnitud que es desplegada en la pantalla del instrumento en tiempo real cuando se está efectuando una medición.

$$B_r = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (4.1)$$

Por otra parte, es capaz de obtener la intensidad de corriente eléctrica y la magnitud de la componente vertical del campo eléctrico, mediante el uso de dos elementos accesorios:

- **Amp Logger:** Es un medidor de corriente tipo tenaza, marca “Fluke” modelo 80i- 600 AC. Con él, es posible medir la corriente circulante por un conductor en forma simultánea mientras es realizada la medida de campo magnético (Ver Figura 4.1).
- **E – Probe :** Es el sensor de campo eléctrico diseñado para realizar medidas con el EMDEX II constituido por 2 placas paralelas de aluminio, calibradas para producir una corriente inducida que luego es leída por el EMDEX II y convertida a un valor equivalente de campo eléctrico medido. El “E- Probe”, tiene un rango de lectura de campos entre 10 a 13.000 V/m, con una exactitud de +/- 5% y una resolución de 1 V/m (acorde al estándar de la IEEE 644- 1994). Adicionalmente al E- Probe, el fabricante adjunta un bastón de fibra de vidrio aislante, el cual se puede expandir para ayudar a tomar las medidas (Ver Figura 4.2).



Figura 4.1: Fotografía del dispositivo accesorio “Amp Logger”.



Figura 4.2: Fotografía del dispositivo accesorio “E – Probe”.

Ambos accesorios se conectan al EMDEX II a través del Jack destinado para el “E- Probe”, utilizando al EMDEX II como detector. Además, el EMDEX II está constituido por un computador interno de 8 bits en conjunto con una “Erasable Programmable Read Only Memory – EPROM” (en la cual se encuentra el sistema operativo del equipo), y una memoria de 512 kbytes CMOS RAM (para el almacenamiento de la información), una pantalla de LCD y un panel de control con botones. Físicamente el EMDEX II es un dispositivo muy pequeño, de medidas: 16.8 x 6.6 x 3.8 cm, y la información almacenada en su memoria interna, puede ser transferida a un computador mediante el puerto serial RS- 232 y el uso de un software propietario denominado EMCALC 2000, en el cual la información puede ser procesada, analizada y desplegada en 2D o 3D (Ver Figura 4.3).



Figura 4.3: Fotografía descriptiva del EMDEX II y sus respectivos componentes.

4.1.1 Características del EMDEX II.

Entre las principales características que presenta el EMDEX II y su programa propietario EMCALC 2000, se pueden encontrar las siguientes:

- Permite trabajar con los datos en Windows 95, 98 y superior.
- Provee de una transmisión de los datos a través del puerto serial RS-232 de un computador, mediante COM 1 hasta el COM 4.
- Posee una capacidad de análisis gráfico de las componentes x,y,z en su conjunto y por separado.
- Permite agregar marcas personales a los gráficos obtenidos.
- Permite exportar la información a hojas de cálculo o archivos de texto, y enviar los gráficos al clipboard de Windows.
- Es posible imprimir los datos obtenidos en cualquiera de las impresoras que se encuentren instaladas en Windows.
- Permite la presentación de la información en gráficos de 2D y 3D con datos múltiples o simples, puesto que es posible crear grupos de información en donde se mezcle la información de más de una medida.
- Posee una barra indicadora del estado de la transmisión de la información al computador, mientras se está comunicando con el PC.
- Los parámetros tales como: las unidades del campo eléctrico, campo magnético y constantes de calibración, son guardadas en el "Set de Datos".

4.1.2 Especificaciones de Hardware del EMDEX II.

A continuación se entregará un listado con las especificaciones de hardware que posee el equipo de medida EMDEX II, puesto que datos técnicos como: el ancho de banda, resolución, exactitud de los sensores, etc., es información de gran importancia en la ejecución y análisis de las medidas. Por consiguiente, la lista de especificaciones de hardware del EMDEX II a ser considerada es la siguiente:

- Dimensiones: 16.8 x 6.6 x 3.8 cm.
- Peso: 784 gr (sin batería).

- Temperatura de operación: 32- 140 ° F (0- 60 ° C).
- Humedad de Operación: 0 – 95%.
- Voltaje: Batería de 9V alcalina o de litio.
- Modos de Operación:
 - Normal: Los datos de la muestra se guardan en la memoria.
 - Inspección: Solo se despliegan los datos en la pantalla LCD.
- Tipos de datos:
 - Resultado “RMS” del campo magnético - ancho de banda.
 - Resultado “RMS” del campo magnético - armónico.
 - Campo eléctrico equivalente.
- Computadora incorporada: Tattletale modelo V con 5 x 1 de expansión.
- Memoria: 512 Kb CMOS- RAM.
- Resolución de A/D: 0.1% a escala completa (10 bits de resolución).
- Intervalos de muestreo:
 - Máximo 1 muestra cada 1.5s.
 - Mínimo 1 muestra cada 327s.
- Sensores: Tres sensores de bobina de campos magnéticos con orientación ortogonal entre ellas.
- AUX Jack: Diseñado para aceptar una señal de un sensor externo de campo eléctrico u otro sensor especial. La entrada máxima es de 0.99mA.
- Jack Remoto: Diseñado para enviar una transición baja/alta al contador del computador modelo V, cuando los aumentos de resistencia de entrada van desde 100Ω a 1000Ω.
- Ancho de banda:
 - Frecuencia Fundamental : 40 – 800 Hz.
 - Frecuencias Armónicas : 100 – 800 Hz.
- Respuesta de Frecuencia:
 - Ancho de Banda : Variación total de ±30% más del rango completo.
 - Armónicas :

100 Hz	:	+10% a -45%.
120 Hz	:	+25% a -30%.
150 Hz	:	+25% a 0%.
180 – 800 Hz	:	+25% a -25%.
- Rechazo de Campo a bajas Frecuencias:
 - Señal de 10 Hz: Mayor que 1000 a 1.
 - Señal de 2 Hz: Mayor que 106 a 1.

- El rango del campo resultante se muestra en la Tabla 4.1:

EMDEX II	Exactitud
0.1 - 3000mG	Típico: $\pm 3\%$ Peor Caso: $\pm 10\%$
0.01 - 300 μ T	Típico: $\pm 3\%$ Peor Caso: $\pm 10\%$

Tabla 4.1: Ancho de banda del campo magnético resultante (1T = 10.000G).

- Campo eléctrico equivalente:
 - La exactitud típica: $\pm 5\%$ más la exactitud del sensor.
 - La peor exactitud del caso: $\pm 15\%$ más la exactitud del sensor.
- Método de medida: La verdadera medida “RMS” (con el factor de cresta).
- Error de Factor de Cresta:
 - El factor de cresta es de 2:1 Adicional $\pm 2\%$.
 - El factor de cresta es de 3:1 Adicional $\pm 5\%$.
- Errores de Temperatura: No más del $\pm 2\%$ para cambios de temperatura de 10° C, en el rango de 0° C a 50° C.

Por lo tanto, como todas las medidas que serán descritas a continuación fueron realizadas con dicho instrumento, es de suma importancia tener siempre presente tales especificaciones, al igual que sus limitaciones. Esto último, con el fin de evitar accidentes y ocasionar algún daño, ya sea al operador del instrumento o al instrumento propiamente tal.

Por otra parte, cabe señalar también, que si el lector desea profundizar aún más en cuanto a: el equipo de medición, su software, aplicaciones, normativas vigentes y procedimientos de medida, etc., entonces deberá dirigirse a las referencias [1] y [14].

4.2 Medidas de Campo Magnético.

En el capítulo anterior ya ha sido descrito en detalle el modelo “teórico – matemático” mediante el cual es posible determinar la magnitud de la atenuación del campo eléctrico y magnético para

el caso de un blindaje rectangular con aperturas. Podría existir algún lector, investigador o estudiante universitario, que solo pensara en efectuar el modelamiento teórico de la Sala TEM mediante MoM y el uso del software “FEKO”²⁵, tanto para el caso inicial como para el caso post-blindaje, ya que para él “la teoría lo es todo”. Sin embargo, como suele ocurrir en todo modelamiento, la situación simulada puede ser “aproximada” a la real pero difícilmente “igual” a esta, ya que se suelen simplificar o “relajar” muchas de las condiciones existentes en la realidad. Por lo cual, es de vital importancia tanto para el correcto funcionamiento del TEM como para dar una sólida validación empírica al modelamiento mediante MoM que se ha desarrollado en el capítulo anterior, agregar valor a la presente tesis mediante la ejecución técnica “in situ” de una serie de medidas de la magnitud real de los campos magnéticos existentes en el interior de la sala TEM, estando dicha sala en su condición inicial “pre- blindaje generalizado”²⁶ y luego en su condición post- blindaje generalizado. Además se presentarán también, medidas en las cuales se podrá apreciar claramente el efecto del blindaje con láminas de Fierro Silicoso de grano orientado M-4 (material escogido en el capítulo tercero, para realizar el blindaje). Todo ello gracias a que el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Chile, cuenta con un instrumento medidor de campos electromagnéticos de tipo triaxial denominado “EMDEX II”. Esto último permitirá a sus estudiantes, un desarrollo integral tanto en el área de la investigación, como en el área más técnica de los sistemas eléctricos de potencia.

4.2.1 Medidas iniciales de campo magnético en la Sala TEM.

El microscopio electrónico de transmisión, tiene pensada su ubicación física al interior de una sala situada al Sur- Poniente de las instalaciones del Zócalo del Edificio de Geología, la cual ha sido denominada como “Sala TEM”. Sus dimensiones aproximadas, como se ha mencionado en el capítulo anterior, son: altura interior de alrededor de 3m (sin contar el cielo falso), su largo es de alrededor de 5.75m y su ancho de 4.50m.

Para tener una idea más clara de lo que se está hablando, a continuación en la Figura 4.4 es posible observar una vista de planta del Zócalo del Edificio de Geología. Con ello se pretende, poder ubicar al lector en el entorno que rodea a la Sala TEM y de paso, poder mostrar el sistema de luminarias del piso (indicado con amarillo). Como se puede apreciar en la Figura 4.4, el aporte de EMI a la Sala TEM de solo este piso es bastante considerable. A ello luego se

²⁵ Tal como se muestra en las Figuras 3.9, 3.10 y 3.11.

²⁶ Entendiendo por condición inicial cuando la Sala TEM se encontraba vacía, sin ningún equipo en su interior.

deben agregar: los aportes del sistema de fuerza, aires acondicionados, los otros pisos, los aportes externos a la sala y muchos otros. Por lo cual, hacer un blindaje pasivo que resulte efectivo, es algo fuera de lo trivial y requiere además de instaladores especializados.

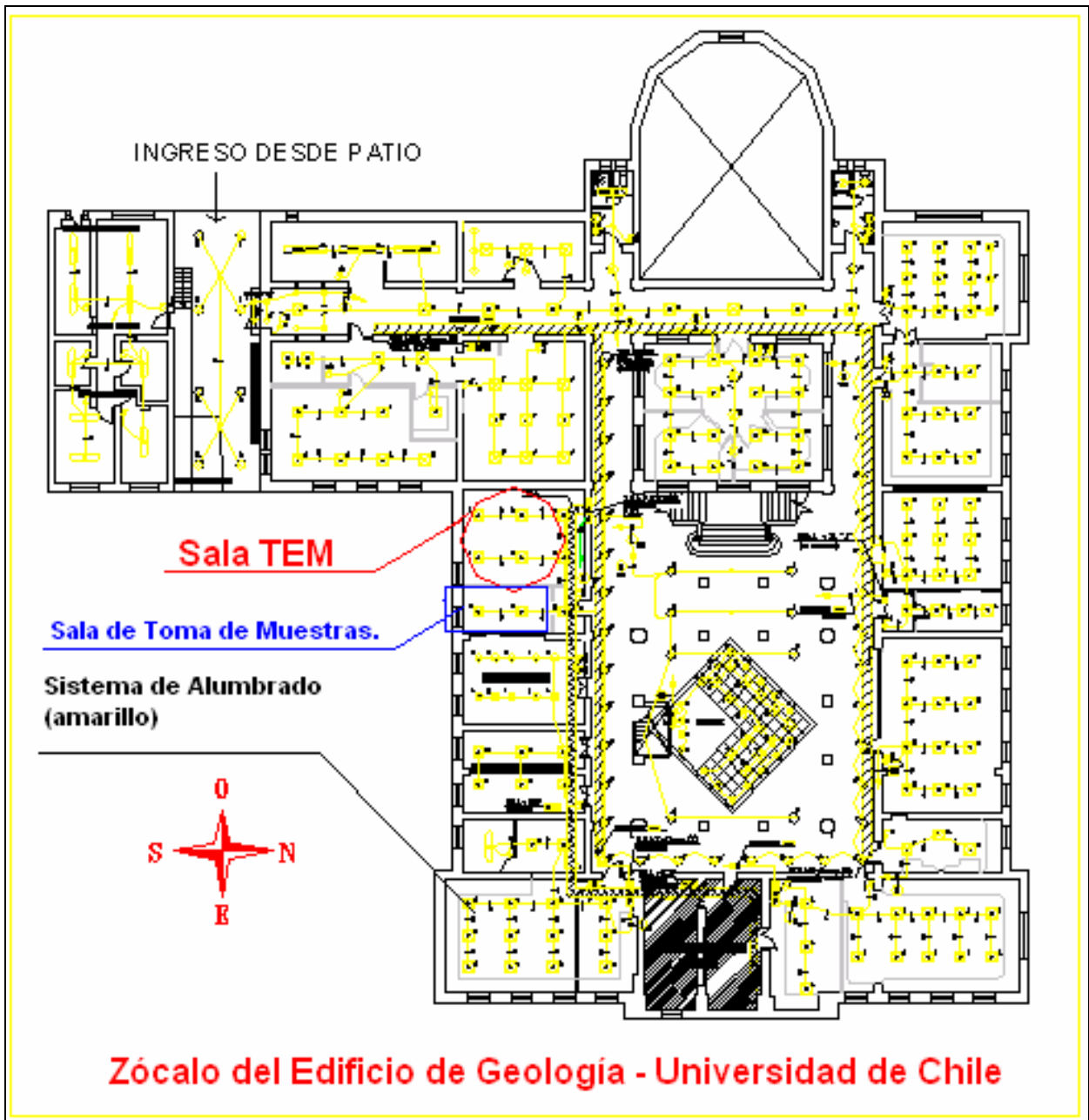


Figura 4.4: Ubicación física de la Sala TEM al interior del Zócalo del Edificio de Geología en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile – Vista de Planta.

Haciendo uso del EMDEX II, se efectuó un mapeo en tres dimensiones de la intensidad de campo magnético existente al interior de la Sala TEM, para la componente resultante y las coordenadas “x, y, z”. Mediciones efectuadas en la escala de “mili Gauss - mG” a una tasa de muestreo de 1.5 seg. por medida, y utilizando un ancho de banda entre 40 y 800Hz, lo cual permite incluir el efecto de corrientes de frecuencia fundamental y eventuales corrientes armónicas, hasta el orden 16 en el caso de 50Hz. Cabe señalar que las medidas se realizaron a plena carga.

En la figura 4.5 siguiente, se indica la disposición del sistema de referencia empleado para realizar las medidas al interior de la sala TEM.



Figura 4.5: Sistema de Referencia empleado al interior de la sala TEM.

Como se puede observar en la figura 4.5 anterior, a partir de la esquina “Nor- Oriente inferior” de la Sala TEM serán referidas todas las mediciones efectuadas al interior de la sala.

De esta manera y aprovechando que en un principio la sala estaba completamente vacía, se procedió a obtener un mapeo de la Sala TEM a través del barrido completo de su superficie con el EMDEX II, mediante el uso de un “camino imaginario” el cual comienza desplazado en 50cm tanto del muro Norte como del muro Oriente, es decir su origen era $(x,y,z) = (0.5, 0.5, 0)$. Con ello, y gracias a la posibilidad de convertir la información obtenida con el EMDEX II desde

“campo magnético en función del tiempo”, hasta “campo magnético en función de la posición espacial”, mediante el uso de la opción “Convert lo LINDA” existente en el software EMCALC 2000²⁷, se logró graficar de un modo preciso y exacto las intensidades de campo magnético obtenidas al interior de la sala. A continuación en la figura 4.6, se observa la forma en la cual se recorrió la Sala TEM para obtener los datos de las mediciones. Es decir, es posible observar cual fue la estrategia desarrollada para hacer las medidas.

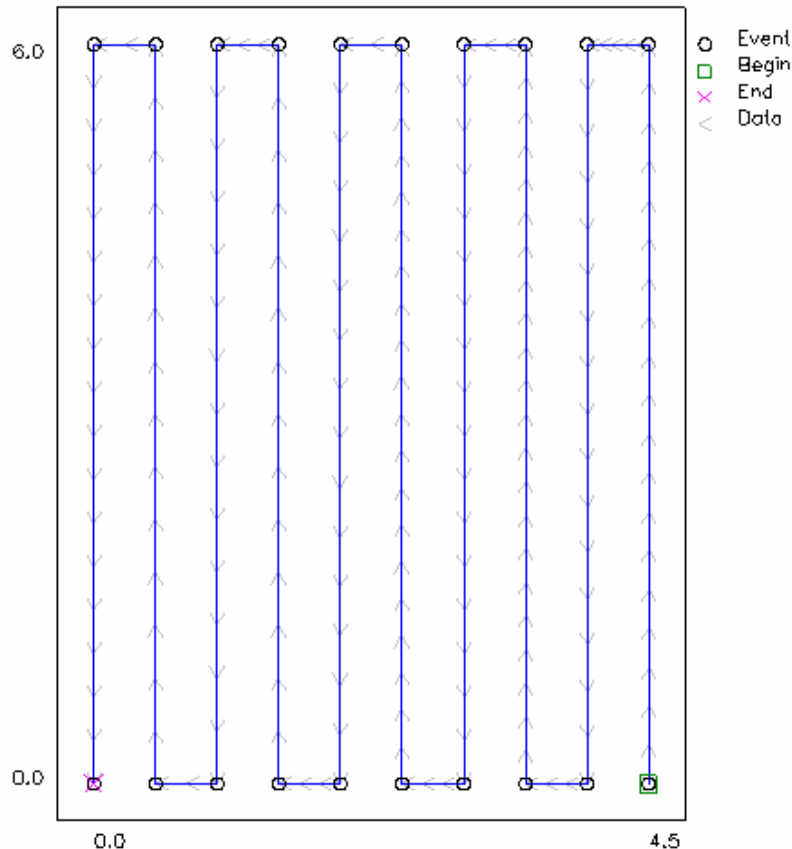


Figura 4.6: Estrategia de medida de campo magnético mediante instrumento EMDEX II. Medida ejecutada a una altura $Z = 1.5\text{m}$.

Teniéndose todo lo anterior claro, a continuación se entregan los resultados de las mediciones realizadas para obtener las intensidades de campo magnético resultante y componentes x , y , z , que inicialmente se encuentran en el interior de la Sala TEM. Dichos resultados se han decidido resumir en una serie de gráficos expuestos en las figuras 4.7 a la figura 4.14, que a continuación se detallan:

²⁷ LINDA hace referencia a la abreviatura proveniente de “Linear Data Acquisition”.

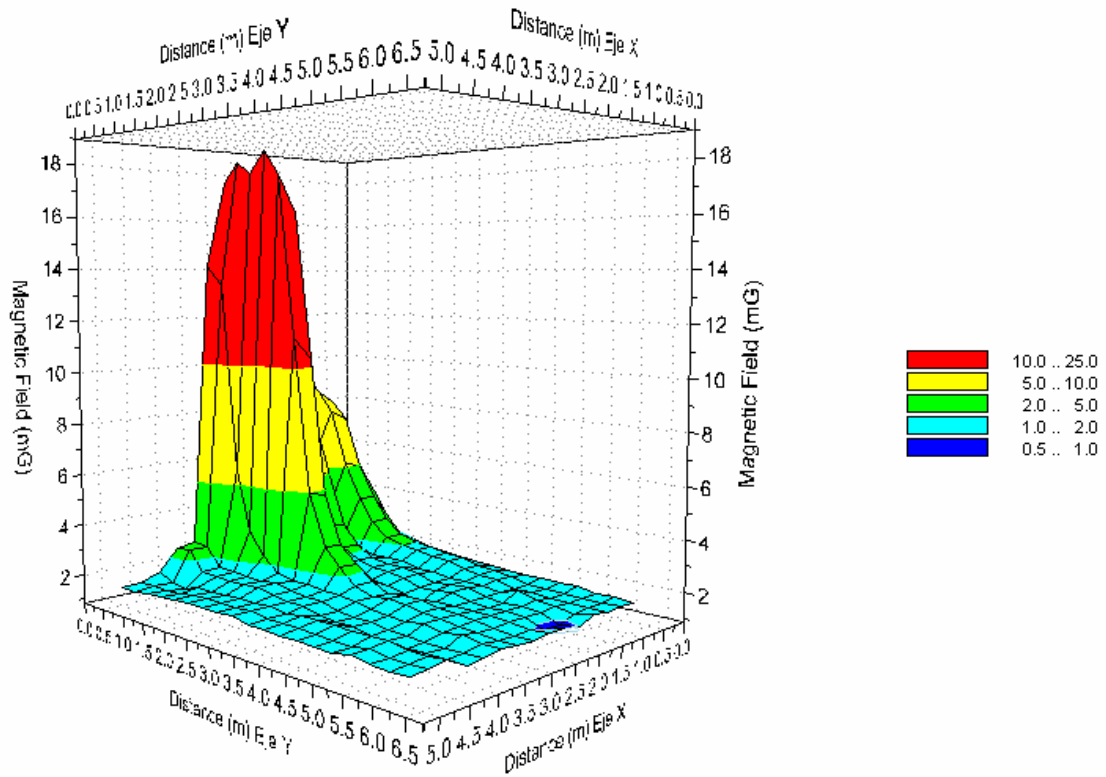


Figura 4.7: Intensidad de Campo Magnético Resultante Inicial.

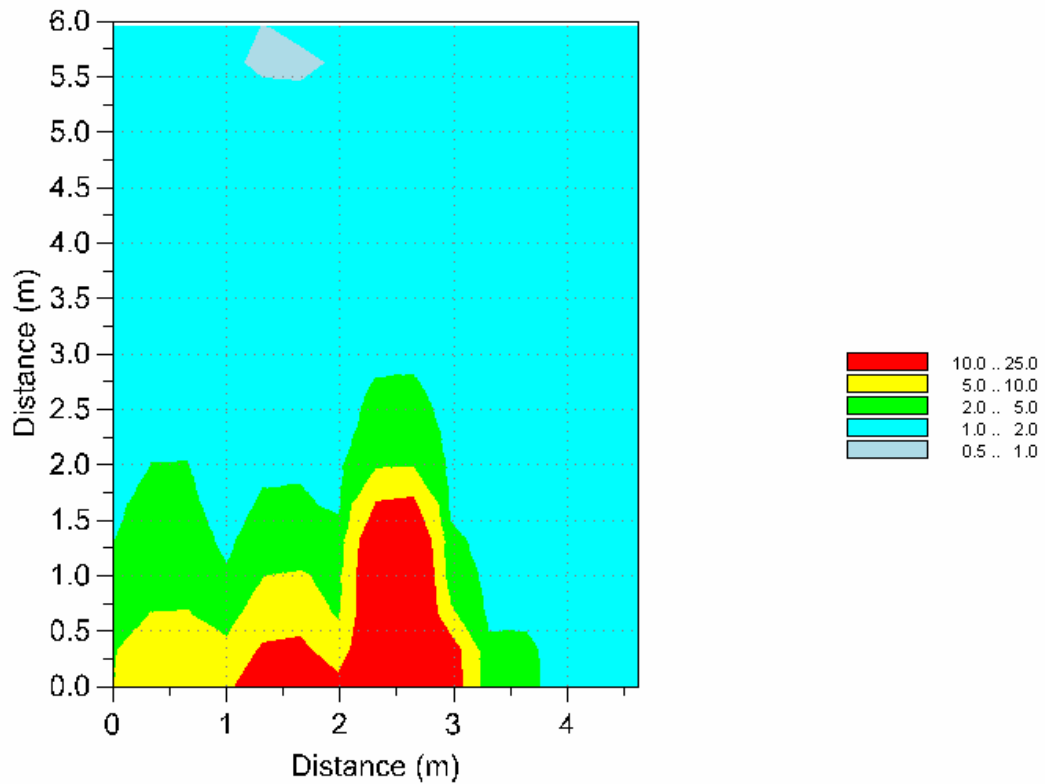


Figura 4.8: Curvas de Nivel – Intensidad de Campo Magnético Resultante Inicial.

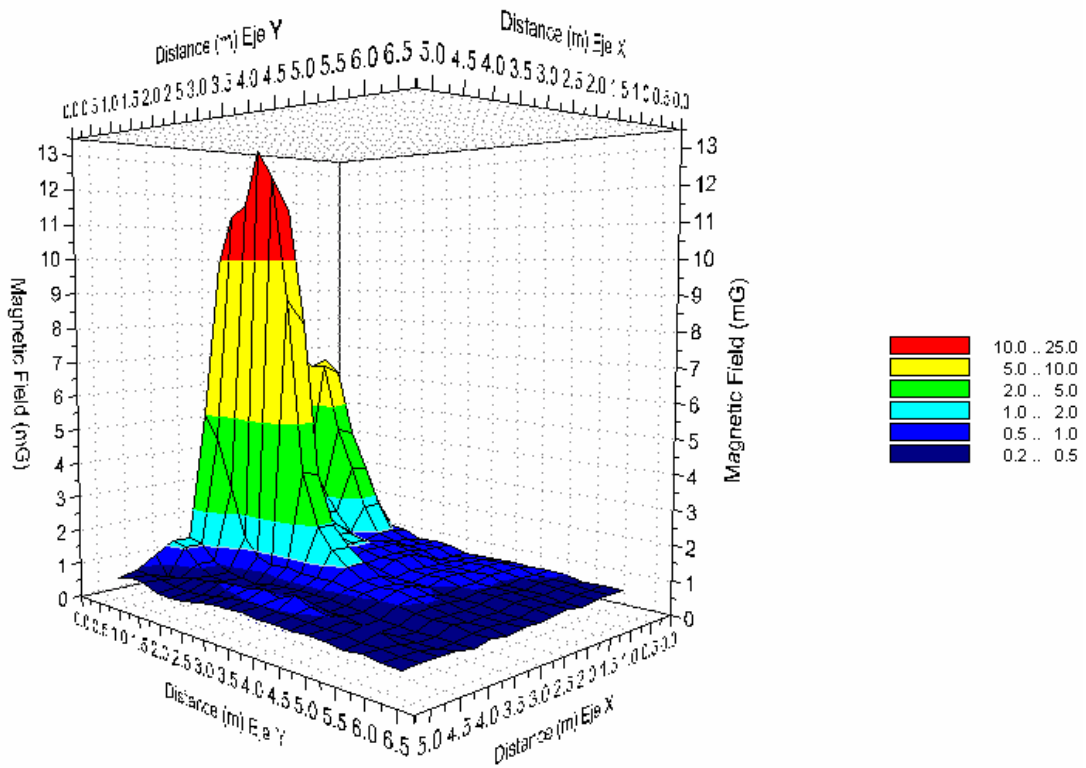


Figura 4.9: Intensidad de Campo Magnético en el Eje X - Inicial.

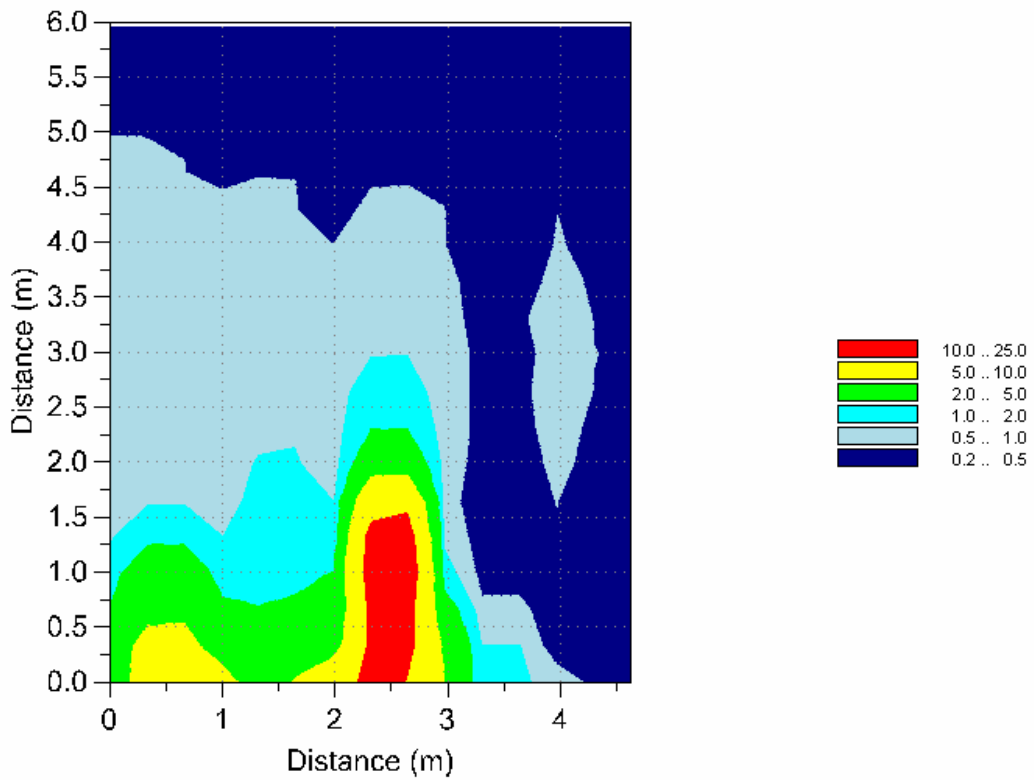


Figura 4.10: Curvas de Nivel - Intensidad de Campo Magnético en el Eje X - Inicial.

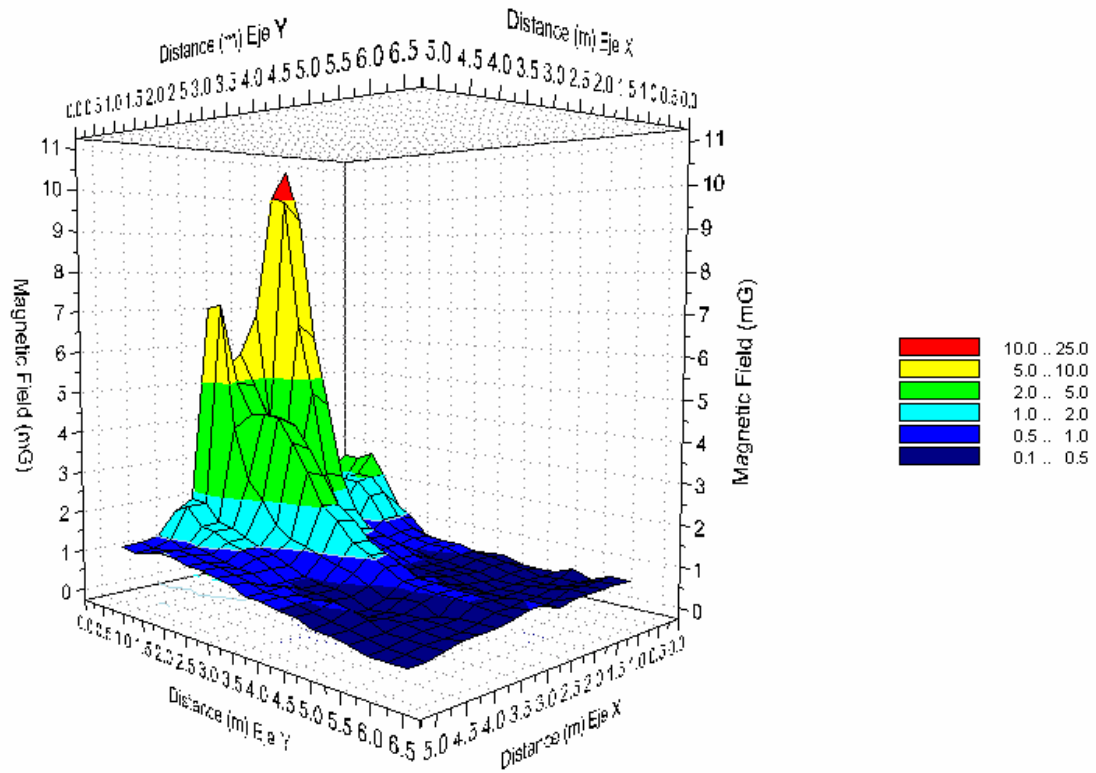


Figura 4.11: Intensidad de Campo Magnético en el Eje Y - Inicial.

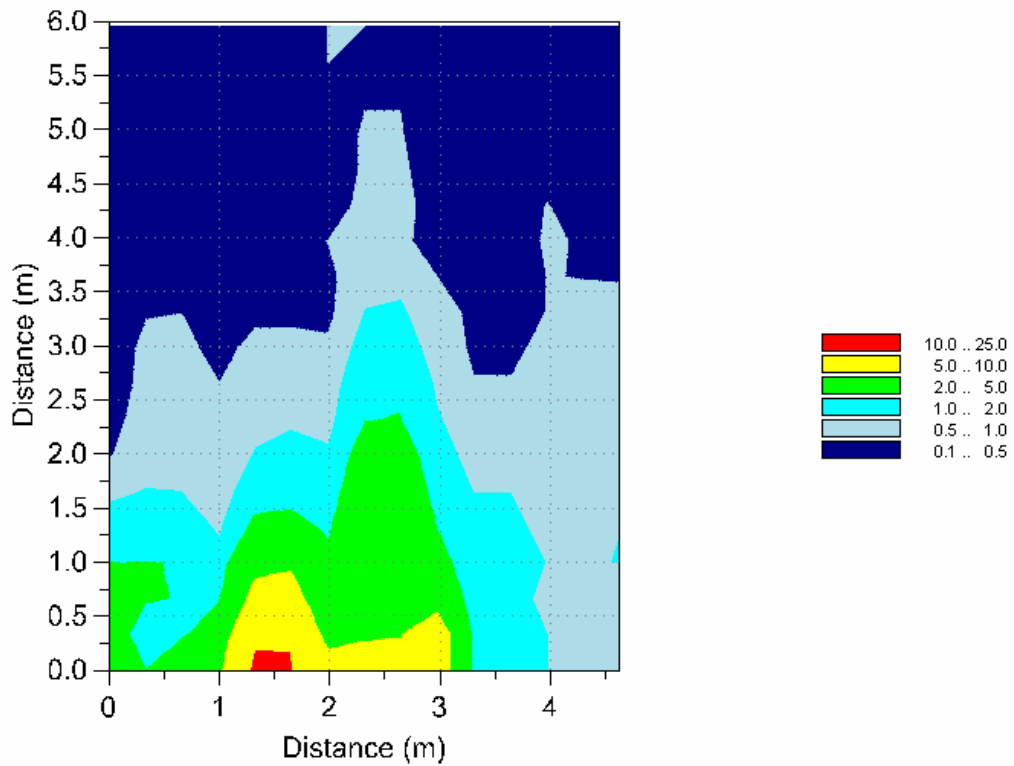


Figura 4.12: Curvas de Nivel - Intensidad de Campo Magnético en el Eje Y - Inicial.

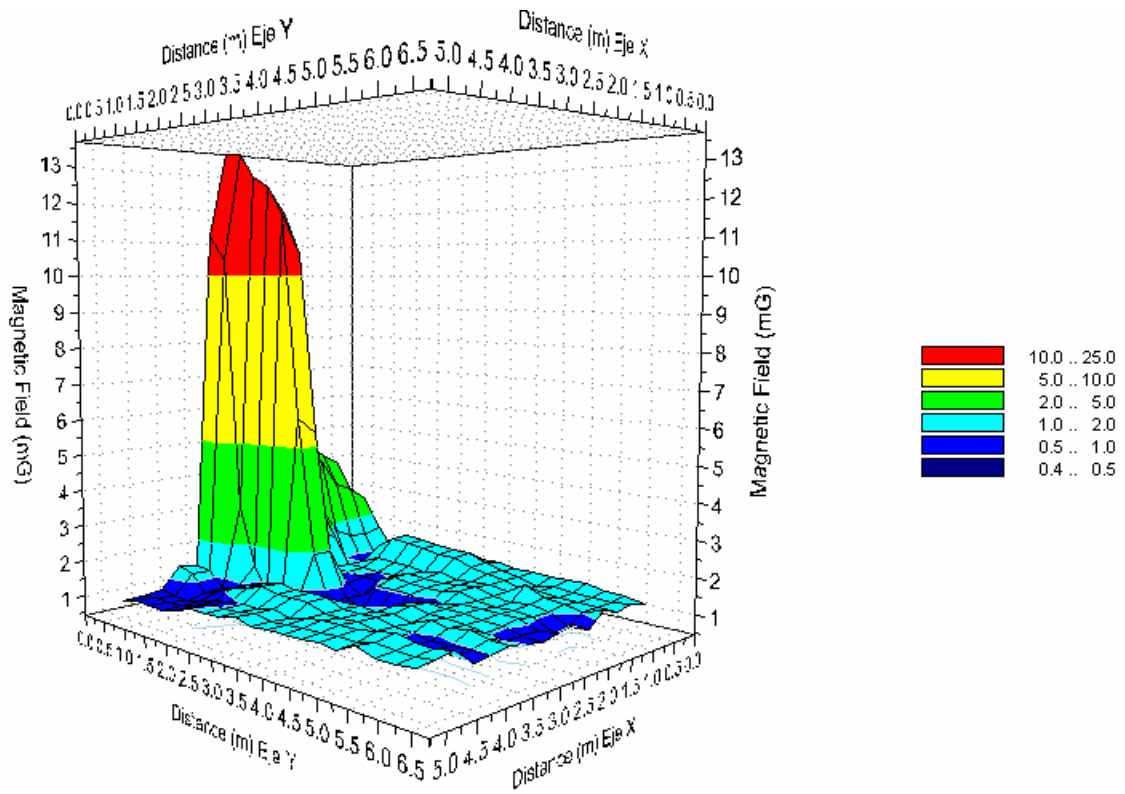


Figura 4.13: Intensidad de Campo Magnético Eje Z - Inicial.

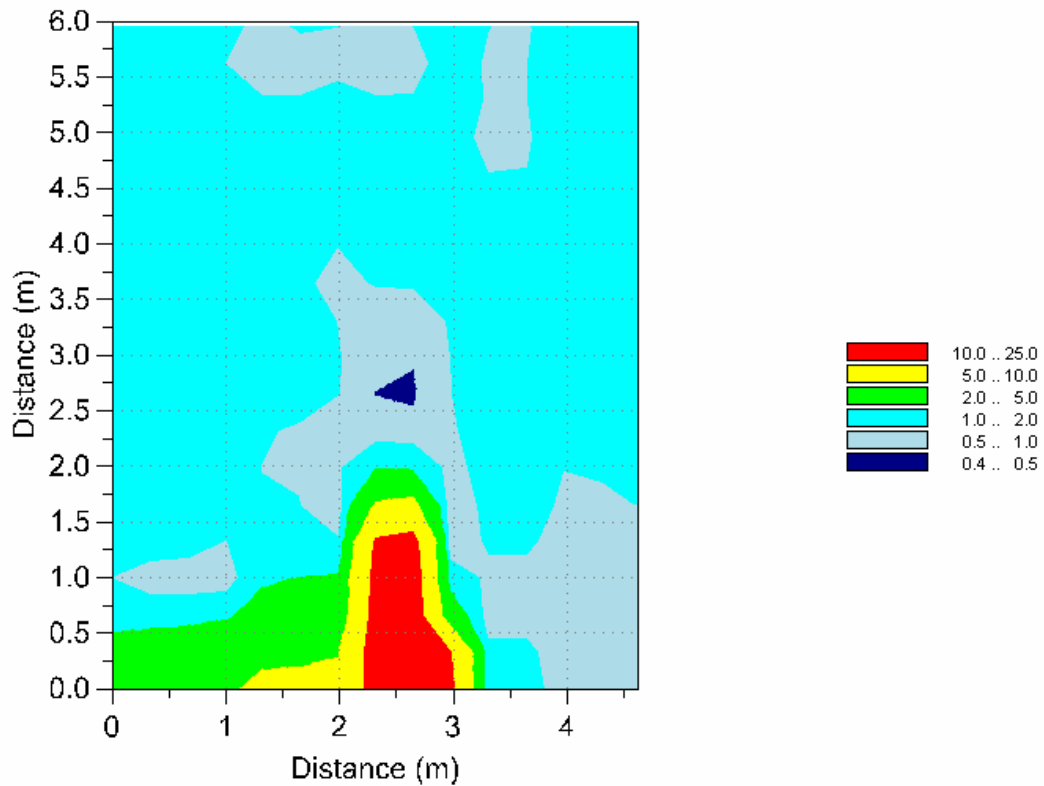


Figura 4.14: Curvas de Nivel - Intensidad de Campo Magnético Eje Z - Inicial.

Como es posible notar, en las figuras 4.7 y 4.8 se observa la presencia de un Peak de más de 20mG de intensidad de campo magnético resultante alrededor de la posición $(x,y)=(2.5,0.5)$. Esto último, producto de la presencia de los Tableros de Alumbrado del Zócalo, T.D.A.F y COMP, además de las bandejas porta conductores. Todos ellos, elementos que actúan como fuentes de EMI ubicados en el muro norte de la sala TEM. Por otro lado, como se ha mencionado anteriormente, la puerta de acceso principal a la sala TEM también es una fuente indiscutible de EMI producto de las filtraciones de interferencias de las salas adyacentes sumado al efecto scattering que existe alrededor del contorno de dicha apertura, quedando de manifiesto su efecto en las medidas realizadas.

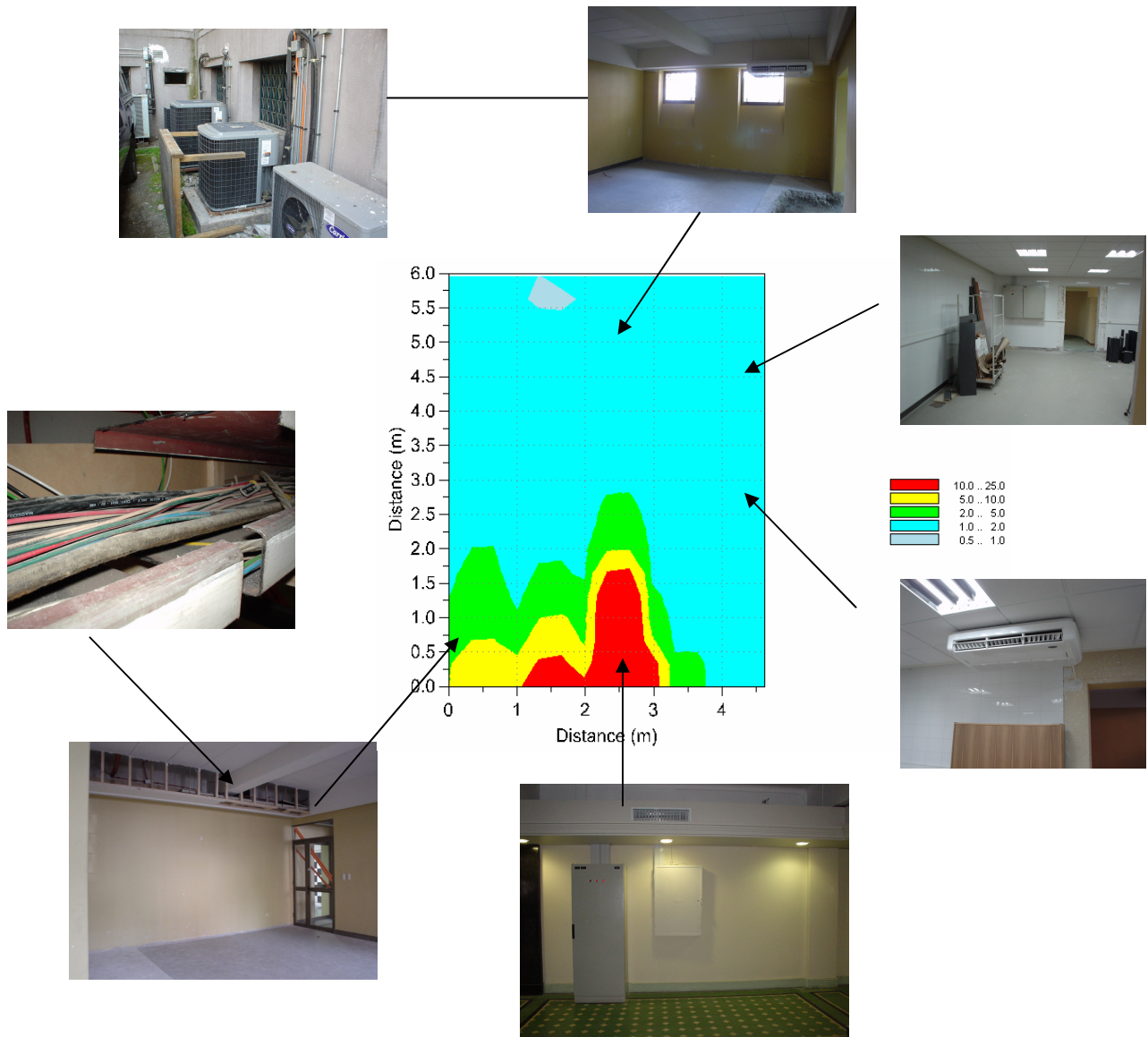


Figura 4.15: Fuentes de EMI que afectan el campo magnético resultante en la Sala TEM inicialmente (cuando esta se encontraba vacía).

Además se puede observar que en el “lado Sur” de la Sala TEM, el campo magnético resultante sufre una fuerte influencia producto de la existencia de: un equipo de aire acondicionado al interior de la sala, otro en el cuarto contiguo al poniente de la Sala TEM, además de las filtraciones desde el exterior (a través de las dos ventanas del muro Sur de la sala) de una serie de interferencias electromagnéticas provenientes de las unidades condensadoras externas pertenecientes a otros equipos de aire acondicionado del Edificio de Geología. A modo de resumen en la figura 4.15 entregada anteriormente se presentan las principales fuentes de EMI encontradas, aunque para el caso del equipo de aire acondicionado al interior de la Sala TEM y otro al costado poniente de ella, las figuras 4.14 y 4.10 indican con mayor claridad la influencia respectiva que cada uno de ellos aporta a la sala, observándose magnitudes de alrededor de los 2mG de intensidad en ambos casos. Para complementar todo aquello, a continuación se entregan dos tablas (Tabla 4.2 y 4.3) con la descripción estadística de las medidas señaladas en las figuras 4.7 a la 4.14

Descripción	Mínimo	Máximo	Media	Des. Est.	Mediana
Broadband - Resultante (mG)	0.83	20.50	2.92	4.10	1.41
Broadband - X (mG)	0.21	14.50	1.44	2.61	0.51
Broadband - Y (mG)	0.11	11.71	1.29	1.88	0.61
Broadband - Z (mG)	0.31	15.30	1.94	2.75	1.11

Tabla 4.2: Descripción estadística - medida de campo magnético inicial Sala TEM.

Orden	1%	5%	10%	25%	50%	75%	90%	95%	99%
Broadband - Resultante (mG)	0.89	1.04	1.13	1.23	1.41	1.77	7.34	13.5	19.5
Broadband - X (mG)	0.21	0.21	0.31	0.41	0.51	0.91	3.46	6.91	13.9
Broadband - Y (mG)	0.11	0.21	0.21	0.31	0.61	1.26	3.60	5.30	10.4
Broadband - Z (mG)	0.36	0.61	0.71	1.01	1.11	1.31	3.60	8.05	14.3

Tabla 4.3: Porcentaje de muestras que presentan una intensidad de campo magnético bajo cierta magnitud dada - medida de campo magnético inicial Sala TEM.

Haciendo un breve análisis de las tablas anteriores es posible mencionar que el Eje Y es el que aporta la menor intensidad al campo magnético resultante y que por el contrario el Eje Z resulta ser el que se encarga de entregar el mayor aporte a la intensidad de campo magnético

resultante (Ver tabla 4.2). Esto último se puede justificar, ya que existe una estrecha relación entre la ubicación de las bandejas porta conductores que cruzan por el cielo de la sala y la componente del campo magnético sensada en el Eje Z. Por consiguiente, al cruzar por el cielo de la Sala TEM numerosos conductores eléctricos de fuerza y alumbrado, existirían por ende un gran número de fuentes de interferencias electromagnéticas, que sin duda alguna, marcan la diferencia con respecto a los otros ejes de medida.

Además, de acuerdo a la tabla 4.3 se puede comprobar que pese a que el 50% de los valores sensados poseen una magnitud resultante inferior a 1.41mG, la desviación estándar entre las medidas no es menor (4.1mG). Esto último, producto de tener intensidades de campo magnético excesivamente altas en algunos puntos de la sala, a causa de la existencia en el muro Norte de la Sala TEM de los tableros de alumbrado del zócalo los cuales generan un Peak de hasta 20.5mG, que sin embargo se degrada con rapidez mientras más alejado se esté de dicho muro, tal como se demostró en forma teórica en el capítulo tercero.

Por otra parte, si se miran los requisitos de campo magnético exigidos por el fabricante del TEM en el Anexo A-1, es claro ver que el límite de campo magnético máximo admisible tanto para los ejes X, Y como Z es de 125nT “Peak to Peak”, lo cual es equivalente a 0.44mG valor efectivo por cada componente (es decir, 0.76mG resultante). En consecuencia, como se ha de observar en la tabla 4.2, no se estaría cumpliendo con tal requisito. Es más, de la tabla 4.2 se desprende que la intensidad de campo magnético resultante mínima alcanzada es de 0.83mG.

Por ende, es necesario disminuir la intensidad de campo magnético resultante de 20.5mG a 0.76mG, lo cual es equivalente a lograr una atenuación efectiva de 28.6dB. No obstante, y de acuerdo con lo estudiado en los capítulos anteriores, lo más eficiente no es diseñar un blindaje que atenúe tales niveles de campo de forma inmediata (ya que se necesitarían muchas capas o una capa muy gruesa del material), sino que en primer lugar conviene analizar la factibilidad del desplazamiento de las fuentes de EMI existentes, en busca de un primer tratamiento mediante el “Blindaje Generalizado” [4], [15], [16].

Antes de analizar el blindaje generalizado a utilizar, resulta de gran utilidad efectuar algunas medidas adicionales de campo magnético en las inmediaciones de la Sala TEM, pues de dicha forma se logra entender mejor el entorno que rodea el lugar y observar “de donde” o “por donde” es que provienen las filtraciones electromagnéticas.

4.2.2 Medidas de campo magnético iniciales en las inmediaciones de la Sala TEM.

La finalidad de las medidas siguientes, es poder observar las condiciones de campo magnético iniciales alrededor de la Sala TEM, con el fin de esclarecer la influencia de la interferencia electromagnética externa sobre la sala y de paso también, lograr apreciar empíricamente la atenuación del campo magnético con la distancia a la fuente²⁸, complementando con pruebas experimentales los resultados teóricos obtenidos en las ecuaciones (3.13) a la (3.28). Para ello, se tomará el caso más crítico observado en la Figura 4.15, el cual está dado por los tableros eléctricos de alumbrado y fuerza. A continuación, la figura 4.16 indica la dirección y el sentido en el cual se ejecutó la medida del campo magnético.

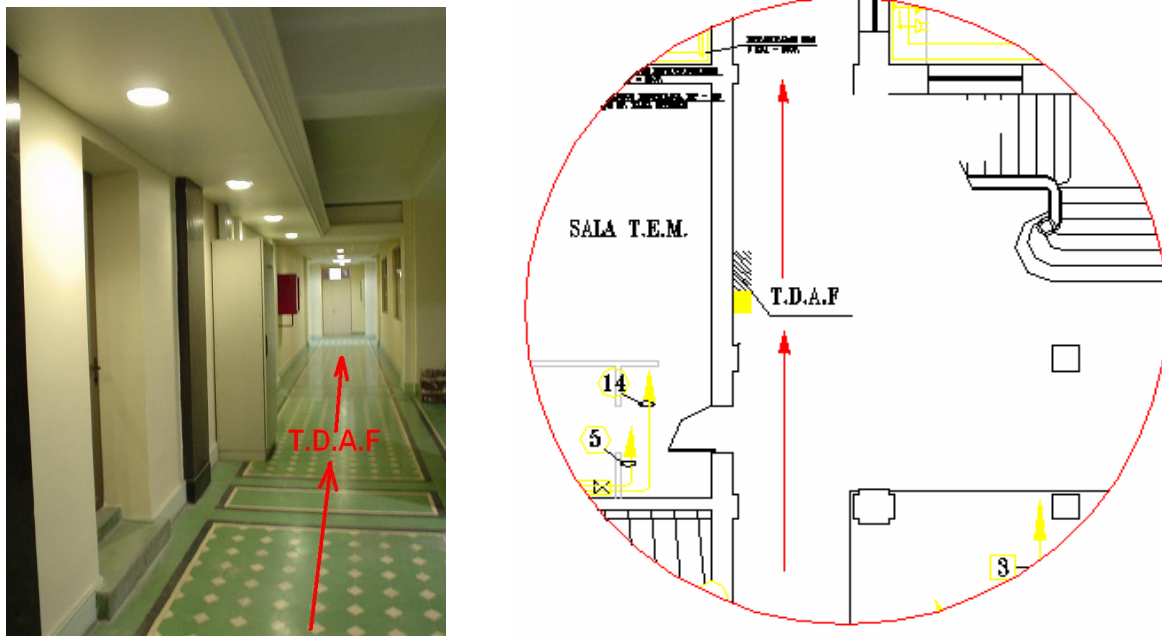


Figura 4.16: Dirección y sentido en que se efectuaron las medidas de campo magnético inducido alrededor de los tableros eléctricos ubicados tras el muro Norte de la Sala TEM.

En la figura anterior es posible apreciar con claridad la ubicación de los tableros eléctricos. Por otra parte, el eje de medida indicado mediante las flechas rojas, tiene su origen frente al T.D.A.F a unos 60cm de éste. Los resultados obtenidos de la medida de campo magnético con el EMDEX II, son los descritos en la Tabla 4.4 y Figuras 4.17 / 4.18 siguientes.

²⁸ Ya que en el Capítulo anterior, Sección 3.1.: “Análisis del Blindaje Generalizado”, se estudiaron los aspectos teóricos del fenómeno y solo se demostró mediante la simulación con FEKO su validez. Sin embargo, en tal ocasión no se realizó ninguna validación empírica de ello, por lo cual las medidas siguientes complementan lo estudiado y dan “validez experimental” a las simulaciones descritas en las figuras 3.2.B y 3.4.

Nº de la Medida	Distancia Lateral Hasta T.D.A.F - (m)	Inducción Magnética B - (mG)	Corriente medida en T.D.A.F - (A)
1	-10,0	2,7	57,7
2	-9,0	3,5	72,9
3	-8,0	3,2	84,2
4	-7,0	3,5	67,3
5	-6,0	3,4	60,2
6	-5,0	2,7	60,6
7	-4,0	2,8	54,5
8	-3,0	2,6	54,2
9	-2,0	3,2	73,0
10	-1,0	4,6	73,5
11	0,0	30,0	74,8
12	1,0	9,4	55,5
13	2,0	4,5	55,2
14	3,0	1,8	69,0
15	4,0	1,2	74,0
16	5,0	1,0	73,0
17	6,0	1,0	58,3
18	7,0	0,9	58,4
19	8,0	0,9	52,9
20	9,0	1,1	52,9
21	10,0	1,0	58,4

Tabla 4.4: Medida de campo magnético resultante en pasillo indicado en la figura 4.14, y corriente sensada en el T.D.A.F. en coordinación con la medida de campo.

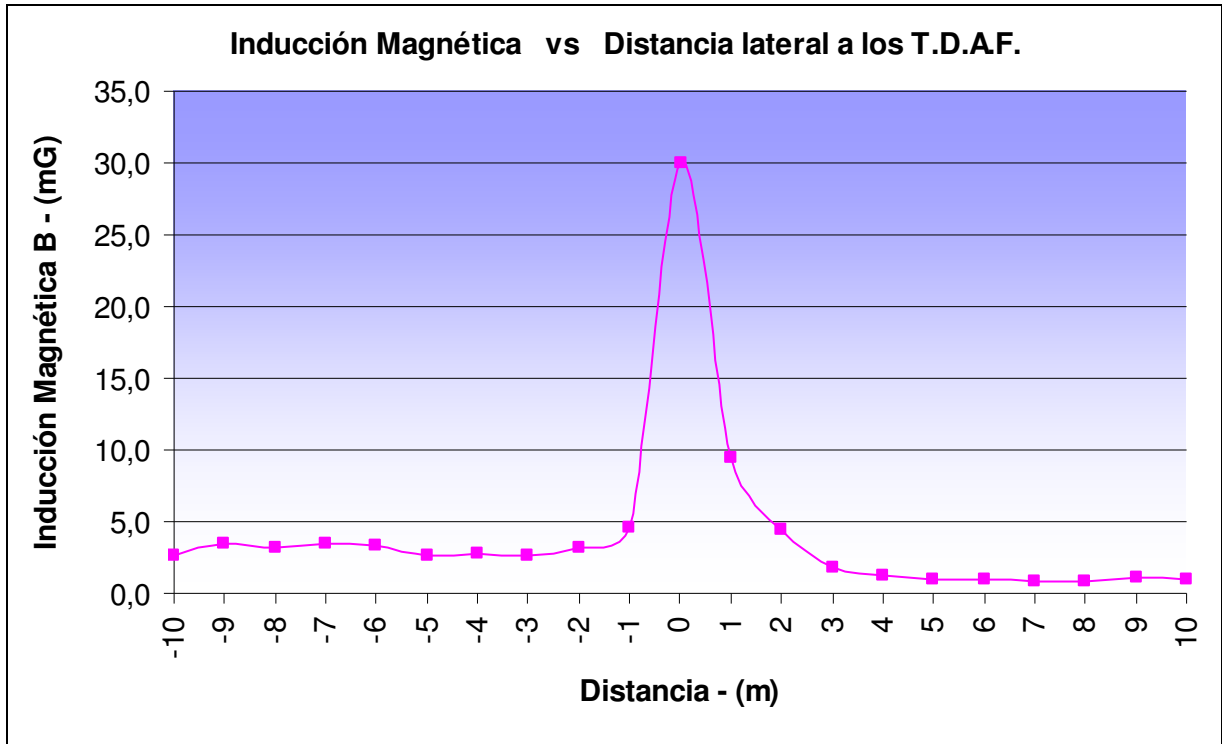


Figura 4.17: Inducción Magnética en función de la distancia lateral a los tableros.

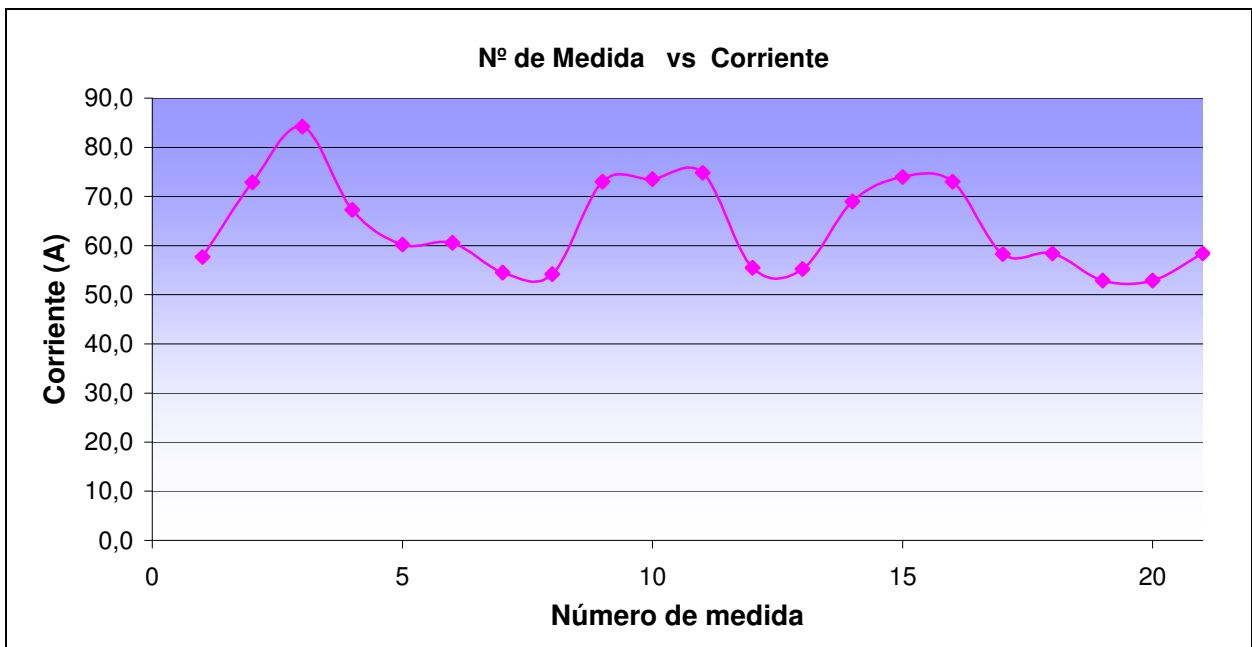


Figura 4.18: Corrientes sensadas en el T.D.A.F, en coordinación con la medida de campo magnético respectiva.

De la figura 4.17 se observa claramente el efecto del T.D.A.F como la fuente fundamental de interferencias electromagnéticas en el muro Norte de la Sala TEM y de sus alrededores, presentando un Peak de 30mG en el punto cero de medidas. Por otro lado, para las distancias entre -10m y 0m los niveles de campo magnético resultantes son de mayor orden que los situados entre 0m y 10m. Esto último, ya que hacia el poniente del T.D.A.F existe menor cantidad de canalizaciones eléctricas, lo cual sin duda ayuda a que exista un menor acoplamiento entre dichas canalizaciones y los conductores que componen el sistema de los tableros eléctricos. Además, gracias al aporte de la figura 4.18 se puede señalar que el consumo de corriente de los equipos alimentados desde los tableros del zócalo es de alrededor de 60 Amperes, variando en función de la operación de los diversos equipos de aire acondicionado.

A continuación corresponde entonces observar el efecto de los tableros eléctricos sobre el campo magnético inducido frente a ellos. Para lo cual se siguió el camino imaginario descrito por el eje trazado con las flechas rojas indicado en la figura 4.19, y los resultados obtenidos se describen en la tabla 4.5 y figuras 4.20 y 4.21.

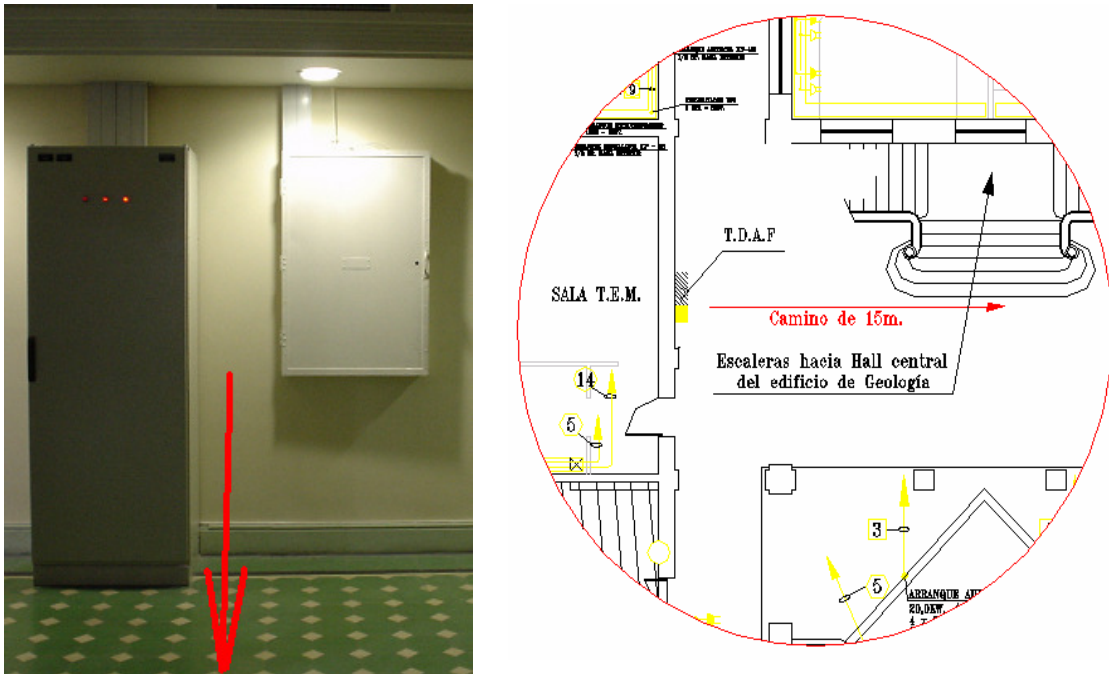


Figura 4.19: Dirección y sentido en que se efectuaron las medidas de campo magnético inducido frente a los tableros eléctricos.

Nº de la Medida	Distancia desde T.D.A.F - (m)	Inducción Magnética B - (mG)	Corriente en T.D.A.F - (A)
1	0,0	204,0	61,8
2	1,0	5,0	61,6
3	2,0	1,1	61,2
4	3,0	0,7	67,3
5	4,0	0,7	63,1
6	5,0	0,6	62,8
7	6,0	0,5	57,0
8	7,0	0,5	57,0
9	8,0	0,5	51,5
10	9,0	0,4	49,7
11	10,0	0,4	56,3
12	11,0	0,5	51,6
13	12,0	0,5	51,7
14	13,0	0,8	51,2
15	14,0	0,9	53,2
16	15,0	1,9	55,4

Tabla 4.5: Medida de corriente y campo magnético resultante frente a los tableros eléctricos del Zócalo del Edificio de Geología.

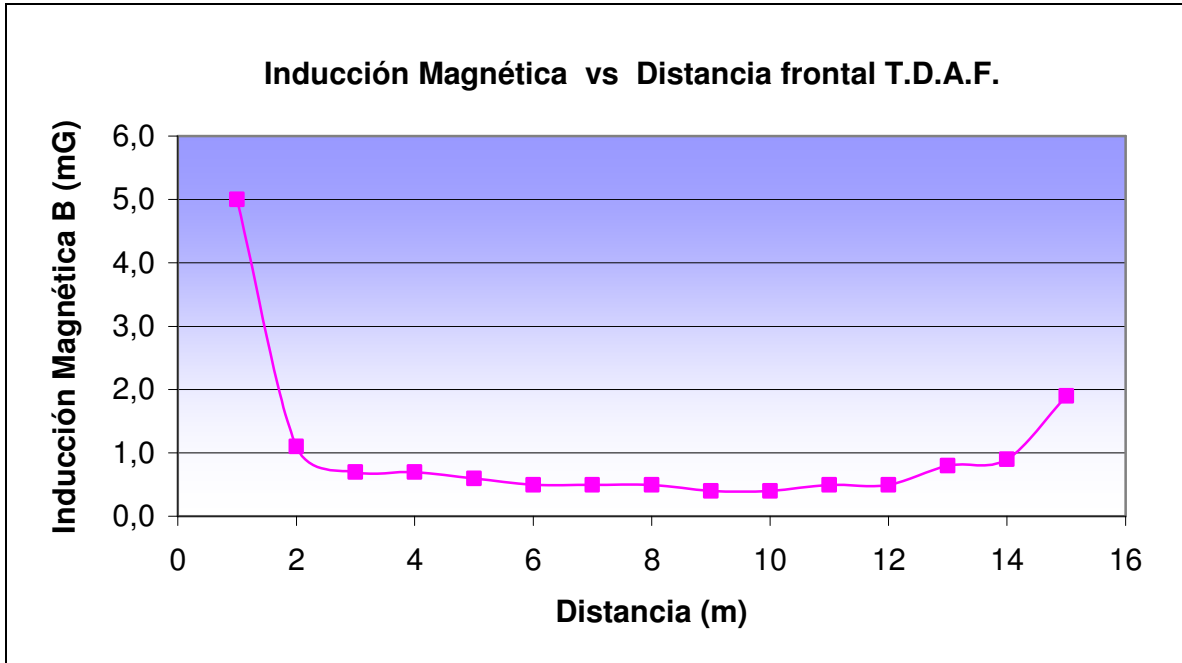


Figura 4.20: Inducción Magnética en función de la distancia frontal a los tableros eléctricos (se ha omitido el primer valor de la tabla para una mejor lectura de los restantes).

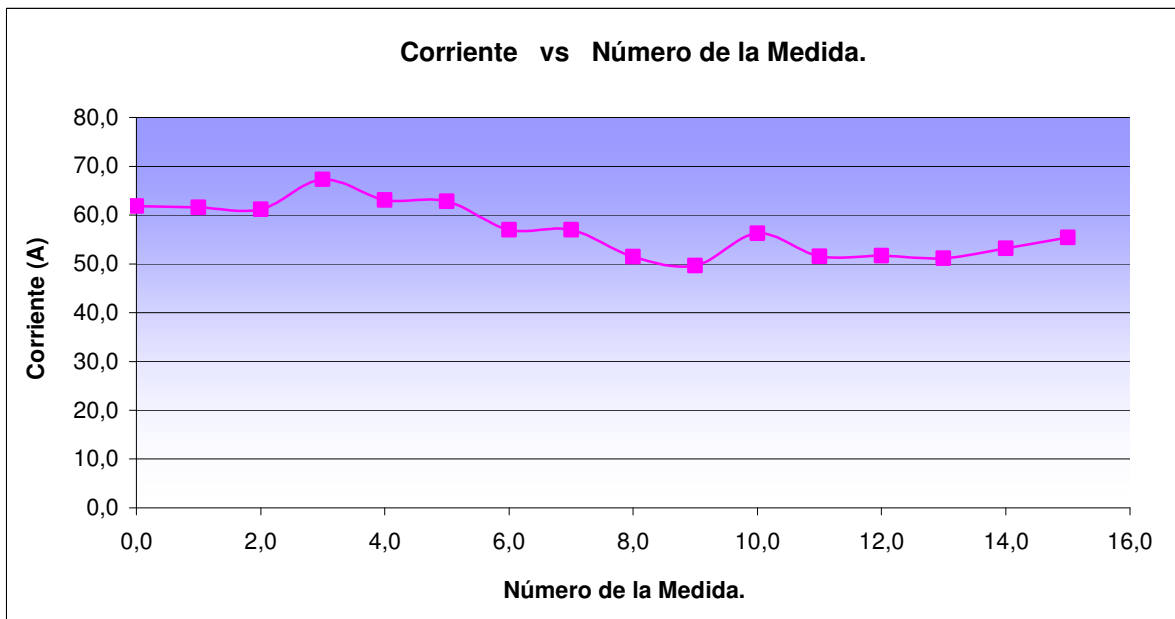


Figura 4.21: Corrientes sensadas en el T.D.A.F. en coordinación con la medida de campo.

Las medidas entregadas anteriormente resultan ser de mucha utilidad, gracias a que el eje de medida trazado con rojo en la figura 4.19 se encuentra justo por debajo del “Hall central del Edificio de Geología”, lo cual ayuda a tener una muy buena noción aproximada de lo que sería una medida libre de otras fuentes externas que puedan acoplarse con el sistema compuesto por los tableros eléctricos del zócalo. Por ende esta medida en particular, nos sirve para poder comprobar la distancia mínima que le brindaría a la sala TEM un buen blindaje generalizado.

Para poder analizar el blindaje generalizado, recordemos que en el capítulo anterior (más específicamente en el punto: “3.2.2. Determinación del Campo Magnético en las inmediaciones del conductor”) se concluyó que:

- Para el caso del campo lejano: la mejor aproximación de la atenuación de éste, estará dada por una función dependiente de $1/r^3$ (Ver también figura 3.5).
- Y que se suele considerar como “Campo Lejano”, a todo aquel situado a una distancia 3 veces mayor [5] al radio del blindaje equivalente (R_2 en la figura 2.4).

En el caso de la Sala TEM, y de acuerdo con las dimensiones físicas de la sala: el ancho y el alto de ella serían los que rigen el tamaño de un “casquete esférico teórico” el cual podría albergar en su interior al microscopio electrónico de transmisión (el largo de la sala es de 5.75m por lo que no implica una limitante para el caso de querer introducir un gran casquete esférico al interior de la sala). Por ende, de acuerdo con esto se deduce entonces que:

- El “Radio del Blindaje Equivalente de la Sala TEM” es de aproximadamente 2.5m (la mitad de el ancho de la sala, que contando muros es de alrededor de 5m).

Continuando entonces con el análisis, y utilizando a la regla del “factor 3” para el campo lejano, es posible determinar que para el caso de la Sala TEM la distancia mínima o crítica desde la cual la atenuación magnética comienza a ser función de $1/r^3$ es de alrededor de los 7,5 u 8m de distancia. Lo cual queda completamente demostrado gracias a los resultados empíricos obtenidos en la tabla 4.5 y figura 4.20, ya que si observamos que a 0m de los T.D.A.F se obtienen 204mG, según lo concluido anteriormente a 8m de distancia el campo debería estar dado por:

$$B_{\text{degradado a los 8m}} = \frac{204}{(8)^3} = 0,39\text{mG} \approx 0,4 \text{ mG} \quad (4.2)$$

Y como es posible apreciar en la tabla 4.5 (valores con negrita y destacados) y en la figura 4.20, a los 8m de distancia el campo magnético resultante medido posee una magnitud de 0,5mG, lo cual es bastante cercano a los 0,4mG estimados en forma teórica en la ecuación (4.2) anteriormente señalada. Cabe mencionar también, que producto de la presencia de otras canalizaciones eléctricas que viajan por el cielo del “Ala Norte” del Zócalo del Edificio de Geología, el resultado empírico no resulta ser más cercano al teórico. Esto último, ya que como es posible notar en la figura 4.20 desde los 13m hacia los 15m de distancia, el campo magnético comienza a elevarse producto del acoplamiento entre el sistema eléctrico del Ala Norte con el sistema eléctrico compuesto por los tableros eléctricos del Ala Sur.

En cuanto a las corrientes obtenidas en la figura 4.21, se puede observar que en este caso el consumo se mantuvo en la mayoría de las mediciones por debajo de los 60 Amperes, sufriendo leves fluctuaciones a causa (como se mencionó anteriormente) del funcionamiento de los distintos equipos de aire acondicionado²⁹.

Por consiguiente, antes de determinar las características que debía tener el blindaje físico, se recomendó efectuar un “Blindaje Generalizado”. En él, las fuentes de EMI descritas anteriormente y señaladas en la figura 4.15, fueron eliminadas completamente en torno a un radio de 8m alrededor de la Sala TEM. Cabe señalar también, que las modificaciones al sistema eléctrico del edificio de Geología necesarias para lograr dicho blindaje generalizado mediante el desplazamiento de todos los equipos eléctricos, fue un arduo trabajo el cual incluyó un levantamiento previo del sistema eléctrico (a raíz de la antigüedad del edificio y de la falta de planos del sistema eléctrico, que por lo demás ha sufrido numerosas modificaciones a través de los años, etc.), y alrededor de un semestre de trabajos³⁰.

Luego de todo aquello y finalizadas las obras del desplazamiento de los equipos eléctricos, el blindaje generalizado ya estaba concluido. Por lo tanto el paso lógico a continuación, es volver a realizar las medidas de campo magnético al interior de la Sala TEM. Para luego de ello, poder estar en condiciones de proponer un blindaje físico, el cual sea capaz de cumplir con la atenuación electromagnética necesaria para satisfacer los requerimientos de 0.44mG que solicita el fabricante del TEM por cada una de las componentes individuales: “X”, “Y”, “Z”.

²⁹ Para mayor información y medidas iniciales en las inmediaciones de la Sala TEM, véase el “Anexo D-1”.

³⁰ Los trabajos de desplazamiento de los equipos eléctricos y reconstrucción del sistema eléctrico del zócalo del edificio de Geología, se desarrollaron en el segundo semestre del año 2005. Obra realizada bajo la supervisión del Ingeniero Civil Electricista y encargado del laboratorio de Alta Tensión de la Universidad de Chile, Don Miguel Ángel Segura.

4.2.3 Medidas de campo magnético en la Sala TEM post- blindaje generalizado.

Es así como nuevamente se procedió a obtener un mapeo de la Sala TEM a través del barrido de su superficie con el EMDEX II mediante el uso de un “camino imaginario”. Sin embargo, en esta oportunidad lamentablemente la sala estaba completamente ocupada por las cajas que albergaban los componentes del microscopio electrónico de transmisión, esperando la llegada desde U.S.A del instalador que enviaría el fabricante (FEI Company) a montar el equipo. Por lo cual no fue posible realizar las medidas en las mejores condiciones, puesto que el camino imaginario recorrido, fue el “único” que las enormes cajas permitían realizar de manera continua (Ver figura 4.22).



Figura 4.22: Estrategia de medida de la inducción magnética “Post- Blindaje Generalizado” y fotografías de la Sala TEM llena con las cajas de los componentes del microscopio – EMDEX II midiendo a una altura $Z = 1.5\text{m}$. Luminarias y equipos de aire acondicionado encendidos.

Como se aprecia en la figura anterior, el distanciamiento entre las medidas es bastante grande por lo que sin duda existirá un efecto adverso en la suavidad de la interpolación de los resultados a la hora de efectuar los gráficos del mapeo de la Sala TEM, pero como se observa también en las fotografías adjuntas en la figura 4.22, las enormes cajas solo dejan un “único” camino para recorrer con el instrumento y poder realizar la medida de inducción magnética en la Sala TEM. A continuación se entregan los resultados de las mediciones realizadas para las intensidades de campo magnético resultante y componentes x,y,z , para el peor escenario posible, es decir cuando las luminarias y los equipos de aire acondicionado están encendidos.

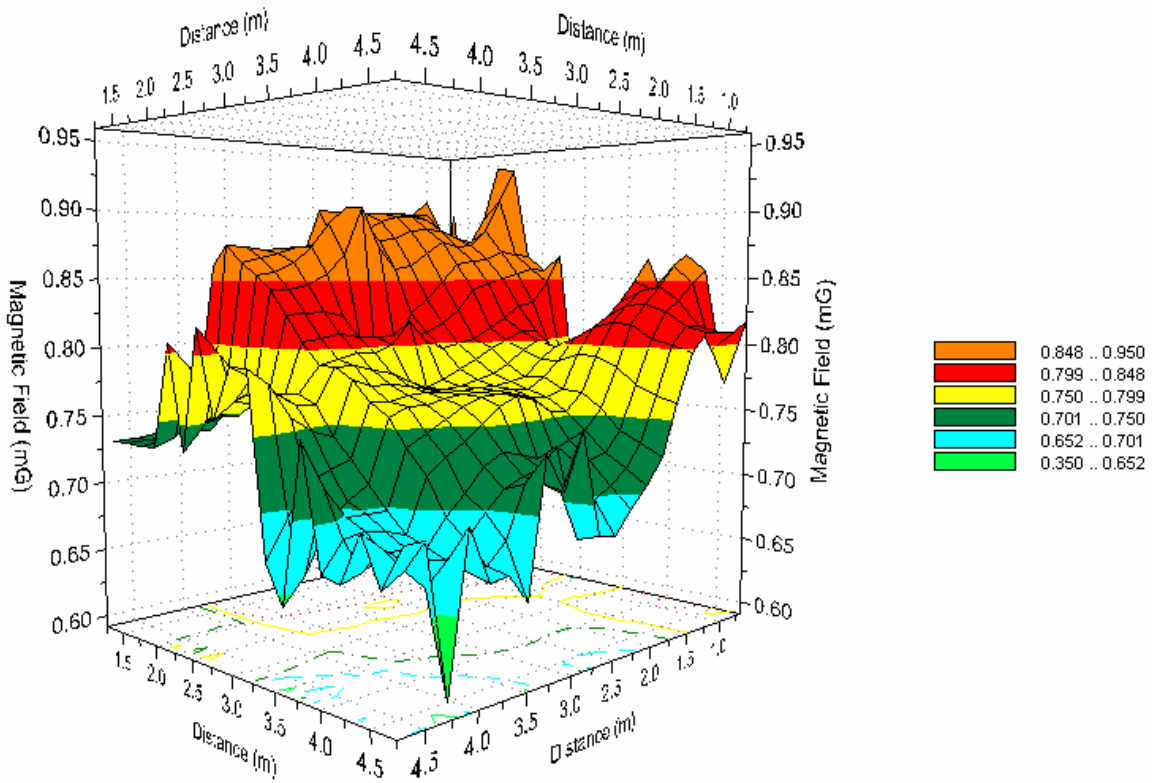


Figura 4.23: Intensidad de Campo Magnético Resultante – Post Blindaje Generalizado.

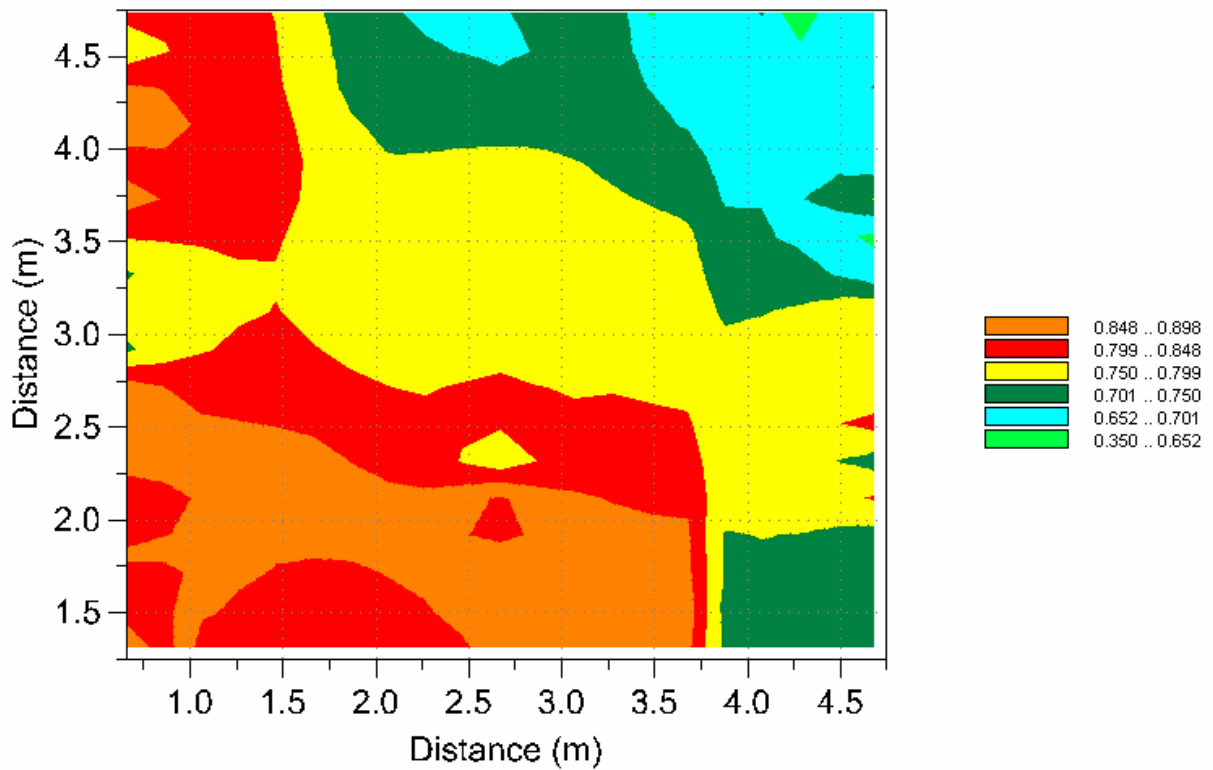


Figura 4.24: Curvas de Nivel – Intensidad de Campo Magnético Resultante (Post B.G).

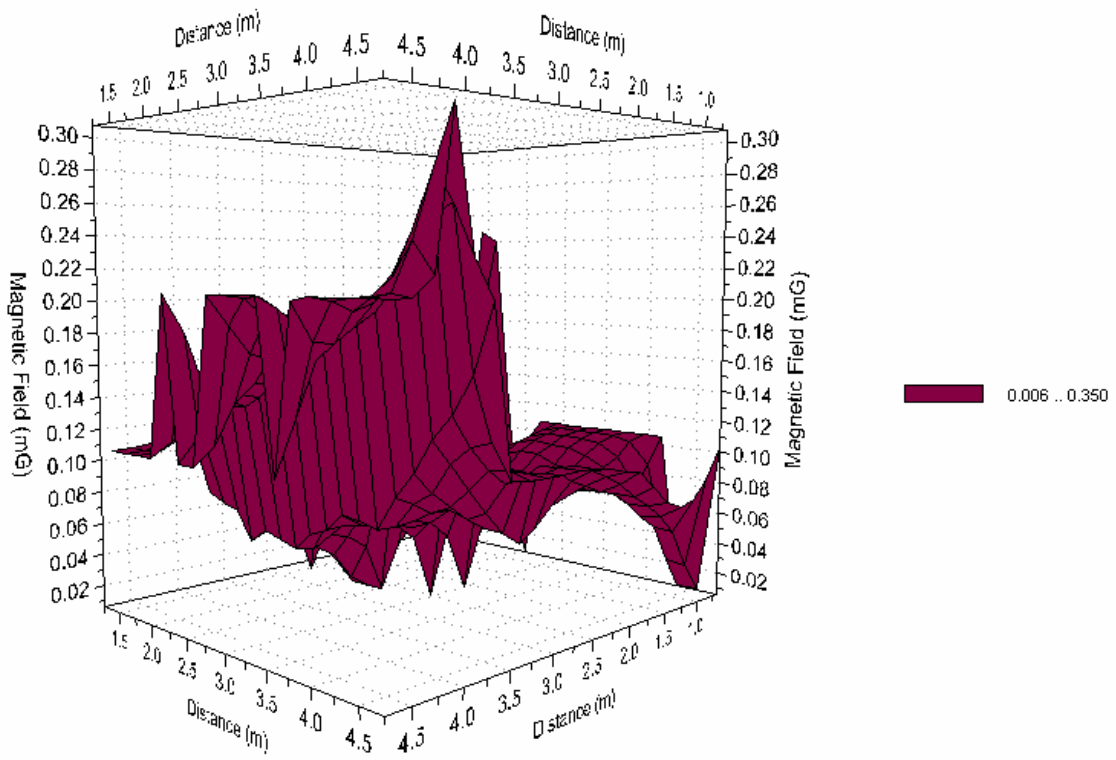


Figura 4.25: Intensidad de Campo Magnético en el Eje X (Post B.G).

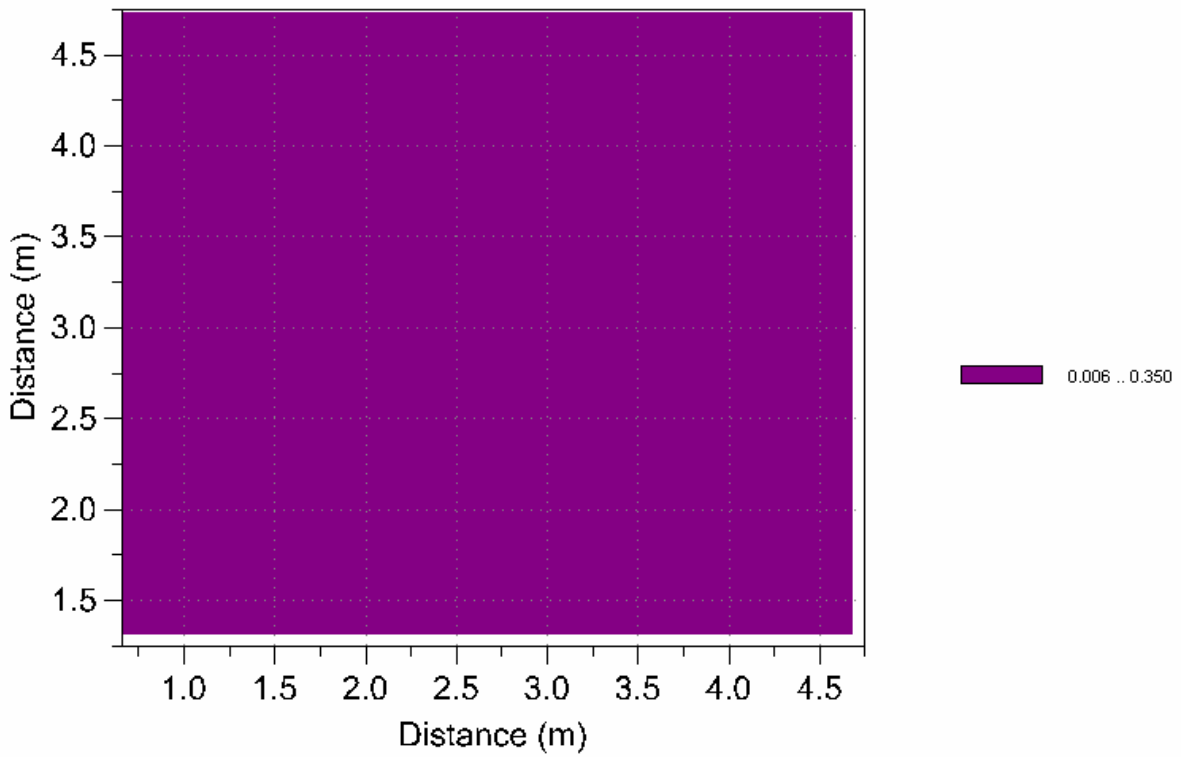


Figura 4.26: Curvas de Nivel – Intensidad de Campo Magnético en el Eje X (Post B.G).

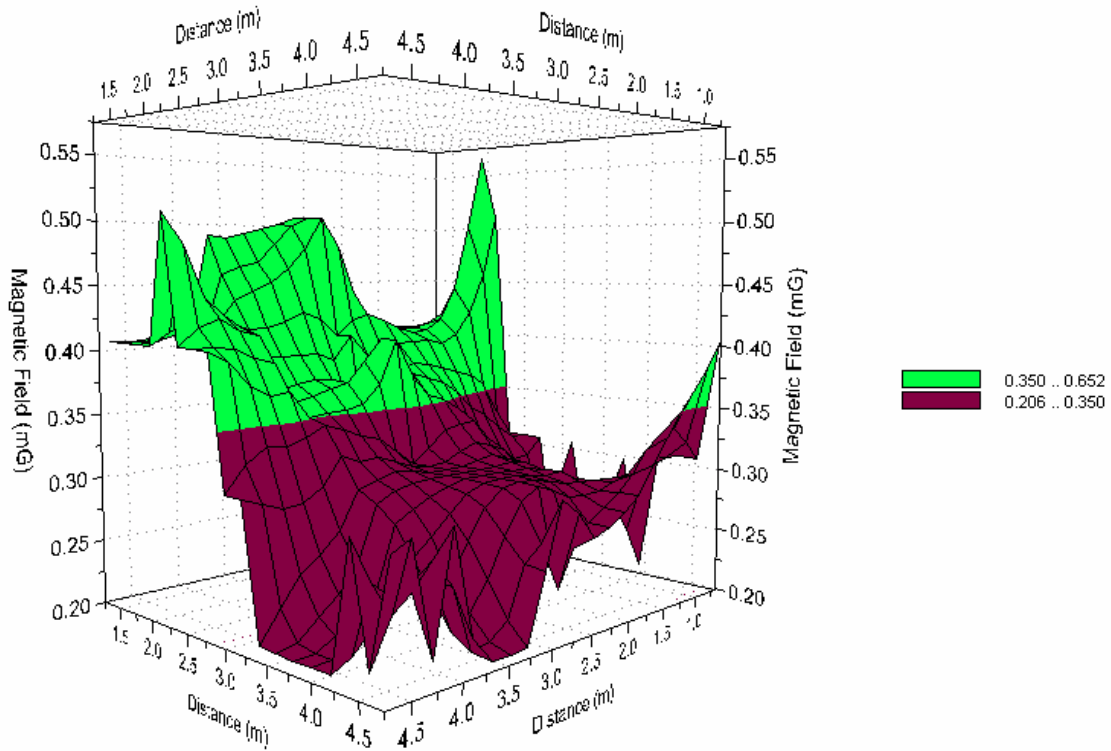


Figura 4.27: Intensidad de Campo Magnético en el Eje Y (Post B.G).

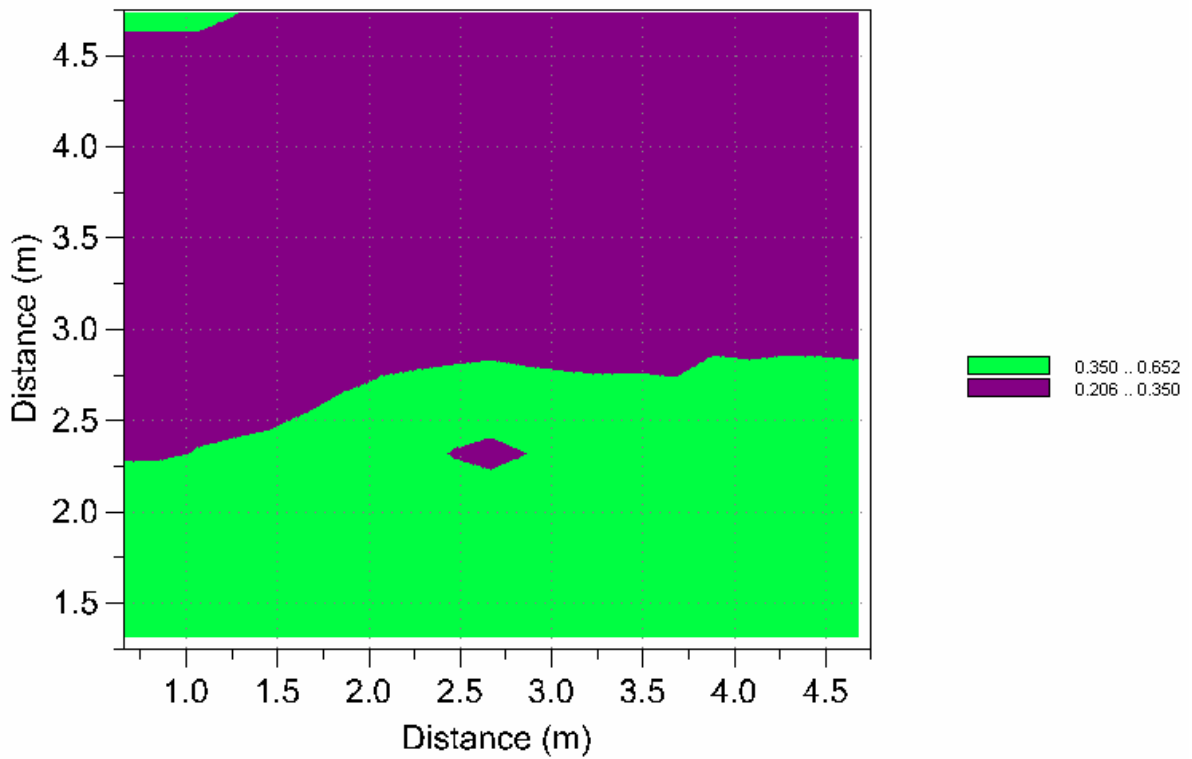


Figura 4.28: Curvas de Nivel – Intensidad de Campo Magnético en el Eje Y (Post B.G).

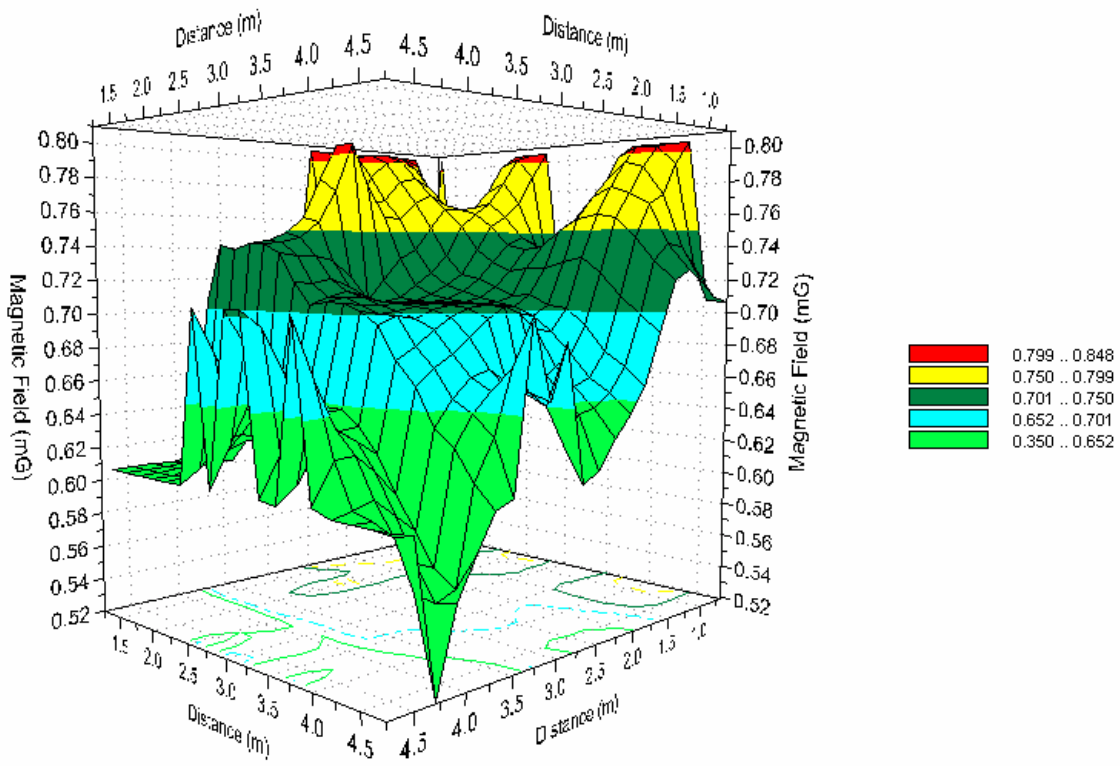


Figura 4.29: Intensidad de Campo Magnético en el Eje Z (Post B.G).

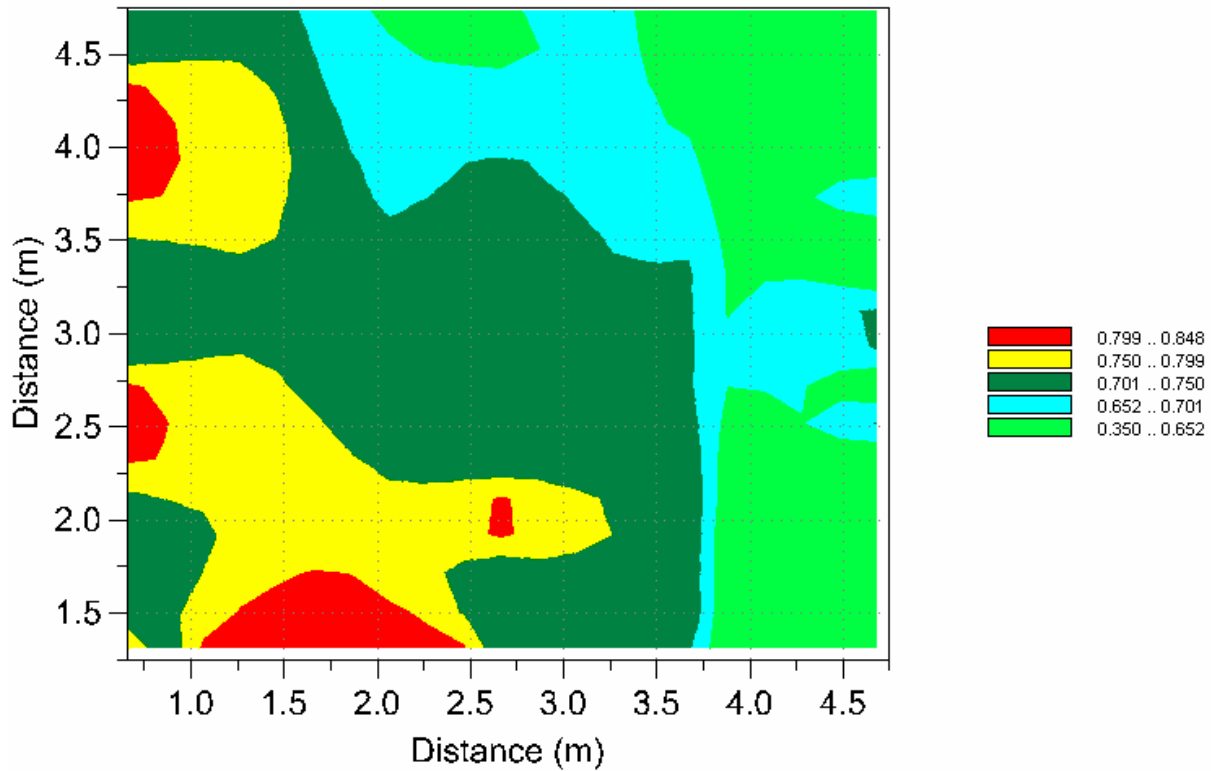


Figura 4.30: Curvas de Nivel – Intensidad de Campo Magnético en el Eje Z (Post B.G).

Además de los resultados gráficos entregados en las figuras 4.23 a la 4.30, también es de suma importancia observar la información estadística que resume el comportamiento de las mediciones de campo magnético señaladas anteriormente. Debido a esto, a continuación se presentan las siguientes tablas estadísticas:

Descripción	Mínimo	Máximo	Media	Des. Est.	Mediana
Broadband - Resultante (mG)	0.58	0.98	0.78	0.09	0.77
Broadband - X (mG)	0.01	0.31	0.12	0.07	0.11
Broadband - Y (mG)	0.21	0.61	0.33	0.09	0.31
Broadband - Z (mG)	0.51	0.81	0.69	0.08	0.71

Tabla 4.6: Descripción estadística - medida de campo magnético “Post- B.G.” Sala TEM.

Orden	1%	5%	10%	25%	50%	75%	90%	95%	99%
Broadband - Resultante (mG)	0.58	0.64	0.67	0.73	0.77	0.87	0.91	0.91	0.95
Broadband - X (mG)	0.01	0.01	0.01	0.11	0.11	0.21	0.21	0.21	0.31
Broadband - Y (mG)	0.21	0.21	0.21	0.31	0.31	0.41	0.41	0.51	0.56
Broadband - Z (mG)	0.51	0.61	0.61	0.61	0.71	0.71	0.81	0.81	0.81

Tabla 4.7: Porcentaje de muestras que presentan una intensidad de campo magnético bajo cierta magnitud dada - medida de campo magnético “Post- B.G.” Sala TEM.

Los resultados obtenidos de las medidas de campo magnético al interior de la Sala TEM “post-blindaje generalizado” señalan claramente que el campo magnético resultante se redujo considerablemente, alcanzando según las figuras 4.23 y 4.24 niveles que van desde los 0.58mG hasta los 0.98mG. Lo cual resulta ser bastante satisfactorio, ya que si se observan las figuras 4.5 y 4.6, los niveles de campo magnético resultante que presentaba la Sala TEM “Pre-Blindaje Generalizado” alcanzaban valores que aproximadamente iban desde un mínimo de 0,83mG, hasta un máximo de 20.5mG. En otras palabras, considerando los niveles máximos obtenidos en la medida “pre” y “post” blindaje generalizado, es posible inferir que el efecto de dicho blindaje generalizado ha sido de aproximadamente 26.4dB. Gracias a ello es posible afirmar al observar la tabla 4.6, que la magnitud “media” de la inducción magnética resultante en el interior de la Sala TEM en la condición post blindaje generalizado, es de 0.78mG. Y que además, el 75% de las medidas obtenidas en las figuras 4.23 a la 4.30, se encuentran por

debajo de los 0.87mG resultantes (ver tabla 4.7). Siendo además solo un 1% de las medidas obtenidas, de magnitud superior a los 0.95mG resultantes (ver tabla 4.7).

Es bueno hacer notar también, que la componente “X” de la inducción magnética medida post-blindaje generalizado (según la tabla 4.6), es de 0.12mG. Y la magnitud de la componente “Y” de la inducción magnética medida post- blindaje generalizado (según la tabla 4.6), es de 0.33mG, lo cual es inferior a los 0,44mG requeridos por el fabricante del TEM como cota máxima de inducción magnética aceptable por eje. Sin embargo, la magnitud de la componente del “Eje Z” es de 0.69mG, lo cual supera los 0.44mG exigidos por el fabricante. No obstante aquello, lo positivo es que la componente “Z” se encuentra alineada con la columna del TEM, por lo cual es “menos grave” que exista un campo elevado en dicho “Eje”, y no en las otras componentes (X o Y), ya que la distorsión de la imagen sería mucho menor a la que ocasionaría un campo elevado en los ejes “X” o “Y”.

Por lo tanto, ahora solo restaría alcanzar una atenuación desde los 0.98mG máximos obtenidos en las figuras 4.23 y 4.24 (componente resultante), hasta los 0.76mG solicitados como requerimiento de nivel de campo magnético máximo permitido por el fabricante del TEM (componente resultante, ver “Anexo A-1”). Es decir, solo falta lograr una atenuación de la componente resultante del orden de los 2.21dB, lo cual gracias a los resultados obtenidos en el capítulo tercero (Figuras 3.12 y 3.13), se sabe que es posible de alcanzar mediante un blindaje pasivo de Fierro Silicoso de Grano Orientado M-4 de lámina simple, el cual tiene (según lo estudiado en el capítulo tercero) una efectividad del blindaje del campo magnético de 7.53dB para el peor escenario posible de utilización de la Sala TEM. Nivel de atenuación que por lo demás, es 5.32dB superior a lo que exige el fabricante del TEM, lo cual es sumamente positivo.

Sin embargo, es en este punto en particular en el cual surgen una serie de interrogantes de manera natural, como por ejemplo: ¿Será cierto que la S.E._B calculada para el Fierro Silicoso de Grano Orientado M-4 mediante MoM está correcta?, ¿Cuan lejos o cerca está dicho resultado teórico (7.53dB) de la realidad?, etc.

Para esclarecer dichas dudas y poder complementar el trabajo que se ha realizado hasta ahora, a continuación se presentarán los resultados empíricos de la medida de la efectividad del blindaje de una lámina de Fierro Silicoso de Grano Orientado M-4, con ello se pretende poder contrastar el resultado teórico con el empírico, y poder de dicha forma corroborar la validez del modelamiento teórico mediante MoM del blindaje electromagnético de la Sala TEM.

4.3 Obtención $S.E.B$ empírica del Fierro Silicoso M-4.

Existen numerosas normas gubernamentales a nivel mundial, utilizadas para poder especificar: el nivel de efectividad de un blindaje, su rendimiento y la forma en la cual debe realizarse su medida. Entre las más utilizadas se encuentran: la norma MIL- STD- 285, NSA 65- 6, NSA 73- 2A y la IEEE- 299. Tales documentos hoy en día son utilizados ampliamente en la elaboración de las especificaciones y la evaluación de recintos blindados en todo el mundo.

En particular, para la obtención de la magnitud de la efectividad empírica del blindaje magnético de una lámina de Fierro Silicoso de Grano Orientado M-4, se ha llevado a cabo la medida de la atenuación del campo magnético que dicha lámina ejerce sobre un campo magnético de excitación, según lo indicado en el estándar NSA 65-6. Dicho estándar, señala que la fuente de excitación o “loop” de excitación se debe ubicar a 30cm de una de las caras de la lámina, mientras que el instrumento (que actúa como el receptor de la señal de excitación) se debe ubicar a 30cm de la cara opuesta de la lámina³¹, tal cual se indica en la figura 4.31.

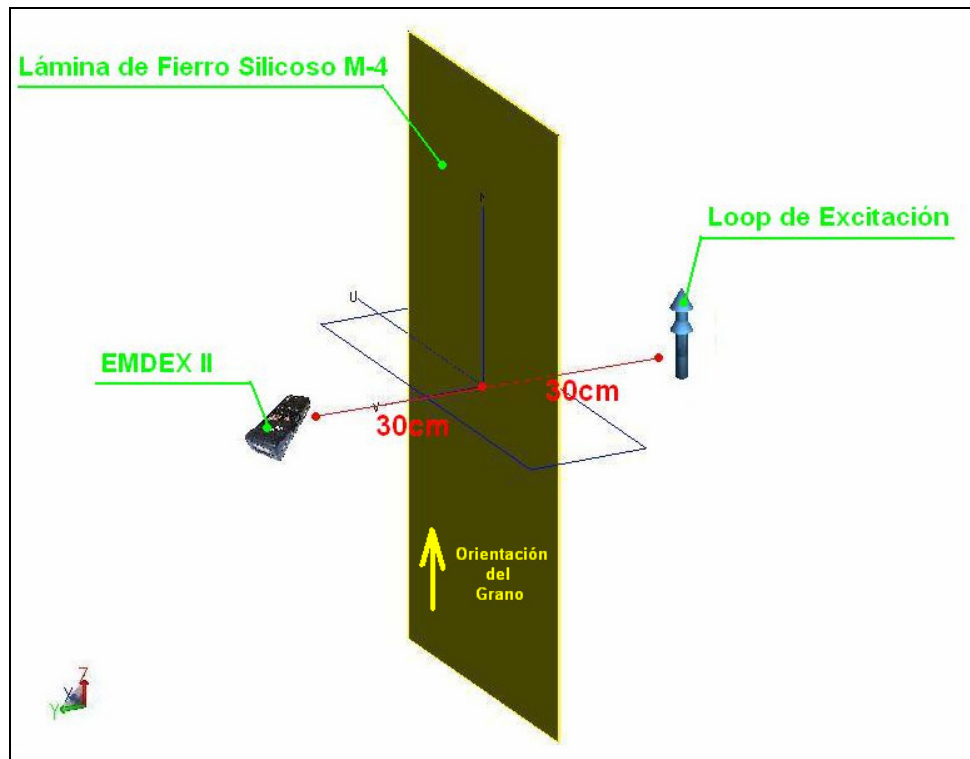


Figura 4.31: Estrategia de medida de la $S.E.B$ para una lámina de Fierro Silicoso de Grano Orientado M-4 según el estándar NSA 65-6.

³¹ La lámina debe ser aterrizada en sus extremos. Con ello se permite la circulación a tierra de corrientes inducidas en la placa.

Siguiendo la estrategia de medida antes señalada, se procedió entonces a obtener con el EMDEX II la magnitud de la atenuación del campo magnético de excitación en la lámina de Fierro Silicoso, y su resultado se entrega en la Figura 4.32 siguiente.

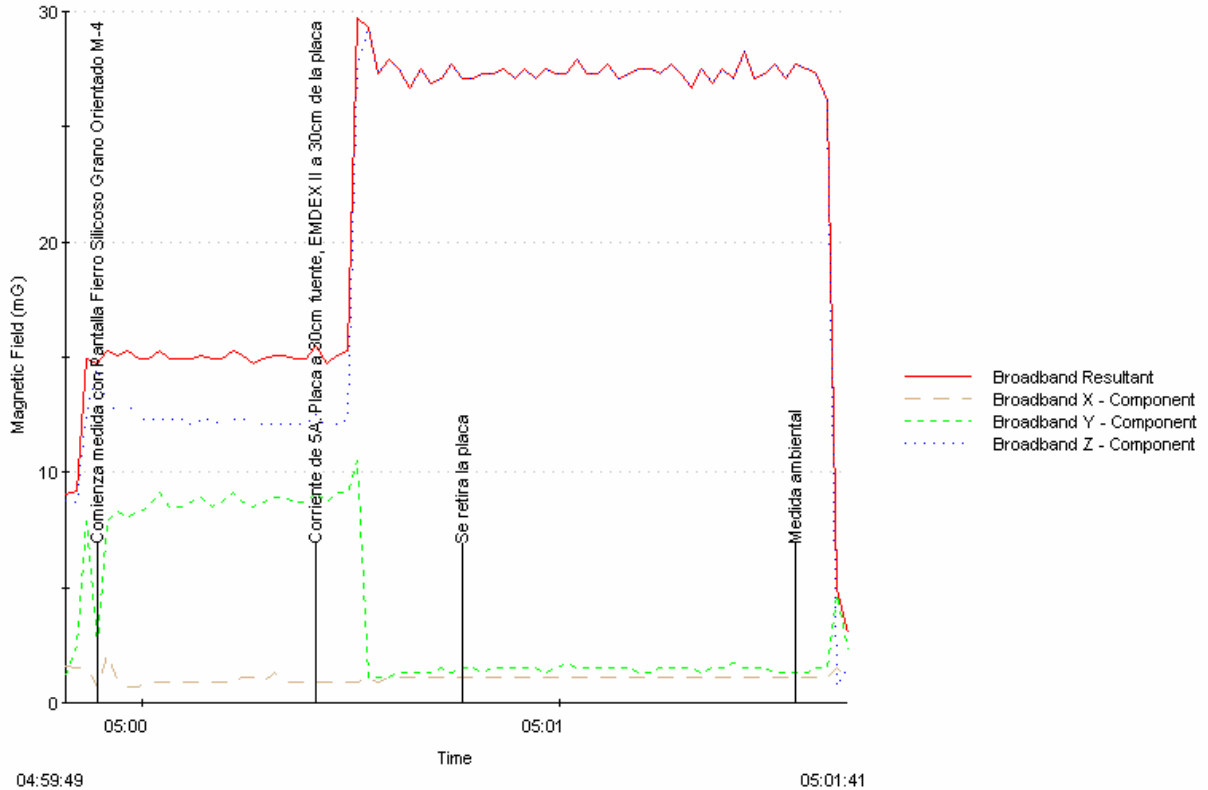


Figura 4.32: Resultado de la medida de la S.E._B para una lámina de Fierro Silicoso de Grano Orientado M-4 según el estándar NSA 65-6 descrito en la figura 4.31.

Como se puede observar en la figura 4.32, la atenuación que proporciona la lámina de Fierro Silicoso de Grano Orientado M-4 es notable. Pues según se aprecia en dichos resultados, logra reducir la intensidad del campo magnético desde alrededor de 28mG a solo 14mG. Por lo tanto, es claro a partir de ello calcular que la S.E._B empírica de una lámina de dicho material, será de alrededor de los 6.021dB (para el campo magnético resultante). Pero es más importante todavía poder observar de la figura 4.32 que, para la componente “Z” del campo magnético medido, existe una atenuación adicional de 0.98dB. Lo anterior, pues como es posible observar en la figura 4.32, la componente “Z” del campo magnético se reduce de 28mG a 12.5mG, lo cual implica que existe una atenuación total de la componente “Z” de 7.01dB. Dicho resultado es de particular interés, puesto que en los materiales ferrosos normales no ocurre dicha atenuación extra de la componente “Z”, ya que para el caso específico de la medida de campo magnético

realizada mediante el esquema de la figura 4.31, la lámina de Fierro Silicoso posee la “orientación del grano” justamente en la dirección del “Eje Z”, y es por dicha razón particular que es posible observar tal atenuación adicional en la componente “Z” del campo³².

No obstante lo anterior, también se observa en la figura 4.32 que la atenuación adicional del “Eje Z” no es gratuita, pues la corriente inducida que circula en la dirección del “Eje Z” genera un aumento en el campo de la componente “Y” (claramente visible en la figura 4.32, línea segmentada de color verde). Sin embargo ello es completamente solucionable, ya que como la sala es rectangular, se deberá tener en cuenta a la hora de efectuar la instalación de las placas en los muros de la Sala TEM, que dichas placas deberán ser instaladas en la misma dirección en cada par de muros opuestos, pero el sentido de la orientación del grano deberá ser el contrario. De dicha forma, los campos se irán restando o anulando “de a pares” al interior de la Sala TEM, eliminando con ello el efecto colateral provocado por el aumento de la atenuación en el campo magnético del “Eje Z”.

En definitiva, los resultados obtenidos en la figura 4.32 permiten decir en forma resumida, que la lámina de Fierro Silicoso entrega una atenuación empírica de 6.021dB del campo magnético resultante. Dicho resultado se puede contrastar con los obtenidos en el capítulo tercero, figuras 3.12 y 3.13, en donde se calculó mediante el MoM que la efectividad del blindaje magnético de la Sala TEM es de 7.53dB, para el caso en el cual la puerta principal es dejada por descuido abierta durante la operación del TEM.

Lo anterior implicaría entonces, que existe una diferencia de 1.509dB entre el resultado teórico y el empírico, lo cual sin embargo es posible de explicar, ya que si se observa la estrategia de medida indicada por el estándar NSA 65-6 de la figura 4.31, obviamente existirán mayores filtraciones de EMI hacia el instrumento para dicho caso que para el teórico, producto que algunas de las líneas de campo “rodearán” la lámina de Fierro Silicoso (que por lo demás posee un ancho de solo 88cm), y por ende hacen que la medida empeore en una proporción no menor, en comparación con el resultado teórico en el cual la habitación es un rectángulo cerrado en donde solo existe una gran apertura en uno de sus muros, pero que en definitiva es de una dimensión “bastante menor” considerando que la longitud de onda (λ) para una frecuencia de 50Hz es de 5.996km.

³² Ver “Anexo D-2: Contrastación de la S.E._B de dos láminas ferromagnéticas diferentes” para poder observar en forma práctica cual es el verdadero efecto de la orientación del grano en el caso del Fierro Silicoso M-4.

Finalmente, es así como se ha dado respuesta a las interrogantes planteadas al término del punto 4.2.3, dejando clara la validez de la aplicación del MoM para el cálculo de la efectividad del blindaje, y la diferencia de alrededor de 1.5dB con respecto a la medición de la $S.E._B$ de un blindaje real.

En consecuencia, ya que solo falta lograr una atenuación de la componente resultante del orden de los 2.21dB para que el TEM pueda trabajar correctamente en todos sus modos de operación (reduciendo el campo magnético resultante en la sala, desde 0.98mG a 0.76mG). Es claro que al blindar la Sala TEM a través del recubrimiento de todas sus paredes con solo una capa de Fierro Silicoso M-4, la sala quedará protegida de las interferencias electromagnéticas con un factor de seguridad de orden 3^{33} . Lo cual resulta ser bastante positivo considerando que en el futuro es muy probable que exista un crecimiento de las fuentes electromagnéticas en el entorno que rodea la Sala TEM.

³³ Es decir que el blindaje mediante una única lámina de Fierro Silicoso M-4 podrá proteger al TEM, de campos magnéticos de alrededor de 1.5mG, es decir hasta alrededor de 6.1dB para el caso en el cual se encuentra la puerta abierta de la Sala TEM.

Capítulo 5: Diseño del Blindaje Electromagnético recomendado para la Sala TEM.

De lo expuesto en los capítulos anteriores, puede decirse que se cuenta con una base sólida en cuanto a lo que, en líneas generales, constituyen los blindajes electromagnéticos: sus fundamentos teóricos, mecanismos de blindaje, modelación matemática, simulación y cálculo computacional, instrumentos y estrategias de medida de campos electromagnéticos, etc.

Además se ha logrado abordar el problema específico de blindar el microscopio electrónico de transmisión, dando respuestas concretas a su modelamiento bajo una aproximación bastante cercana a lo que son las condiciones reales existentes en el Zócalo del Edificio de Geología, gracias a la obtención de las medidas iniciales de los campos magnéticos a los cuales se encontraría sometido el microscopio electrónico de transmisión en dicha sala, gracias a la ayuda del equipo de medida de campos electromagnéticos “EMDEX II”, pudiendo con ello esbozarse a grandes rasgos el Blindaje Electromagnético de la Sala TEM, es decir: el material escogido, su espesor, cantidad de capas, dimensiones de la sala, efectividad del blindaje incluyendo la apertura rectangular ocasionada por la puerta, etc. Todo ello constituye la ingeniería básica del Blindaje de la Sala TEM y permite, por consiguiente, dar cabida al diseño específico de dicho blindaje electromagnético.

A continuación, se pretende describir con mayor detalle el diseño del Blindaje Electromagnético de la Sala TEM recomendado como una solución puntual del problema de interferencias electromagnéticas que ponen en riesgo la correcta instalación del microscopio electrónico de transmisión. Con ello se intentará dejar en forma asequible y compacta todos los consejos necesarios para poder implementar un blindaje electromagnético pasivo, y que éste resulte eficiente. Para poder cumplir con este último requisito, es claro que el blindaje electromagnético deberá poseer la menor cantidad de filtraciones de interferencias electromagnéticas posibles, lo cual dependerá en un 80% del buen diseño y correcta instalación en terreno de cada uno de sus componentes.

Lo anterior no debe resultar extraño, pues de nada sirve la aplicación de un buen modelo matemático mediante un avanzado software específico, con los mejores y más rápidos computadores, si el diseño de las juntas de las placas que constituyen la estructura del

blindaje es incorrecto o la instalación misma del blindaje es deficiente, en ambos casos sin duda alguna, el proyecto terminará siendo un fracaso. Por ello resultan ser tan importantes las consideraciones que se señalarán a continuación con respecto al diseño e instalación del blindaje arquitectónico de la Sala TEM, las cuales se aplican en general para cualquier blindaje de similares características.

5.1 Consideraciones críticas en el blindaje arquitectónico.

Se entiende por blindaje arquitectónico, aquel construido al interior de la estructura de un edificio principal³⁴. Es así como una gran variedad de sistemas de blindaje han sido desarrollados desde hace ya varias décadas hasta el día de hoy dentro de esta categoría. Entre los sistemas más populares uno de los más antiguos fue aquel en el cual se utilizaban láminas delgadas de aluminio, sin embargo, producto de sus serias deficiencias en cuanto al rendimiento del blindaje, se abandonó su práctica por muchos años. No obstante, en la actualidad, y gracias a los avances en las técnicas de instalación y blindajes auto-adherentes, nuevamente se ha vuelto un método viable y de bajo costo, especialmente para el caso de instalaciones de equipos computacionales [17].

En los últimos años, el interés por desarrollar instalaciones con blindajes arquitectónicos de medio y alto rendimiento, ha dado paso a la creación de nuevos materiales provistos principalmente de Cobre, los cuales poseen un espesor muy pequeño y por ello se les suele denominar “Papeles de Cobre”. Por lo demás, para el caso de blindajes del campo eléctrico y de ondas planas, la mayoría de los blindajes fabricados mediante el uso de un recubrimiento de metal continuo ha dado buenos resultados. Sin embargo, la clave para todas esas aplicaciones está en cuan bien los componentes del blindaje son acoplados para formar finalmente una “barrera continua” a los campos electromagnéticos y todas las EMI existentes en el medio en que se sitúe dicho blindaje. Por consiguiente, un blindaje arquitectónico estará determinado por: su técnica de ensamble y por la integridad resultante en su efectividad del blindaje (S.E.), una vez que se han efectuado todas las aperturas necesarias para hacer el espacio al interior del blindaje “útil” para los propósitos que se diseñó.

En un recinto blindado, la mejor junta entre dos o más de sus componentes será aquella en la cual la continuidad se mantiene tanto en la composición de los materiales como en el sello de

³⁴ Dentro de los cuales no se encuentran incluidos los blindajes de juntas soldadas.

dicha junta (lo cual suele ser el caso de las juntas soldadas). Sin embargo, en numerosos casos de blindajes arquitectónicos se suele emplear alguna técnica en la cual se traslapa una lámina por sobre otra y luego se fija dicha junta mediante tornillos y una cinta autoadhesiva de material conductor. Lo anterior, suele degradar en cierto modo la efectividad del blindaje originalmente calculada, y es un factor realmente crítico a la hora de llevar a cabo el proyecto. No obstante aquello, si se toman los resguardos pertinentes y se realiza cada una de las juntas con el cuidado necesario, ningún problema habría de generarse a causa de ellas.

Otro punto crítico presente en los blindajes electromagnéticos de lámina simple y comúnmente un problema muy recurrente en ellos, es el denominado: “Efecto Antena”. Esto ocurre cuando existen penetraciones al blindaje producto del uso de: clavos, pernos, tornillos, etc., y no se efectúa un correcto “aterizamiento” de dichas aperturas, es decir, cuando las aperturas ocasionadas por los elementos de unión no poseen un sello “metal- metal” en los puntos de acoplamiento entre placas. En dichos casos, la energía se acopla desde un lado del blindaje hacia el otro, formando una verdadera antena. Este efecto es especialmente importante en el caso de aperturas que excedan 0.01 veces el tamaño de la longitud de onda [3], por consiguiente, a modo de ejemplo, es bueno notar que para el caso de clavos y pernos, es posible que el “efecto antena” reduzca la efectividad del blindaje a frecuencias a partir de los 100MHz en adelante. Por lo tanto, es recomendable que cada sujetador que penetre el blindaje, logre un acoplamiento mediante un sello continuo “metal- metal” de todos sus componentes, lo cual generalmente se logra mediante la utilización de sujetadores como por ejemplo: tornillos o pernos, los cuales han de ser compatibles con el material del blindaje y resistentes a la humedad, de modo que la corrosión no afecte el sello “metal - metal” que se intenta alcanzar en la junta.

5.2 Sistema de Blindaje con Juntas Tipo Sándwich.

Como se ha mencionado anteriormente, la necesidad de blindar recintos de las distintas EMI surgió hace ya varias décadas. A consecuencia de ello, y como una forma de dar respuesta a dicha necesidad, a comienzos de 1988 fue patentado en Estados Unidos un sistema de blindaje que utiliza habilidades, técnicas y materiales comúnmente empleados en la construcción de obras civiles [18]. Dicho sistema es conocido como el “Sistema de blindaje con juntas tipo sándwich”, ya que las juntas o uniones entre placas del blindaje son verdaderos sándwiches en los cuales, la junta de las placas queda completamente sellada entre dos capas de láminas metálicas adicionales, las cuales actúan en forma de verdaderas “tapas del sándwich”.

Esta técnica de montaje de juntas de blindajes electromagnéticos se sustenta en el principio fundamental de “eliminación de las guías de onda”, el cual se basa en que el ancho de la junta y el patrón de pernos, forman intervalos equiespaciados (guías de onda) que eliminan la energía electromagnética bajo una cierta frecuencia dada.

En las figuras 5.1 y 5.2 que a continuación se presentan, se ilustra el rendimiento de dicha técnica de “eliminación de las guías de onda”. Para ser más específicos, en la figura 5.1 se grafica el rendimiento calculado versus el rendimiento medido de un “blindaje tipo” en el cual fue empleada dicha técnica, mientras que en la figura 5.2 se observa el rendimiento alcanzado por la junta tipo sándwich en función de la frecuencia (calculado en forma teórica), para una junta con ancho fijo de 6 in, y diversos espaciamientos de los tornillos. Cabe señalar también, que decenas de blindajes con este tipo de juntas han sido construidos hasta la fecha por diversos instaladores especialistas en el tema tanto en Estados Unidos como en Europa, sin registrar ningún informe de falla al respecto hasta el día de hoy.

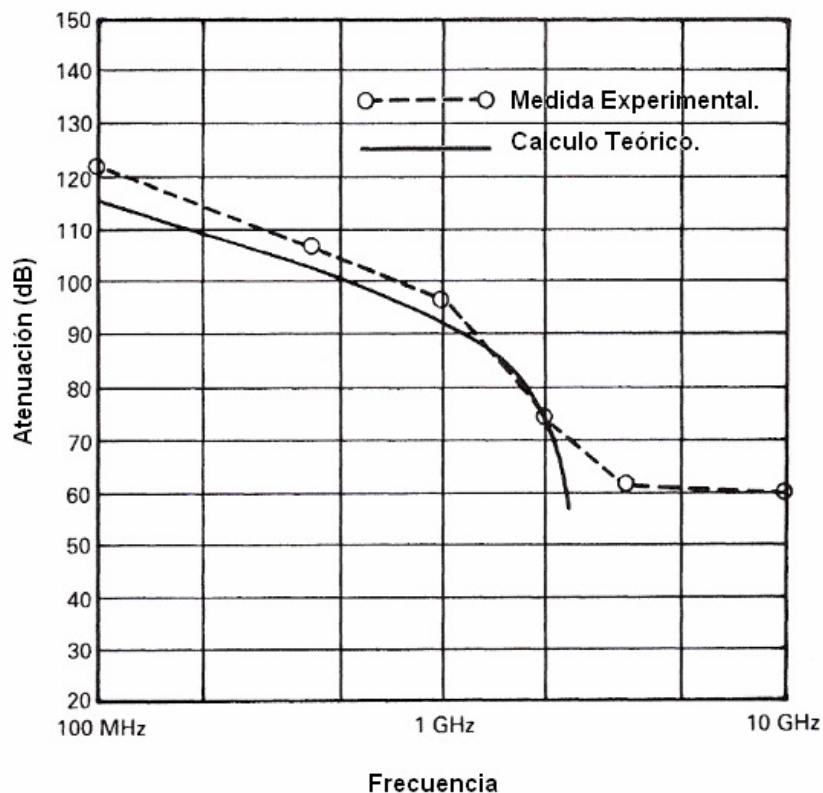


Figura 5.1: Comparación entre la atenuación de la junta tipo sándwich medida experimentalmente y la calculada en forma teórica en función de la frecuencia. El ancho de la junta empleada fue de 6 in y el espaciamiento entre tornillos consecutivos de 2.5 in [3].

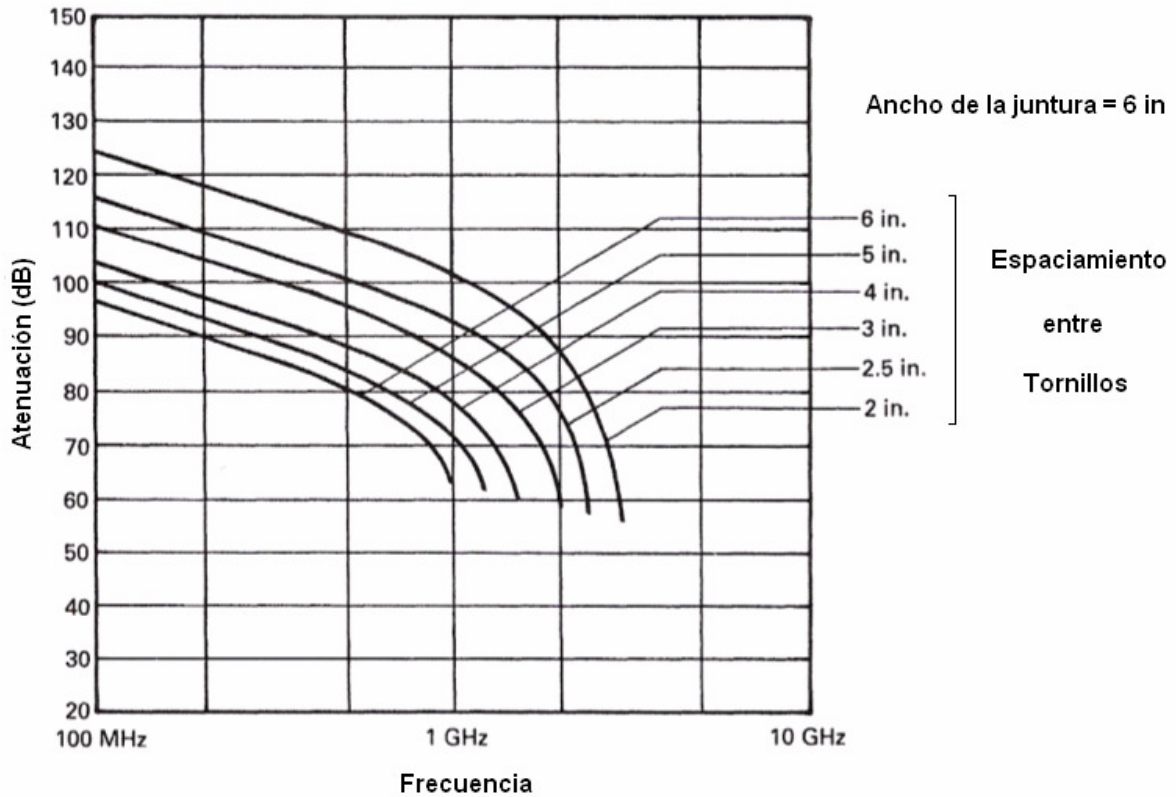


Figura 5.2: Gráfico del rendimiento de la junta tipo sándwich de ancho fijo 6in en función de la frecuencia para diversos espaciamientos de los tornillos - cálculo teórico [3].

Como es posible observar en las figuras 5.1 y 5.2, el sistema de juntas tipo sándwich proporciona un excelente rendimiento en cuanto a la atenuación de los campos electromagnéticos, obteniéndose resultados por sobre los 100dB para frecuencias inferiores a los 100MHz. Esto es atribuible al hecho que en las juntas de este tipo, el espesor del blindaje se triplica y las “tapas” de dicho sándwich ayudan considerablemente a evitar las filtraciones entre los acoplamientos de las placas, otorgando así mayor robustez al sistema y evitando con ello la aparición de algunas grietas por donde puedan filtrarse los campos magnéticos nocivos externos.

Precisamente a consecuencia de todo aquello - su fácil instalación, gran confiabilidad y alto rendimiento - se ha decidido utilizar el sistema de juntas tipo sándwich en el blindaje electromagnético de la Sala TEM. Para ello es necesario saber, que la geometría de la junta se basa en una ecuación de carácter netamente empírico, entregada a continuación en la ecuación (5.1) [3]:

$$A = 156 - 10 \cdot \log(645 \cdot L \cdot S \cdot f_0^2) + 0.0046 \cdot \frac{W}{2} \cdot f_0 \cdot \sqrt{\left(\left(\frac{f_c}{f_0}\right)^2 - 1\right)} \quad (5.1)$$

En la cual³⁵:

- A Atenuación que alcanza la junta, en dB.
- L Longitud de la unión entre juntas, en pulgadas.
- S Orificio entre las placas de la junta, en pulgadas (generalmente 0.25”).
- f_0 Frecuencia de operación, en MHz.
- f_c Frecuencia de corte, en MHz (= 5900/g).
- W Ancho de la junta, en pulgadas.
- g Distancia entre pernos / tornillos consecutivos, en pulgadas.

El rendimiento estimado para una serie de casos en los cuales el espaciamiento de los tornillos consecutivos varía, es el ilustrado en la figura 5.2. En ella es posible apreciar que en todos los casos de espaciamientos de tornillos, a frecuencias superiores a 1GHz, el rendimiento de este tipo de juntas se reduce considerablemente, por lo cual es claro que para dichas frecuencias los sistemas de blindajes con juntas soldadas son los más adecuados. Por otra parte, también es un factor no menor el tener en consideración según la figura 5.2, que el rendimiento de la junta tipo sándwich mejora mientras menor sea el espaciamiento entre tornillos, lo cual implica una utilización considerablemente mayor de éstos a medida que se reduce dicho espaciamiento, lo que a su vez, eleva los costos asociados al blindaje y aumenta los tiempos de montaje de este último.

A continuación, en la tabla 5.1, se puede apreciar el cálculo desarrollado al ser aplicada la ecuación (5.1) para determinar la atenuación que efectivamente se logra obtener para juntas tipo sándwich, en las cuales el parámetro “W - ancho de la junta” ha sido variado desde 6in hasta 2in, con el fin de observar las diferencias en la atenuación obtenida.

³⁵ Como recomendación, dirigirse a la Figura 5.4 para observar con claridad los parámetros de la “Junta Tipo Sándwich”.

Espaciamiento entre Tornillos (in.)	Atenuación (dB) W = 6 in.	Atenuación (dB) W = 5 in.	Atenuación (dB) W = 4 in.	Atenuación (dB) W = 3 in.	Atenuación (dB) W = 2 in.
2,0	240,66	233,87	227,09	220,30	213,52
2,5	232,51	227,09	221,66	216,23	210,80
3,0	227,09	222,56	218,04	213,52	208,99
3,5	223,21	219,33	215,45	211,58	207,70
4,0	220,30	216,91	213,52	210,12	206,73
4,5	218,04	215,02	212,01	208,99	205,98
5,0	216,23	213,52	210,80	208,09	205,37
5,5	214,75	212,28	209,81	207,35	204,88
6,0	213,52	211,25	208,99	206,73	204,47
6,5	212,47	210,38	208,30	206,21	204,12
7,0	211,58	209,64	207,70	205,76	203,82
7,5	210,80	208,99	207,18	205,37	203,56
8,0	210,12	208,43	206,73	205,03	203,34
8,5	209,52	207,93	206,33	204,74	203,14
9,0	208,99	207,48	205,98	204,47	202,96
9,5	208,52	207,09	205,66	204,23	202,80
10,0	208,09	206,73	205,37	204,02	202,66

Tabla 5.1: Aplicación de la ecuación 5.1 para el cálculo de la atenuación alcanzada por juntas de anchos variables (parámetro “W”), a 50 Hz y con L = 100in.

Además, para complementar los conceptos, es de gran ayuda observar el gráfico descrito en la Figura 5.3, en el cual es posible apreciar de manera resumida los resultados obtenidos en la Tabla (5.1). Como consecuencia de un breve análisis de éste, se puede comentar que resulta notable la manera en que la atenuación brindada por la junta tipo sándwich se ve perjudicada al aumentar el espaciamiento entre tornillos consecutivos. A su vez, queda de manifiesto la forma en la cual disminuye la atenuación si el ancho de dicha junta se hace cada vez más pequeño.

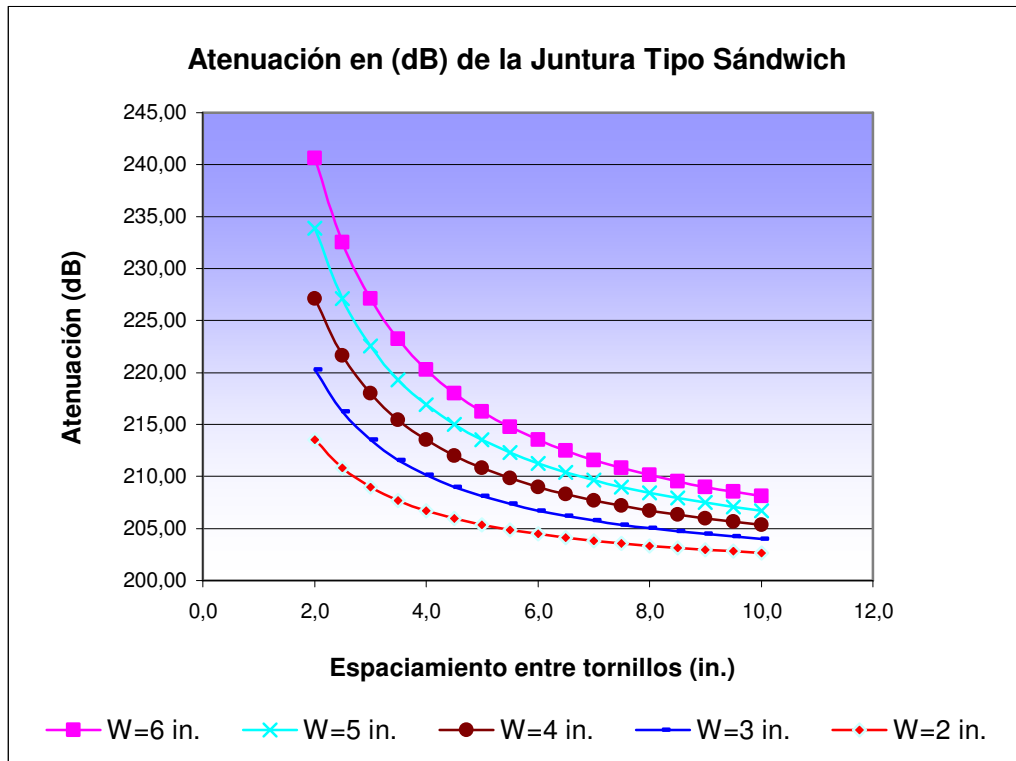


Figura 5.3: Atenuación en (dB) proporcionada por la Juntura Tipo Sándwich en función del espaciamento entre tornillos consecutivos, para cinco casos de anchos distintos (parámetro “W” variable) y una frecuencia de 50 Hz fija.

En consideración de todo lo expresado anteriormente, se ha decidido entonces diseñar las juntas tipo sándwich del blindaje electromagnético de la Sala TEM de un ancho de 6in, con un espaciamento entre tornillos de 2,5in para asegurar la eficiencia del blindaje en su totalidad, puesto que a mayor traslape de las placas y a menor espaciamento de los tornillos, se logra obtener un correcto acoplamiento “metal - metal” de todos los componentes del blindaje. Además como se aprecia en la figura 5.3, para una frecuencia de 50Hz la mayor variación en la atenuación entregada por la junta no se logra mediante el espaciamento entre tornillos, sino que mediante el aumento del ancho de la junta. Lo cual resulta lógico, puesto que el espesor de la junta en tal punto aumenta “al triple” del espesor de la lámina base original. Por otra parte, podemos notar que para una frecuencia de 50Hz la longitud de onda asociada es de aproximadamente 6.000km, en consecuencia de ello, la diferencia entre un espaciamento de 2in y 10in no resulta ser tan significativa, como sin embargo lo es para una frecuencia de 1GHz en donde la longitud de onda asociada es de 30cm. Por ello, se le atribuye un excelente rendimiento al método de juntas tipo sándwich para el caso de campos magnéticos de baja

frecuencia, a diferencia de lo que ocurre en blindajes con sistemas de juntas sujetas por abrazaderas. A continuación, en la figura 5.4, es posible observar en detalle un esquema de las juntas tipo sándwich diseñadas para realizar el acoplamiento entre las placas que componen el blindaje electromagnético de la Sala TEM, extracto del plano “Laboratorio 7.dwg” adjunto en el “Anexo E-1: Planos de diseño del blindaje electromagnético Sala TEM”.

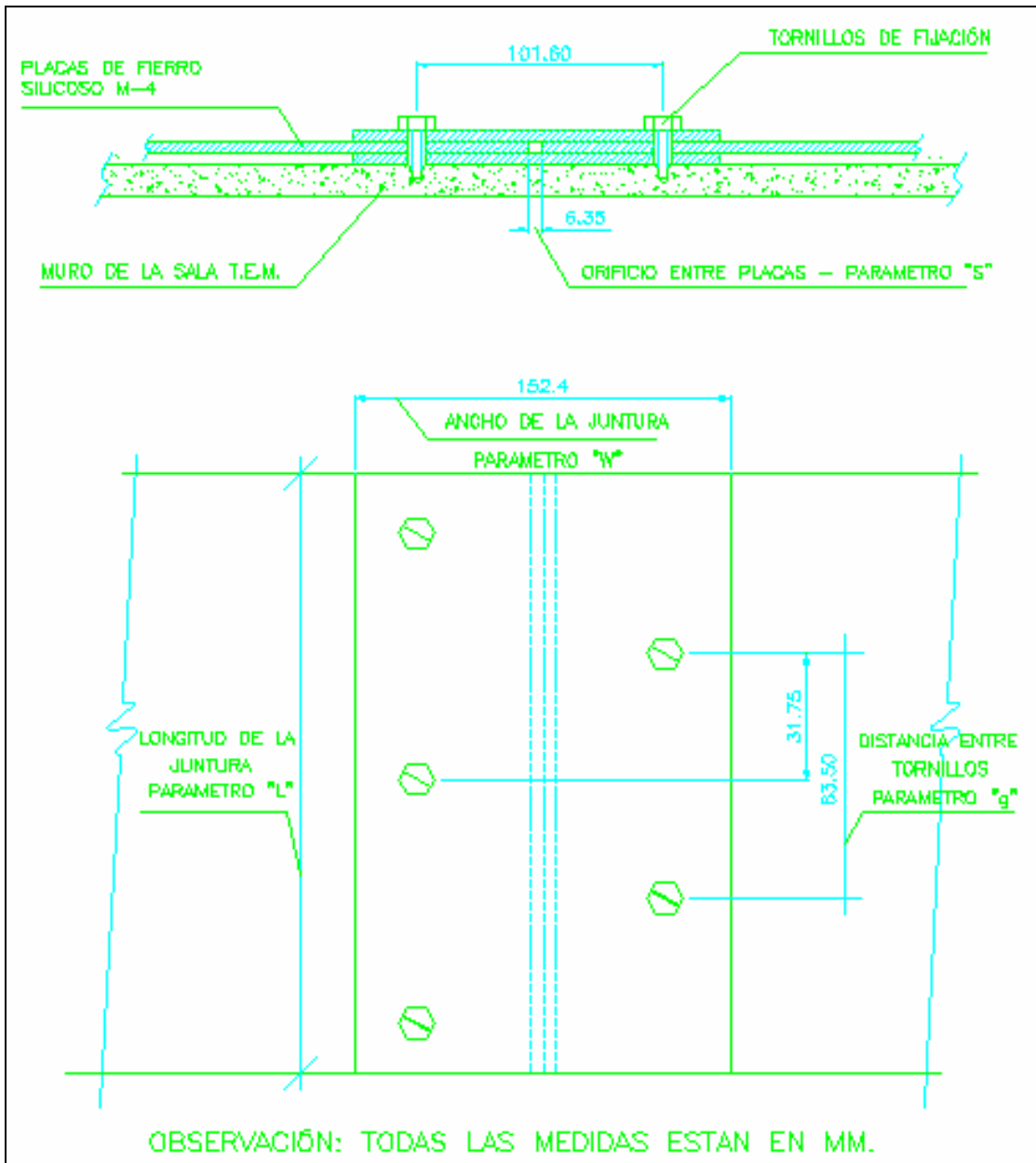


Figura 5.4: Detalle de las “Juntas Tipo Sándwich” diseñadas para el blindaje de la Sala TEM. Descripción de los parámetros de la junta – Vista frontal y corte transversal (medidas en mm).

Cabe señalar también, que no resulta ser económicamente óptimo intentar extender el rendimiento de los sistemas por sobre los 400MHz, mediante la utilización de un espaciamiento entre tornillos cada vez menor, puesto que en dichos casos se debe utilizar otros mecanismos de atenuación de la energía, producto del paso de las ondas planas a través de las juntas. Para dichos casos, un método económicamente viable es la utilización de sándwiches de materiales absorbentes especialmente diseñados para tales fines, como es el caso de la aleación “Cu- 49- Cu” la cual se indica en la Figura 5.5.

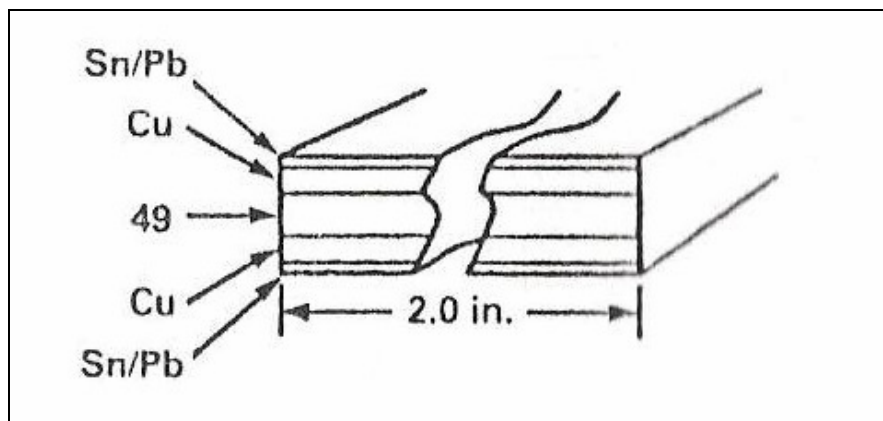


Figura 5.5: Sándwich de aleación “Cu- 49 - Cu” diseñada especialmente para absorber la energía y blindar muy altas frecuencias [3].

En la figura 5.5 anteriormente señalada, se observa en el centro del sándwich el número “49”, dicho número hace referencia a la aleación denominada “Super Alloy 49”, que es una aleación específica de Níquel y Hierro en la cual ha sido manipulada la estructura molecular de ésta, con el fin de aumentar sus propiedades magnéticas. Es así como numerosas salas alrededor del mundo han sido blindadas utilizando esta técnica, la cual excede los requerimientos típicos exigidos por la norma NSA 65 – 6 [17], [18].

Además, otra de las ventajas que poseen los blindajes arquitectónicos con juntas tipo sándwich es que resultan ser muy flexibles, es decir, se adaptan a las estructuras ya existentes y pueden sufrir muchas modificaciones, sin influir en su rendimiento, siendo compatible con otros elementos especiales de blindaje tales como: puertas, ventanas, ductos de ventilación, etc. Es justamente por tales características que resultan ser una alternativa tan atractiva de blindaje.

5.3 Procedimiento de Instalación.

El sistema de blindaje con juntas tipo sándwich fue diseñado pensando en obtener juntas lo más planas posible. Para poder lograr aquello, todas las superficies que componen el blindaje han de ser dispuestas muy cuidadosamente, y en las uniones existentes entre muro/suelo y muro/cielo, se deben instalar láminas dobladas en ángulos de 90° denominadas “esquinas preformadas biaxiales”, las cuales cumplen la finalidad de asegurar la efectividad del blindaje, evitando filtraciones y proporcionando juntas firmes, planas y que a su vez permitan un leve movimiento de la estructura. Es así como también para el caso específico en el cual convergen tres muros de un recinto o sala, formando con ello una esquina del blindaje arquitectónico, se deben tomar medidas de protección especiales para dicho punto crítico, como por ejemplo, el uso de esquinas preformadas de 3 ejes o “esquinas preformadas triaxiales”. A continuación se presentan ambos casos de esquinas preformadas en la Figura 5.6.

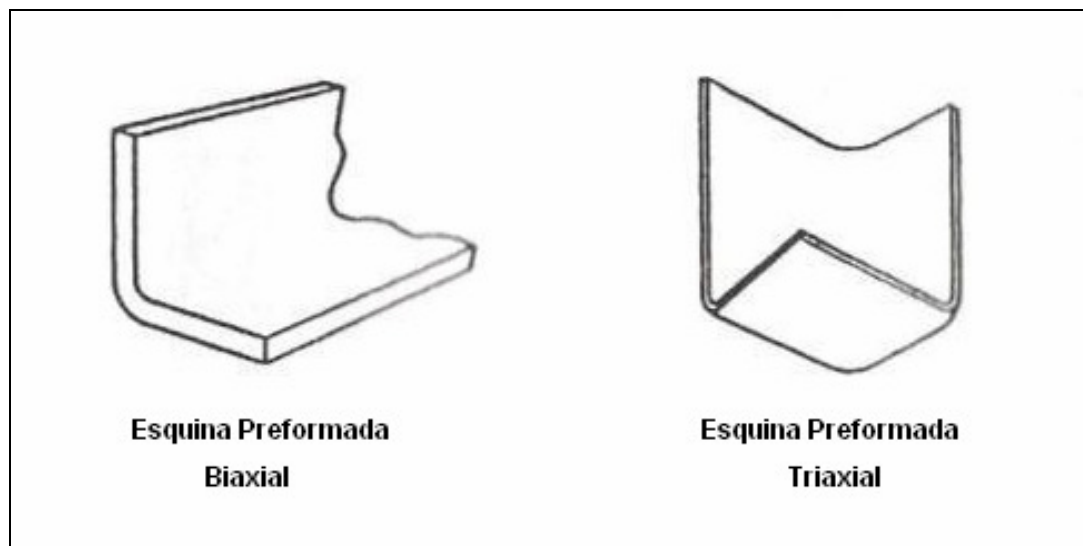


Figura 5.6: Ejemplo de esquinas preformadas biaxiales y triaxiales existentes en el mercado [3].

Además, en el caso de las esquinas preformadas triaxiales, puede existir la posibilidad de utilizar alguna de tipo “ensamblable”, que por cierto es de menor costo y rendimiento que aquella formada por una pieza única, pero que sin embargo brinda resultados igualmente satisfactorios para frecuencias bajo 1GHz.

Por ende, como para el caso de la Sala TEM la mayor preocupación es poder blindar las interferencias de frecuencia industrial, el uso de esquinas “ensamblables” es sin duda alguna la mejor alternativa a ser aplicada. Es por ello que a continuación, en la figura 5.7, se puede observar un extracto del plano “Laboratorio 8.dwg” adjunto en el “Anexo E-1: Planos de diseño del blindaje electromagnético Sala TEM”, en el cual se aprecia el diseño específico de las “Esquinas Preformadas Triaxiales Ensamblables” propuesto para poder permitir el correcto acoplamiento de las piezas del blindaje arquitectónico que convergen en las ocho esquinas de la Sala TEM.

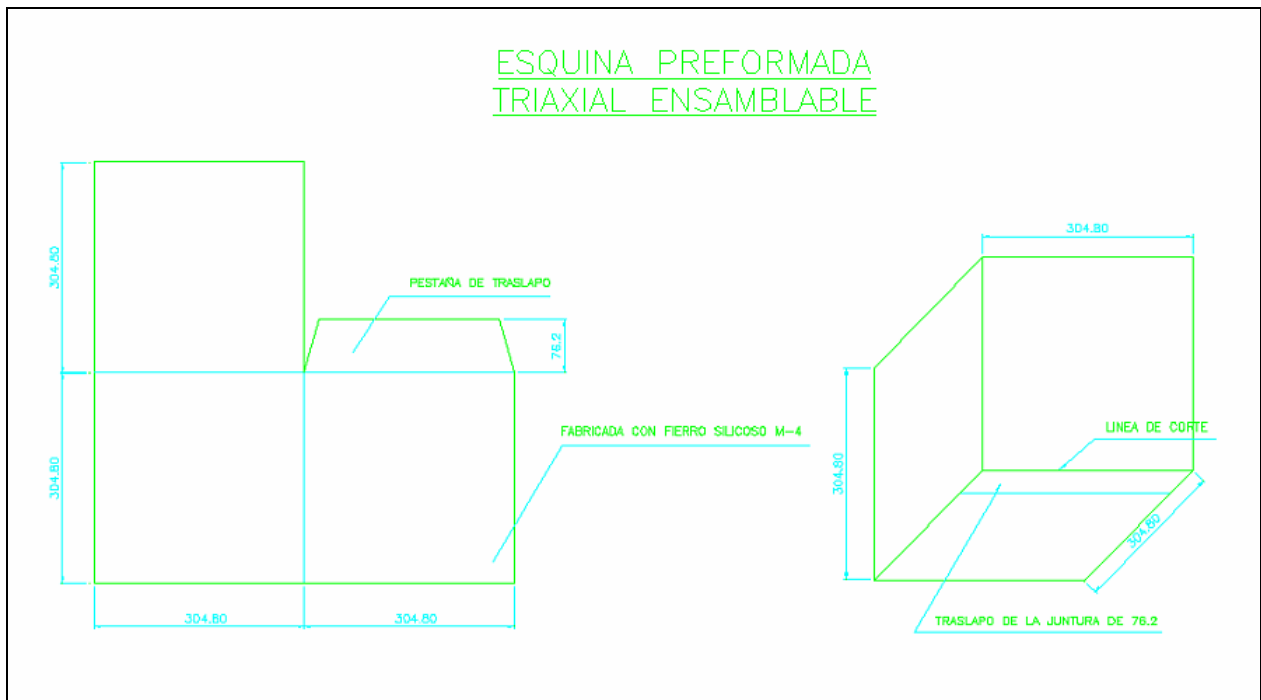


Figura 5.7: Diseño específico de las Esquinas Preformadas Triaxiales Ensamblables propuestas para realizar el blindaje arquitectónico de la Sala TEM (medidas en mm).

Como se puede observar en la figura 5.7, todas las esquinas prefabricadas de la Sala TEM se encuentran estandarizadas en sus dimensiones, con ello se busca forzar que todas las juntas se encuentren alejadas “a lo menos” 12in de las esquinas³⁶, es decir 304.80mm. Dicha distancia también se mantiene para el caso de las esquinas prefabricadas biaxiales, cuyo diseño es análogo al indicado en la figura 5.7, el cual es posible observar en el plano “Laboratorio 8.dwg” incluido en el “Anexo E-1” del presente documento.

³⁶ Para mayores detalles con respecto al procedimiento de instalación del blindaje electromagnético en la sala, ver plano “Laboratorio 6.dwg” adjunto en el “Anexo E-1: Planos de diseño del blindaje electromagnético Sala TEM”.

5.4 Control de las filtraciones de EMI por orificios en los blindajes.

Por lo general una habitación con sus seis paredes de algún tipo de material metálico homogéneo no resulta ser algo muy práctico. Comúnmente se deben hacer numerosos orificios en sus muros para lograr transformarla en una habitación apta para su uso. Esto último, ya que se deben instalar: puertas, ductos de calefacción y aire acondicionado, tuberías, alimentación eléctrica, líneas telefónicas, y otros numerosos servicios para poder habilitar correctamente tal habitación blindada. En la Figura 5.8 a continuación, es posible observar todo lo descrito anteriormente mediante una representación gráfica de las diversas aperturas existentes en un blindaje.

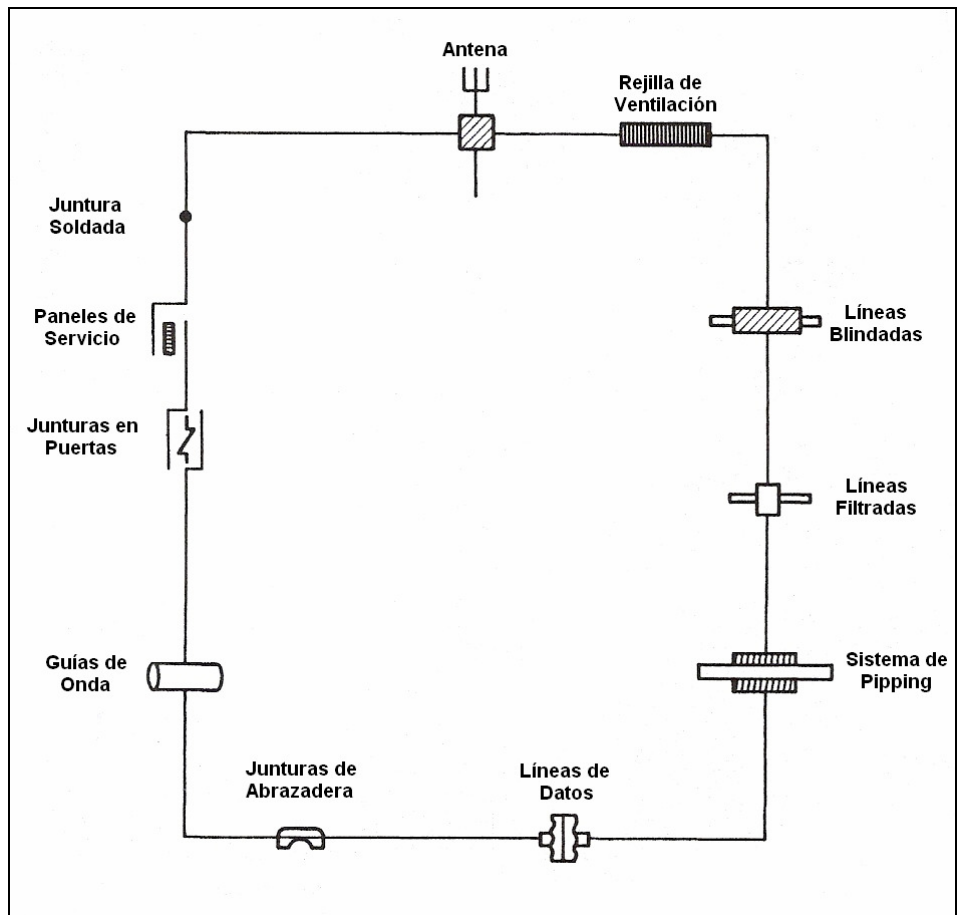


Figura 5.8: Tipos de orificios y formas en las cuales es posible penetrar al interior de un blindaje electromagnético [3].

Como se ha podido discutir a lo largo de la presente Tesis, existen dos métodos básicos para obtener efectividad en los blindajes realizados:

1. El primero es: "Proveer de una barrera continua del material indicado y del espesor adecuado".
2. El segundo: "Procurar que cualquier apertura existente en el blindaje, posea una sección transversal pequeña en comparación a la longitud de onda de la frecuencia de interés".

Lo anterior, permite notar que la degradación del blindaje puede ser ocasionada por causas entre las cuales figuran: quiebres en la continuidad del material con el cual se efectúa el blindaje (es decir, no se mantiene una homogeneidad), corrosión entre elementos acoplados y filtraciones de EMI a causa de un mal sello metal-metal de las juntas, entre otros. Sin embargo, cada uno de esos problemas se comportará de un modo diferente dependiendo del tipo de campo al cual se encuentra sometido, y a la frecuencia de operación de éste. Por ello, se debe considerar todos estos factores a la hora de diseñar y seleccionar las aperturas necesarias para habilitar correctamente el blindaje de la Sala TEM.

Además es importante señalar que en el caso de los blindajes de lámina simple es necesario tener en cuenta un cuidado adicional, producto que usualmente los materiales delgados como por ejemplo las láminas de Fierro Silicoso M-4, no son capaces de soportar físicamente aperturas como puertas o ventanas. Por ende, requieren del uso de marcos especiales los cuales soporten a su vez la estructura que conforma a la apertura respectiva. Dichos marcos especiales proveerán de un correcto acoplamiento entre las piezas del blindaje, facilitando el cierre del circuito eléctrico que engloba al sistema, gracias a que aseguran una junta de baja impedancia entre el blindaje propiamente tal y la apertura.

Como consecuencia de ello, a continuación se discutirán algunos criterios para lograr obtener un control efectivo de las filtraciones de EMI a través de las diversas aperturas y orificios que se encuentran presentes en el blindaje de la Sala TEM.

5.4.1 Puertas en el blindaje de la Sala TEM.

Las denominadas "Puertas de Radio Frecuencias Blindadas ó RF's Shielded Doors", son sin duda alguna el factor más relevante a considerar a la hora de diseñar un blindaje electromagnético, porque dentro de todos los elementos que componen dicho blindaje, representan el punto de enlace notoriamente más débil de todo el sistema y el elemento más difícil de mantener a consecuencia de su elevado nivel de utilización. Es por ello que se suele

decir que tales “Puertas RF” son dispositivos de precisión, y deben ser diseñadas y fabricadas para mantener sus funciones mecánicas y eléctricas, conservando de manera íntegra la efectividad del blindaje del recinto en el cual está siendo utilizada, considerando el caso de mayor demanda bajo la cual opera la instalación. Tal efectividad del blindaje puede conservarse a lo largo del tiempo si la estructura de la puerta y marco, son lo suficientemente fuertes como para mantener reducida la tolerancia necesaria para alcanzar el sello de RF alrededor de todo el perímetro de la apertura.

Es así como se han logrado desarrollar varias técnicas y métodos de diseño y construcción para este tipo de puertas, dependiendo de: las especificaciones del blindaje, el uso al cual se somete, tamaño de la puerta y al ambiente que la rodea. Lo importante en cada caso, es siempre mantener el sello “metal - metal” alrededor del perímetro de la apertura, el cual deberá ser mantenido para una infinidad de operaciones sin necesidad de requerir un mantenimiento correctivo. A continuación en las figuras 5.9, 5.10 y 5.11, se ilustran los tres tipos principales de “Puertas RF”, las cuales se utilizan dependiendo de los niveles de atenuación específica que el blindaje necesite.

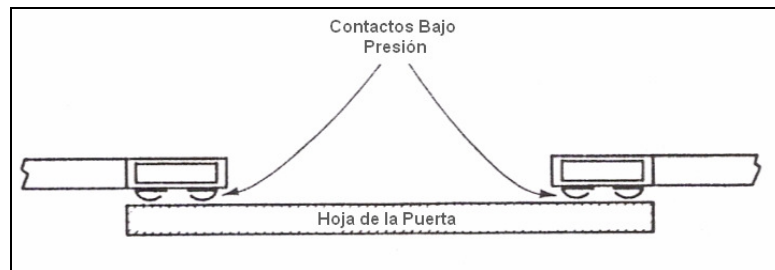


Figura 5.9: Puerta RF de contactos bajo presión [3].

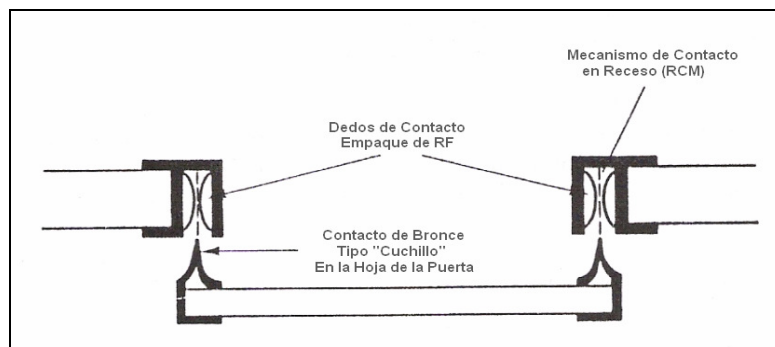


Figura 5.10: Puerta RF con contactos tipo “cuchillo”, denominada RCM [3].

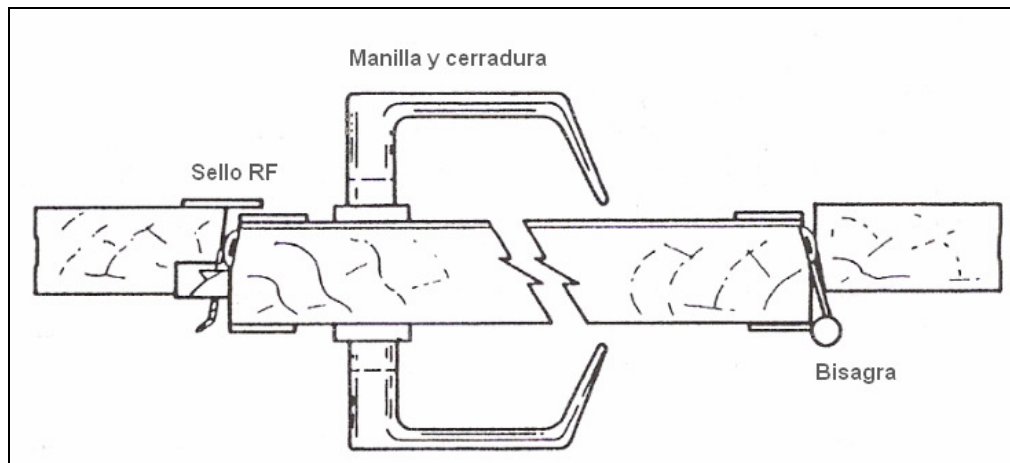


Figura 5.11: Puerta RF con sello tipo “cuña” [3].

El primer tipo de puerta (figura 5.9), se basa en la compresión de dos columnas de contactos entre el marco de la apertura y la hoja de la puerta, lo cual requiere de una enorme presión para lograr alcanzar el correcto sello RF, el cual se obtiene generalmente mediante el uso de un sistema de cierre compuesto por una cremallera y un piñón. Dicho piñón, al ser girado, proporciona la presión necesaria en tres puntos distintos del lado contrario de las bisagras de la puerta, permitiendo con ello alcanzar el sello RF. El segundo tipo de puerta (figura 5.10), es la denominada “Puerta RCM” o “Puerta con contactos tipo cuchillo”, la cual es en la actualidad la puerta RF más utilizada, a causa de su confiabilidad, fácil implementación y de su mantenimiento reducido y simple. Finalmente el tercer tipo de puerta (figura 5.11), es la “Puerta RF con sello tipo cuña”, la cual entre sus ventajas permite un pequeño umbral de tolerancia en el sello para cierto tipo de instalaciones.

Todas las configuraciones anteriormente descritas en las figuras 5.9, 5.10 y 5.11, cumplen con requerimientos electromagnéticos básicos, como por ejemplo, mantener un correcto contacto eléctrico entre metal y metal alrededor de todo el perímetro de la puerta, lo cual permite obtener una juntura de muy baja impedancia. Por ende, las distorsiones de las líneas de corrientes inducidas en los muros que constituyen la superficie del blindaje son mínimas, factor que sin duda resulta ser muy necesario para poder lograr una buena aislación magnética. Además se debe tener claro, que en ningún caso está permitida la presencia de espacios sin sello a través de la puerta o algún orificio en el marco de ella producto de la ausencia de alguno de los pernos encargados de dar sujeción a las bisagras de la puerta, ya que en dichos puntos es posible que la energía de señales de microondas pueda filtrarse.

Otro punto importante a considerar a la hora de efectuar el diseño del blindaje arquitectónico de cualquier recinto, es el de la “manilla y cerradura” de la puerta RF. Producto que el eje de la cerradura debe atravesar la hoja de la puerta, esta debe ser diseñada de tal manera que dicho eje sea aterrizado a la estructura de modo que no adquiera un comportamiento de antena, y a consecuencia de ello, degrade de sobremanera la efectividad esperada del blindaje. Sin embargo para el caso particular de la Sala TEM, para asegurar la efectividad del blindaje en su conjunto, se ha decidido instalar dos puertas RCM de “Doble Cuchillo”, las cuales no cuentan con manilla ni cerradura, pues tendrán un mecanismo de apertura y cierre automático el cual permitirá eliminar filtraciones a consecuencia del efecto antena que se produce en dicho punto particular.

Una de las dos puertas se encontrará en el acceso principal de la Sala TEM, la cual será muy solicitada diariamente y por ende fue estudiado el caso en el cual por olvido o descuido se deje completamente abierta cuando el TEM se encuentre operando. Sin embargo la otra, se encontrará en el acceso al cuarto de servicio y permanecerá prácticamente cerrada en forma permanente, puesto que a dicho cuarto sólo se deberá ingresar para mantener la limpieza y ejecutar algunas actividades de mantenimiento programado de los tableros eléctricos o algún otro componente del TEM³⁷.

Con ello se pretende disminuir al mínimo la degradación del blindaje electromagnético producto de dichas aperturas de tan gran envergadura, gracias al alto rendimiento que logran alcanzar este tipo de puertas, las cuales en general son utilizadas para blindajes de muy alto rendimiento, es decir, blindajes con un requerimiento de S.E. por sobre los 120dB.

Con todo lo expuesto anteriormente, se busca aumentar la confiabilidad del correcto sello “metal – metal” de todo el perímetro alrededor de la puerta, además de proveer de un sistema el cual posee mínimos desgastes naturales de sus componentes, gracias a que los contactos tipo cuchillo se encuentran montados de manera perpendicular a la hoja de la puerta, permitiendo un desplazamiento limpio y un acoplamiento suave entre los contactos móviles y los contactos fijos al marco de la puerta. Esto último se puede observar en la figura 5.12 siguiente, extracto del plano “Laboratorio 9.dwg” adjunto en el “Anexo E-1” del presente documento.

³⁷ Para ver en detalle la disposición de las puertas de la Sala TEM y de todos sus componentes, ver los planos adjuntos en el “Anexo E-1: Planos de diseño del blindaje electromagnético Sala TEM”, desde “Laboratorio 1.dwg” hasta el plano “Laboratorio 8.dwg”.

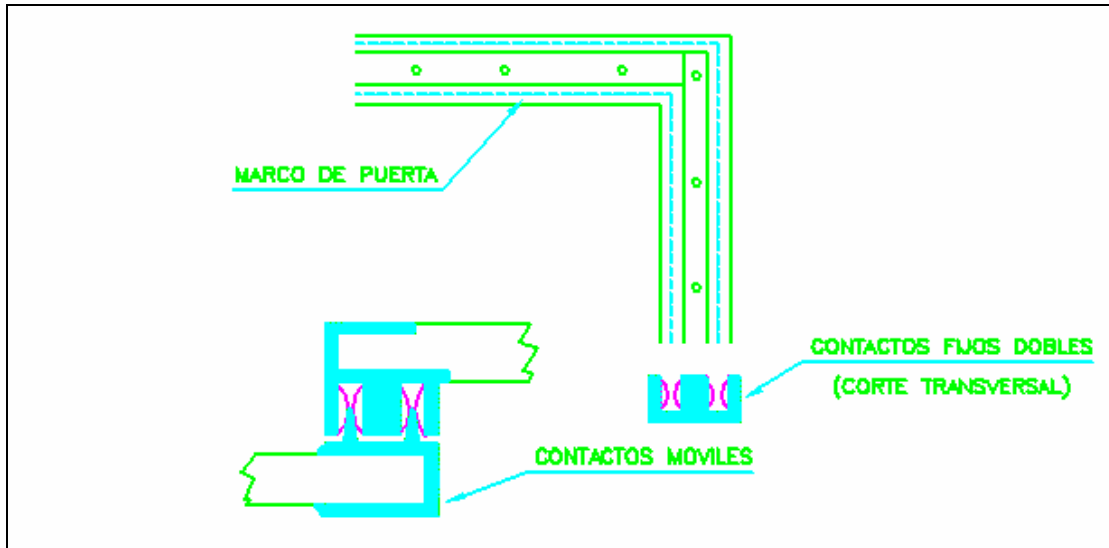


Figura 5.12: Detalle de los contactos de la Puertas RCM de Doble Cuchillo, diseñadas para el acceso principal de la Sala TEM y para el acceso al cuarto de servicio.

Por otra parte, es de importancia señalar que en la parte inferior de las puertas RF, el circuito se logra cerrar gracias a un práctico sistema desarrollado por numerosas empresas fabricantes de blindajes arquitectónicos, el cual consiste en dejar una pestaña conductora la cual se encarga de conectar la puerta con el piso del blindaje, en el momento en que se está efectuando el cierre de ella. Lo anterior se deja en evidencia, al observar la figura 5.13 entregada a continuación, también extraída del plano “Laboratorio 9.dwg”.

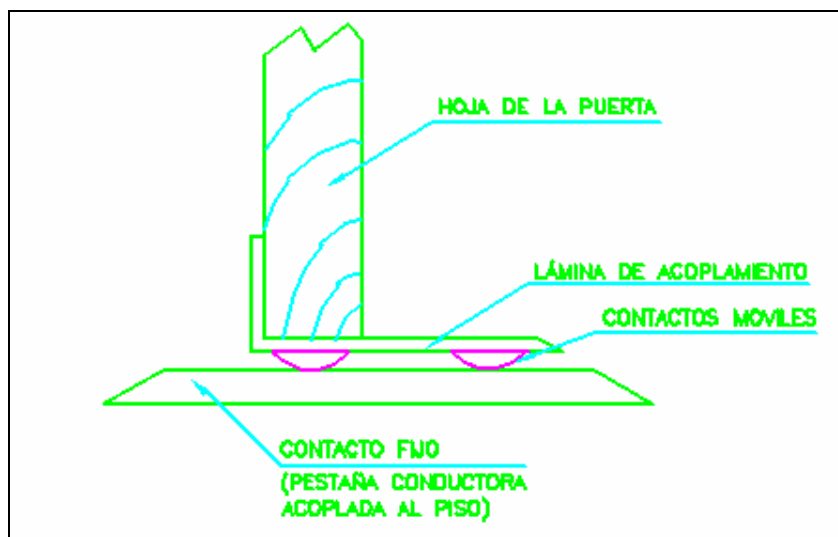


Figura 5.13: Mecanismo de acoplamiento entre la Puerta RF - RCM y el suelo del Blindaje.

Finalmente en la figura 5.14 entregada a continuación, se muestra una visión global de como quedarían las puertas instaladas en la Sala TEM. Dicha figura fue extraída también del plano adjunto “Laboratorio 9.dwg”.

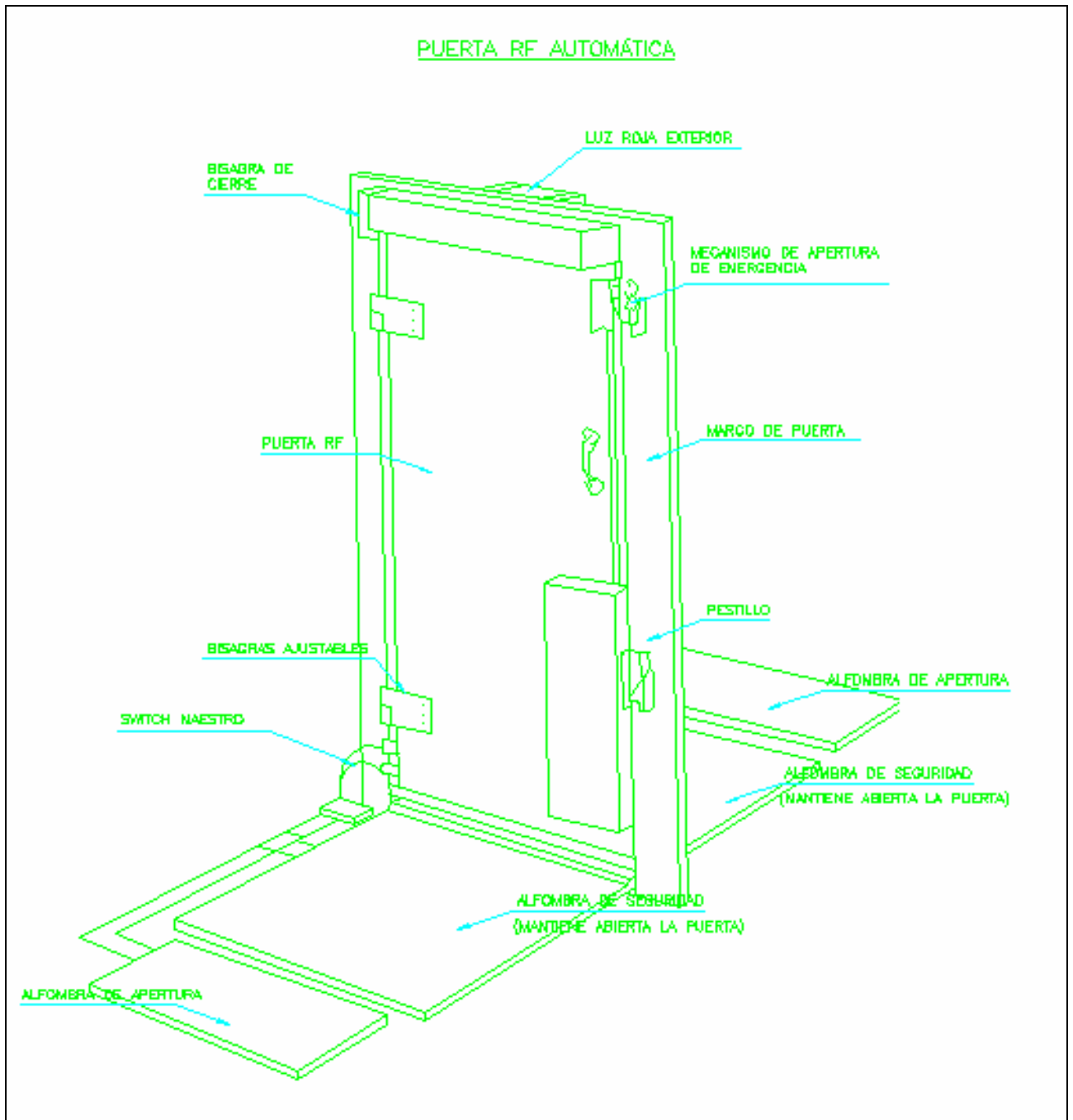


Figura 5.14: Vista global de las puertas “RCM – RF” automáticas proyectadas para el blindaje electromagnético de la Sala TEM.

5.4.2 Sistemas de aire acondicionado.

Otro factor de importancia que debe ser considerado, es la presencia de equipos de aire acondicionado y sus respectivos ductos, puesto que es una obligación mantener una correcta circulación de aire fresco al interior de cualquier recinto.

En particular para el caso de la Sala TEM, por requerimientos del fabricante, la sala no debe contar con ventanas que permitan el ingreso de: luz, ruidos, suciedad o humedad, que puedan interferir con el correcto funcionamiento del equipo. Sumado eso a que las puertas RF son herméticas, se hace imprescindible la existencia de un sistema de aire acondicionado.

En un comienzo, la Sala TEM contaba con su propio equipo de aire acondicionado, tal cual se puede observar en el pasado “Capítulo 4”, figura 4.15. Sin embargo, como también resulta claro observar en dicha figura, la interferencia electromagnética que introducen los equipos de aire acondicionado es demasiado alta como para conservar dicho equipo de aire acondicionado en el interior de la sala, por ende fue eliminado de ella. No obstante, como el Zócalo del Edificio de Geología cuenta con numerosos equipos de aire acondicionado, los cuales se encargan de climatizar diversas salas de dicho piso a través de una serie de circuitos de ductos de aire acondicionado, se decidió aprovechar tal recurso y ampliar el sistema, creando una nueva ramificación del circuito de ductos de aire acondicionado la cual suministrará aire fresco a la Sala TEM.

Como único cuidado a tener muy en consideración entonces, resulta el tener claro que dichos ductos de aire acondicionado funcionan como verdaderas guías de onda, por lo cual es de suma importancia (según lo recomendado por la MIL-HDBK-419A) aterrizar en forma esporádica tramos de ductos de aire acondicionado, de modo que la resistencia a tierra entre dos puntos consecutivos sea menor a 1Ω . Además en la acometida de dichos ductos a la Sala TEM, se debe asegurar el correcto acoplamiento entre el metal de los ductos y el Fierro Silicoso de Grano Orientado M-4, para ello, se emplearán celosías también de Fierro Silicoso M-4, las cuales se encargarán de mantener unidas ambas componentes, ayudando a conservar una junta de baja impedancia, conservando con ello el sello de RF.

A continuación en la figura 5.15, es posible observar la disposición propuesta para los ductos de aire acondicionado que se encargarán de dar solución al problema de la climatización de la Sala TEM, en la cual los ductos del lado Sur de la sala son los encargados de introducir aire fresco a

la sala, mientras que los que se encuentran instalados en el muro Norte de la sala, son los encargados de retirar el aire. Con ello se mantiene una constante circulación de aire al interior de la sala, brindando las condiciones óptimas para poder trabajar en el microscopio electrónico de transmisión.

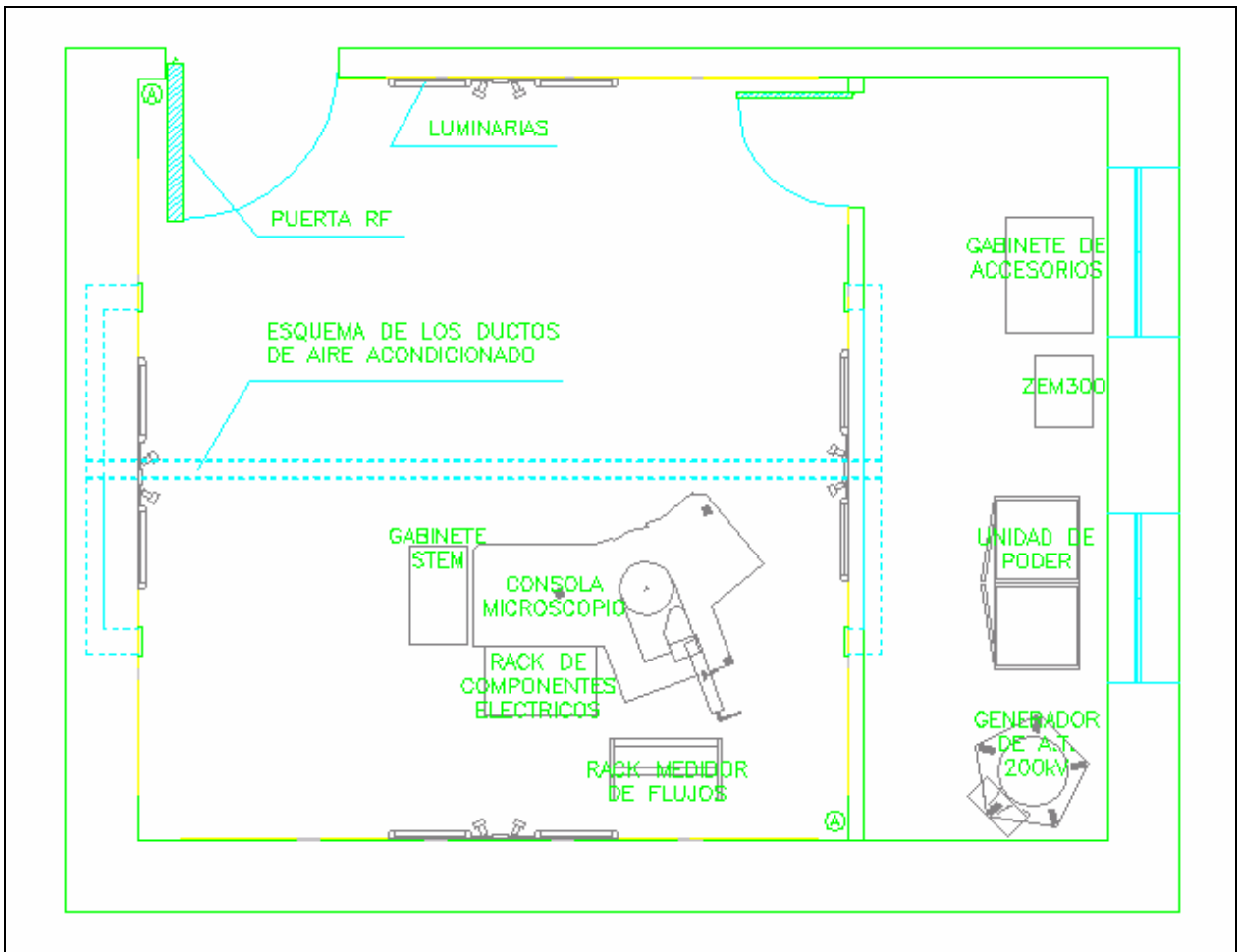


Figura 5.15: Vista de Planta de la Sala TEM – Disposición de ductos de aire acondicionado.

En la figura siguiente (figura 5.16), se presenta un corte transversal a la Sala TEM con el fin de poder apreciar la forma en la cual se verían las celosías en la acometida de los ductos a la sala. Cabe señalar también, que los ductos no quedarán visibles, puesto que como se aprecia en la figura 5.15, los ductos del lado Norte pasarán por el interior del muro de hormigón, mientras que los del lado Sur bajarán por el cuarto de servicio y atravesarán el muro de tabique, el cual se encuentra revestido en Fierro Silicoso M-4.

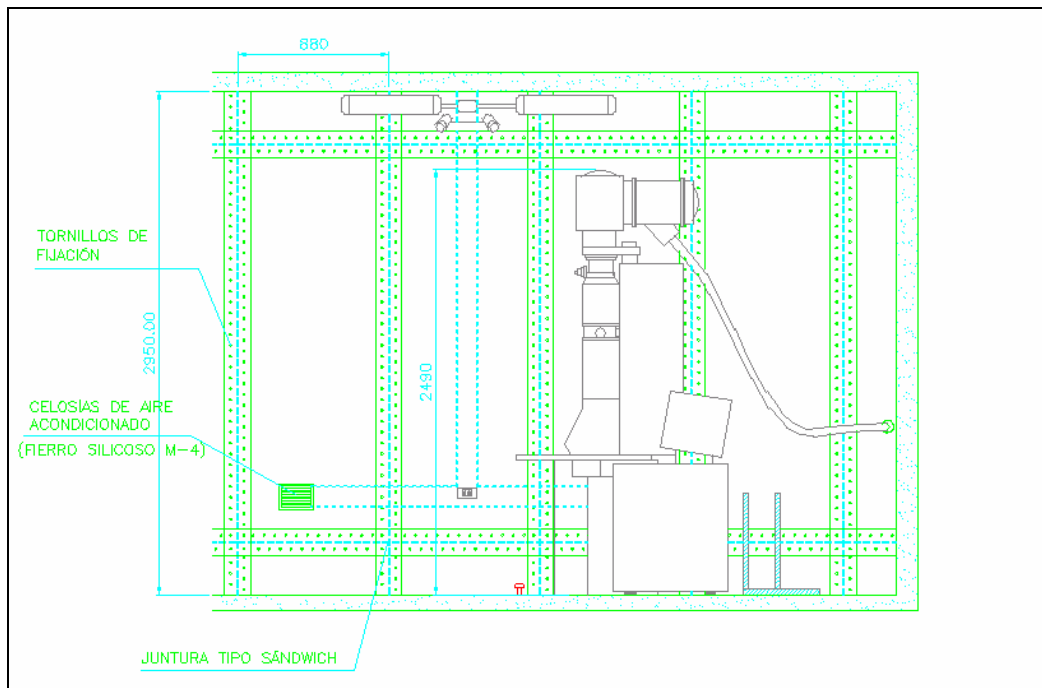


Figura 5.16: Corte transversal Sala TEM – Vista a las celosías y ductos proyectados para el sistema de aire acondicionado (muro de tabique revestido con Fierro Silicoso M-4, en mm).

De ser necesario contar con mayores detalles al respecto, como por ejemplo algunas medidas específicas, ver el plano “Laboratorio 6.dwg” adjunto en el “Anexo E-1” del presente documento, puesto que dichos planos se encuentran diseñados a escala, y las figuras extraídas y expuestas anteriormente son solo imágenes, las cuales no se encuentran a escala.

5.4.3 Circuitos de alumbrado y fuerza.

Luego de lo anterior, si los ductos de aire acondicionado actúan como guías de onda e introducen filtraciones de EMI al interior de la Sala TEM, es claro que se deberá poner un cuidado especial a la hora de proyectar la instalación de los circuitos de alumbrado y fuerza, los cuales representan una fuente puntual de generación de campos electromagnéticos.

Por otra parte, dicha generación de campos electromagnéticos será variable, pues dependerá de la carga a la cual se encuentre solicitado el sistema eléctrico en dicho momento. Por ende es posible encontrar en las especificaciones del TEM, que la operación de dicho equipo debe efectuarse solo manteniendo en funcionamiento el TEM, pues ha sido diseñado para desarrollar su funcionamiento normal en base a los consumos propios que determinan un cierto nivel base

de campos electromagnéticos, pero cualquier otro campo externo a causa de la sensibilidad del microscopio, podría acoplarse con éste en forma perjudicial.

Por ende, y en conocimiento de todos estos factores, se procedió a buscar un método con el cual se pudiese blindar también no solo la Sala TEM, sino que también su canalización de cables de alumbrado y fuerza. Con ello se estaría ayudando a que el blindaje de la Sala TEM pudiese conservar su efectividad, siendo degradado en forma mínima, a consecuencia del paso de los ductos desde el exterior del blindaje al interior de la Sala TEM.

Fue así como se procedió a desarrollar diversas pruebas experimentales en el Laboratorio de Alta Tensión de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, dentro de las cuales la más exitosa resulto ser: “Efectuar la canalización de los conductores eléctricos mediante cañerías de acero galvanizado”. Un resumen de dicha experiencia y de sus resultados encontrados, se entregan en el “Anexo E-2”, mientras que el resultado de mayor importancia se presenta a continuación en la Figura 5.17.

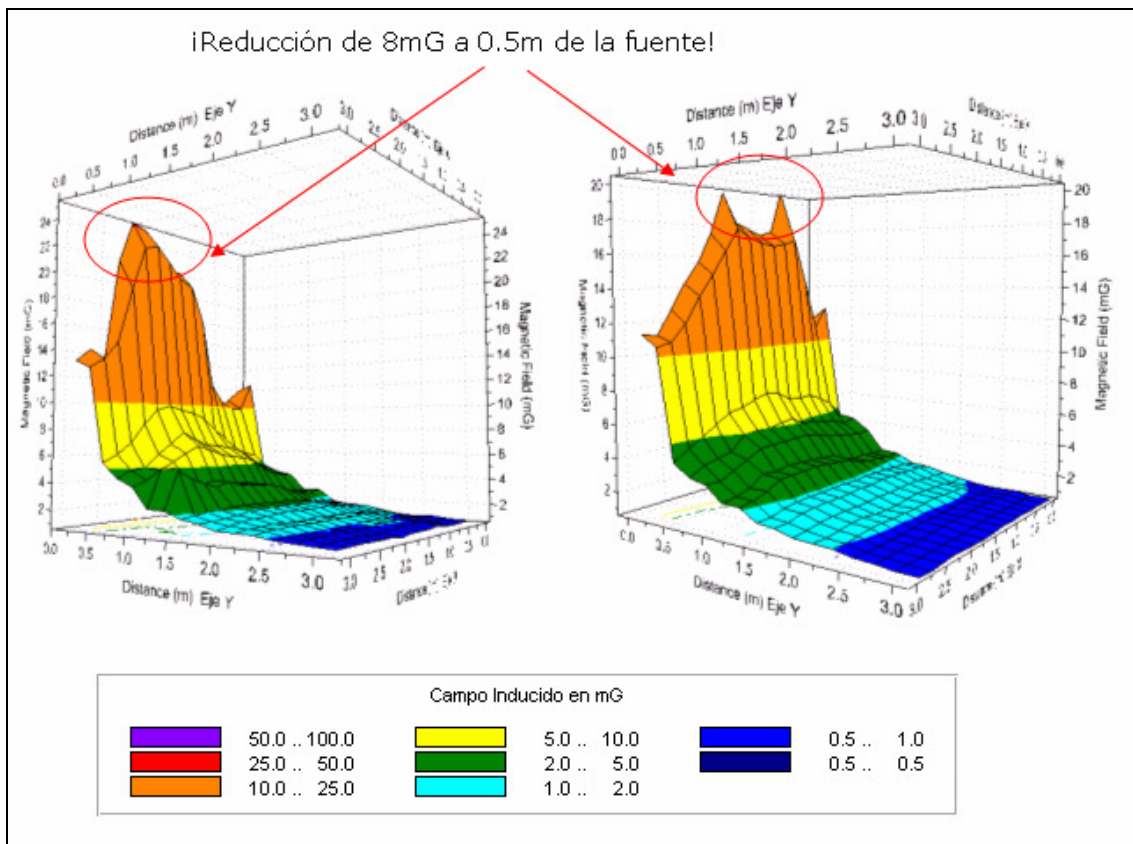


Figura 5.17: Comparación entre la medida del campo inducido alrededor de un conductor al aire libre y al interior de una CAG con sus 2 extremos a tierra.

Como se puede observar en la figura 5.16, la reducción del campo magnético que se logra obtener para el caso del conductor que se encuentra al interior de la cañería de acero galvanizado aterrizada en sus dos extremos en comparación con el caso del conductor al aire libre, es de 8mG a una distancia de 0.5m del conductor, lo cual es una reducción del campo magnético bastante considerable.

Por lo tanto, se recomienda efectuar toda la canalización de los conductores de alumbrado y fuerza de la Sala TEM mediante el uso de cañerías de acero galvanizado, procurando que la acometida de dicha canalización al blindaje de la Sala TEM, sea llevada a cabo con sumo cuidado, evitando hacer la menor cantidad de perforaciones necesarias al blindaje de la Sala TEM, procurando a su vez mantener la continuidad entre la unión “metal- metal” de ambos componentes. Para ello, en la figura 5.18 se describe como se debe realizar el paso de la cañería de acero galvanizada al interior del blindaje³⁸.

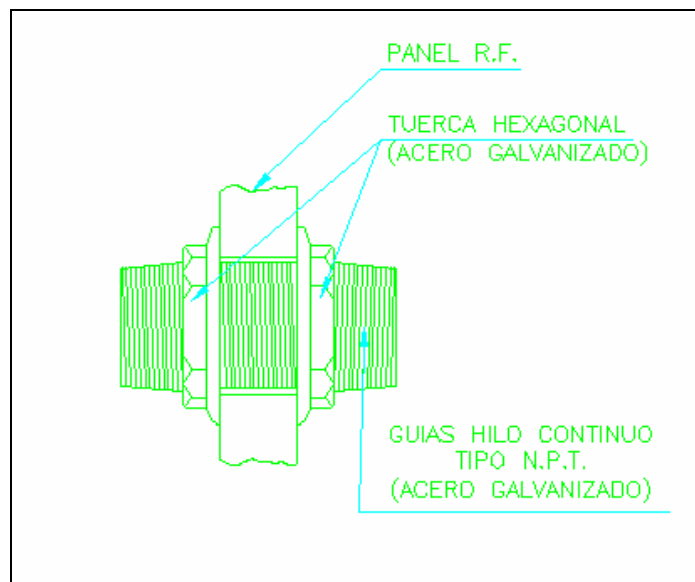


Figura 5.18: Esquema de acoplamiento entre canalización de CAG y el blindaje de la Sala TEM.

Teniendo en cuenta todos estos puntos, la realización del blindaje electromagnético de la Sala TEM, no debería presentar una degradación en la efectividad del blindaje estimada en los capítulos anteriores con FEKO. Queda entonces de esta manera propuesto en detalle el blindaje electromagnético de la Sala TEM³⁹.

³⁸ Figura extraída del plano “Laboratorio 6.dwg”, adjunto en el “Anexo E-1”.

³⁹ Los planos con: el diseño del blindaje, la disposición de los equipos y el diagrama circuital eléctrico propuestos para la Sala TEM, se pueden encontrar en el “Anexo E-1” del presente trabajo de Tesis.

Capítulo 6: Discusión de los resultados.

Si se observa todo el trabajo que hasta ahora ha sido expuesto, es posible apreciar que se ha logrado obtener numerosos resultados a partir del desarrollo de cada una de las problemáticas planteadas al comienzo de la presente Tesis. Para poder clarificar mejor esto último, se presentan a continuación los aspectos más relevantes del trabajo expuesto mediante la discusión de dos grandes grupos de resultados:

1. Resultados específicos.
2. Resultados globales.

6.1 Resultados específicos.

6.1.1 Blindaje parcial de la Sala TEM.

Como se planteó al comienzo del trabajo de Tesis, la motivación principal fue lograr instalar en forma adecuada el microscopio electrónico de transmisión adquirido por el proyecto MECESUP “Red Nacional de Programas de Doctorado en Ciencias de Materiales” en la sala destinada para tal función, la cual se encuentra ubicada en el Zócalo del Edificio de Geología de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Con respecto a ello, es posible agregar que luego del estudio de las condiciones iniciales de la Sala TEM y de sus alrededores (Ver capítulo 4), se determinó que la mejor solución previa a un “Blindaje de tipo pasivo – físico”, fue la de realizar un “Blindaje de tipo generalizado”, el cual lograría atenuar en forma muy significativa los niveles de campo electromagnético que interferían con la Sala TEM, reduciendo por ende notablemente los costos a raíz de la disminución sustancial de la magnitud de los componentes que constituyen un posible blindaje de tales características, como por ejemplo: permite dimensionar el blindaje con un menor número de placas, o bien, con láminas de menor espesor.

Por lo tanto, según los resultados obtenidos específicamente en el punto 4.2.3, es claro observar que luego de la ejecución del blindaje generalizado, se logró reducir el campo magnético de la Sala TEM en 26.4dB, quedando en definitiva la Sala TEM con una “magnitud media” de la componente de campo magnético resultante de 0.78mG (Ver Tabla 4.6). Dicho resultado, permite instalar correctamente el microscopio electrónico de transmisión en la Sala

TEM, ya que el nivel de campo magnético máximo que permite el fabricante (FEI Company)⁴⁰ es de 0.76mG para la componente resultante del campo magnético, por lo cual una diferencia de 0.02mG es prácticamente nula y solo se puede ver reflejado su efecto, en el caso en que se utilice el microscopio en su máxima resolución, es decir, cuando se quiere lograr el nivel máximo de resolución posible en el modo de operación “S- TEM”⁴¹. Sin embargo, si se mantiene la condición de solo “Blindaje generalizado”, no se estaría dejando ningún margen de tolerancia ante posibles aumentos del campo electromagnético en las inmediaciones de la Sala TEM, consecuencia que puede ser observada también en la Tabla 4.6, en donde se señala en forma explícita un máximo de 0.98mG resultantes en la medida efectuada en tal ocasión, magnitud que podría ocasionar distorsiones en las imágenes obtenidas con el TEM en caso de estar utilizando máxima resolución. Justamente por tal motivo, luego de efectuado el “Blindaje generalizado”, se recomienda en la presente Tesis poder llevar a cabo el “Blindaje pasivo - físico”. Para ello se dejan muy claros todos los criterios de diseño y construcción, necesarios para la correcta implementación a futuro de dicho blindaje (Ver Capítulo 5 y sus planos de diseño, adjuntos en el “Anexo E-1”), el cual permitiría la utilización del modo “S-TEM” sin ninguna limitante, asegurando en un 100% la calidad de las imágenes y sus resultados obtenidos, pese a aumentos transitorios o permanentes en los niveles de campo electromagnético en las inmediaciones de las Sala TEM, puesto que como se observa en las figuras: 3.12, 3.13, 3.14, 3.15, 3.16, 3.17, 3.18 y 3.19, el blindaje mediante láminas de Fierro Silicoso de Grano Orientado M-4 provee de una efectividad del blindaje (S.E.) para el caso del campo eléctrico como para el caso del campo magnético, según lo descrito en la Tabla 6.1.

OBSERVACIONES	S.E. _E (dB)	S.E. _B (dB)
S.E. en el peor de los casos - Puerta abierta.	55.99	7.53
S.E. en el mejor de los casos - Puerta cerrada.	57.20	43.76

Tabla 6.1: Resumen de las S.E. obtenidas para el blindaje pasivo propuesto, en el peor y en el mejor de los escenarios posibles.

⁴⁰ Ver “Anexo A-1”.

⁴¹ Para mayor detalle, ver Glosario adjunto.

Los valores indicados en la Tabla 6.1, pueden ser traducidos como cotas referenciales para los niveles de aumento en la magnitud del campo magnético por sobre los 0.76mG que exige el fabricante del TEM para su correcta operación, lo cual se indica en la Tabla 6.2.

OBSERVACIONES	B max. permitido con blindaje (mG)	B max. Para el correcto funcionamiento del TEM (mG)	Posible aumento admisible de B (mG)
En el peor de los casos - Puerta abierta	1.81	0.76	1.05
En el mejor de los casos - Puerta cerrada	117.17	0.76	116.41

Tabla 6.2: Niveles de campo magnético máximo permitidos para la Sala TEM con blindaje, y margen posible de aumento en el nivel de campo magnético que soportaría la Sala TEM, en el peor y en el mejor escenario posible, de modo que el microscopio pueda funcionar correctamente en todos sus modos de operación.

Los resultados señalados en las tablas 6.1 y 6.2, permiten observar que existe un margen bastante amplio de aumento en el campo electromagnético permisible para que el TEM continúe operando en forma correcta (en caso de ser implementado a futuro el blindaje propuesto). Puesto que si el operador del microscopio es riguroso en el procedimiento de operación del equipo, nunca olvidará cerrar la puerta de la Sala TEM mientras trabaja, lo cual permitirá mantener el microscopio aislado de campos magnéticos de hasta 116mG por sobre el límite máximo permitido por el fabricante en condiciones normales.

Por otro lado, respondiendo a que el espíritu de la presente Tesis es a su vez poder validar de manera empírica todos los resultados obtenidos del análisis teórico y del modelamiento matemático computacional, se desarrollará a continuación una aproximación a lo que podría ser el blindaje electromagnético propuesto para la Sala TEM, intentando de esta forma poner en práctica los resultados obtenidos en el “Capítulo 4.3”, en donde se pudo determinar que la S.E._B empírica de una lámina de Fierro Silicoso M-4, es de aproximadamente 6.021dB (para el caso del campo magnético resultante. Ver figura 4.32). Todo ello, con el fin de poder obtener una “medición real” del nivel de campo magnético resultante de dicho blindaje de la Sala TEM, para luego poder compararla con los resultados obtenidos en forma teórica (los cuales han sido resumidos en la Tabla 6.1).

Para poder realizar dicha aproximación del blindaje propuesto, se procedió a blindar con láminas de Fierro Silicoso de Grano Orientado M-4 (sugeridas en el punto 3.2.2), todo el muro Norte de la Sala TEM⁴². La finalidad de ello, es poder medir el nivel de campo magnético que incide sobre dicho muro blindado e independientemente medir el nivel de campo magnético que penetra hacia el interior de la sala, una vez que se cuenta con ambas medidas, es posible observar si la efectividad del blindaje de dicho muro mediante las láminas de Fierro Silicoso M-4, es el esperado según los cálculos obtenidos con FEKO mediante las aplicación del MoM. La figura 6.1 muestra claramente como se procedió a blindar el muro Norte de la Sala TEM mediante láminas de Fierro Silicoso de Grano Orientado M-4⁴³.



Figura 6.1: Blindaje del muro Norte de la Sala TEM mediante láminas de Fierro Silicoso de Grano Orientado M-4. A) Vista frontal al muro Norte Sala TEM. B) Vista lateral de Poniente a Oriente. C) Vista lateral de Oriente a Poniente. D) Detalle del sistema de puesta a tierra y acoplamiento entre las placas mediante cinta autoadhesiva de aluminio.

⁴² Se escogió dicho muro, por ser en éste donde se observa la mayor filtración de EMI (Resultados de las Figuras 4.23 a la 4.30).

⁴³ Las láminas de Fierro Silicoso de Grano Orientado M-4 fueron donadas por la Empresa "Schaffner", gracias a la gestión realizada por Don Miguel Segura.

Como se puede inferir a partir de la figura 6.1, es claro que el resultado de la S.E._B que se logre determinar en el punto medio del blindaje del muro Norte de la Sala TEM, será aproximado al estimado en forma teórica mediante la simulación realizada con FEKO en el apartado 3.2.3, puesto que hacia las esquinas del blindaje o “fronteras del blindaje” comenzarán a existir efectos contaminantes de la medida, producto de las líneas de campo que tienden a rodear las láminas en las esquinas del blindaje. Es decir, si se utiliza el sistema de referencia indicado en la “Figura 6.1 - A”, el punto medio estaría alrededor de la posición indicada por el punto $(X,Y,Z) = (2.25\text{m}, 0\text{m}, 1.5\text{m})$. En dicho punto, será posible visualizar de forma aproximada el efecto del blindaje mediante una capa simple de Fierro Silicoso de Grano Orientado M-4. Sin embargo, es claro que dicho resultado será inferior al obtenido si se llegara a implementar el blindaje propuesto en el Capítulo 5, ya que para el caso de la figura 6.1, se utilizó un traslape de placas de alrededor de 15cm y el acoplamiento de la juntura se llevo a cabo mediante la unión de las placas a través de una cinta autoadhesiva de aluminio conductora, la cual permite un acoplamiento “metal- metal” de dicha juntura por un corto periodo de tiempo, que sin embargo es suficiente para poder realizar la medida experimental necesaria.

Cabe señalar también, que luego de la habilitación de la Sala TEM mediante el “Blindaje generalizado”, el TEM comenzó a ser instalado en dicha sala para su utilización docente. Por lo tanto, en el momento de efectuarse el blindaje del muro Norte de la Sala TEM descrito en la figura 6.1, dicho microscopio se encontraba completamente instalado e inclusive operando en forma regular, con la salvedad de no poder llegar a trabajar en la máxima resolución del modo “S-TEM” (100Mx – 0.14nm). En la figura 6.2 es posible apreciar al TEM ya estando operativo.



Figura 6.2: Fotografía del microscopio electrónico de transmisión, instalado y estando operativo en la Sala TEM.

De dicho modo, para poder efectuar el mapeo completo en “3D” de la magnitud del campo magnético resultante de la zona exterior del muro Norte de la Sala TEM, se procedió a realizar la medida de campo magnético con el EMDEX II siguiendo la estrategia de medida indicada en la Figura 6.3.

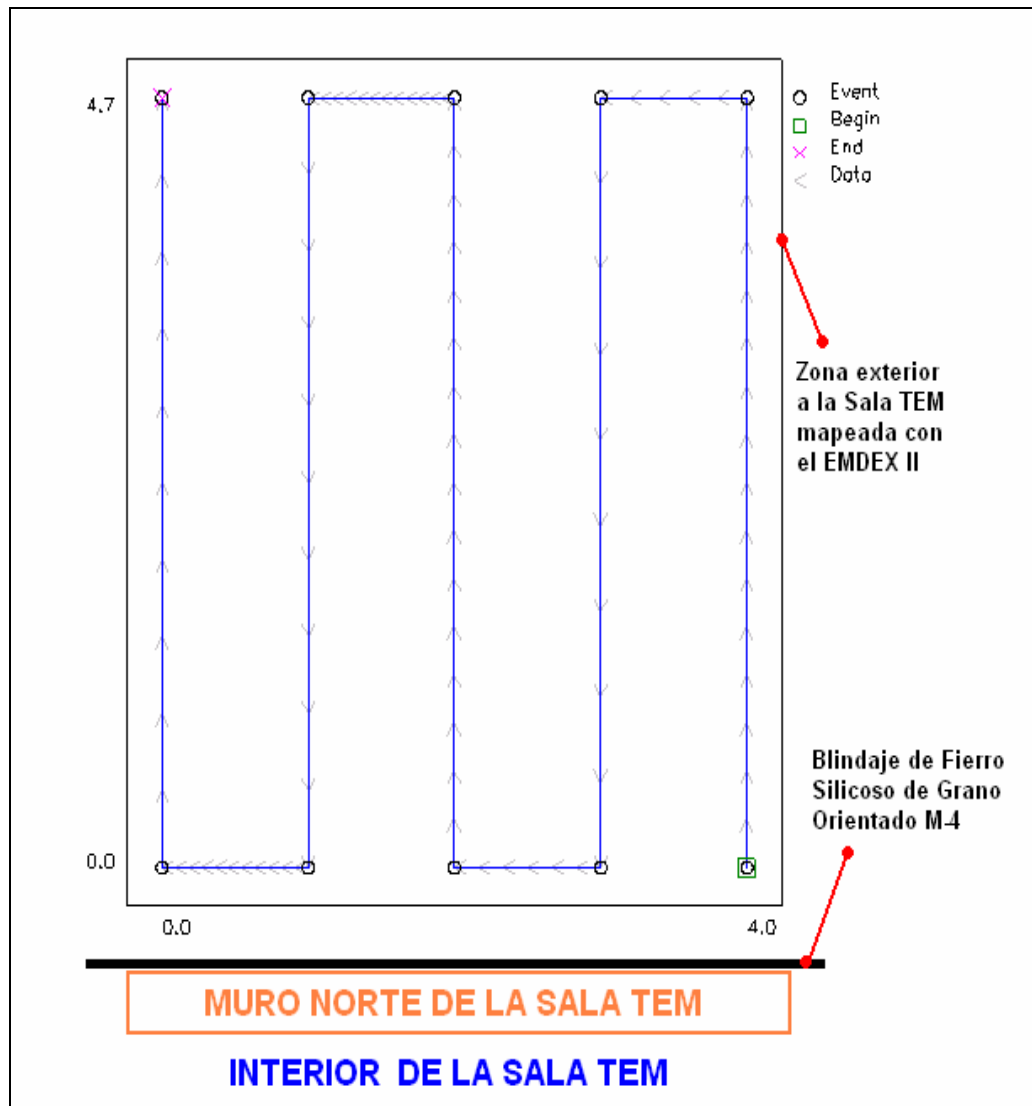


Figura 6.3: Estrategia de medida de la onda incidente sobre el muro Norte de la Sala TEM – EMDEX II a una altura de 1.5m del suelo.

Según dicha estrategia de medida, a continuación se entregan los resultados obtenidos para la medida del campo magnético de la onda que incide sobre el muro Norte de la Sala TEM, el cual se encuentra recubierto con el blindaje de Fierro Silicoso de Grano Orientado M-4 (ver figuras 6.4 y 6.5 a continuación).

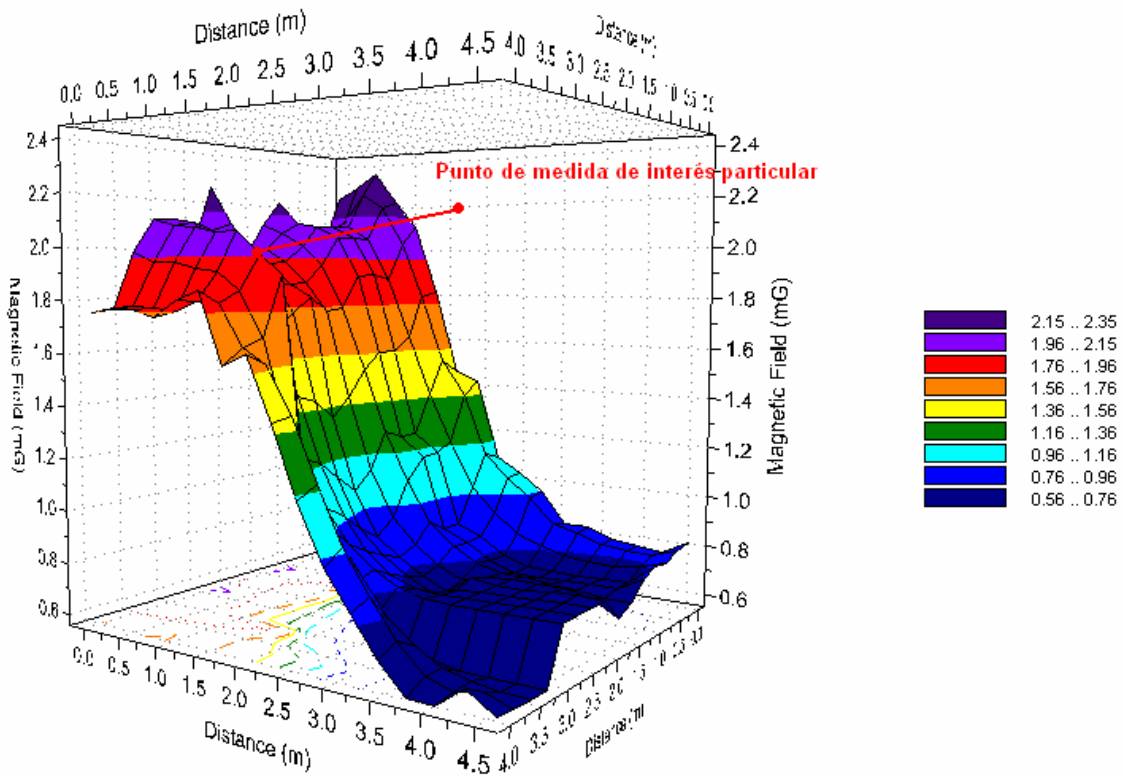


Figura 6.4: Intensidad de campo magnético resultante de la onda que incide sobre el blindaje del muro Norte de la Sala TEM.

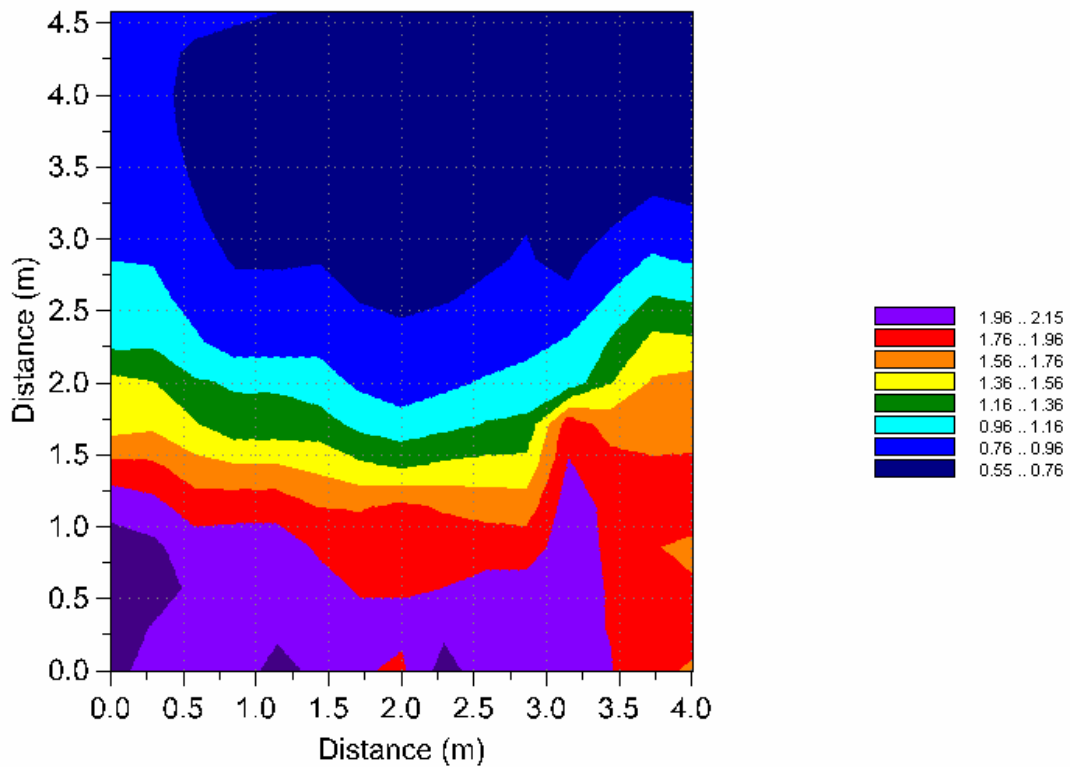


Figura 6.5: Curvas de Nivel - Intensidad de campo magnético resultante de la onda que incide sobre el blindaje del muro Norte de la Sala TEM.

Análogamente al caso anterior, pero en esta oportunidad para poder efectuar el mapeo completo en “3D” de la magnitud del campo magnético de la zona interior al muro Norte de la Sala TEM, se procedió a realizar la medida de campo magnético con el EMDEX II siguiendo la estrategia de medida indicada en la Figura 6.6, manteniendo el EMDEX II a una altura de 1.5m del suelo.



Figura 6.6: Estrategia de medida de la onda transmitida al interior del muro Norte de la Sala TEM, el cual ha sido blindado con Fierro Silicioso de Grano Orientado M-4.

Según la estrategia de medida señalada en la figura 6.6, los resultados obtenidos en la medición de la intensidad de campo magnético transmitido al interior de la Sala TEM, son los indicados en las Figuras 6.7 y 6.8.

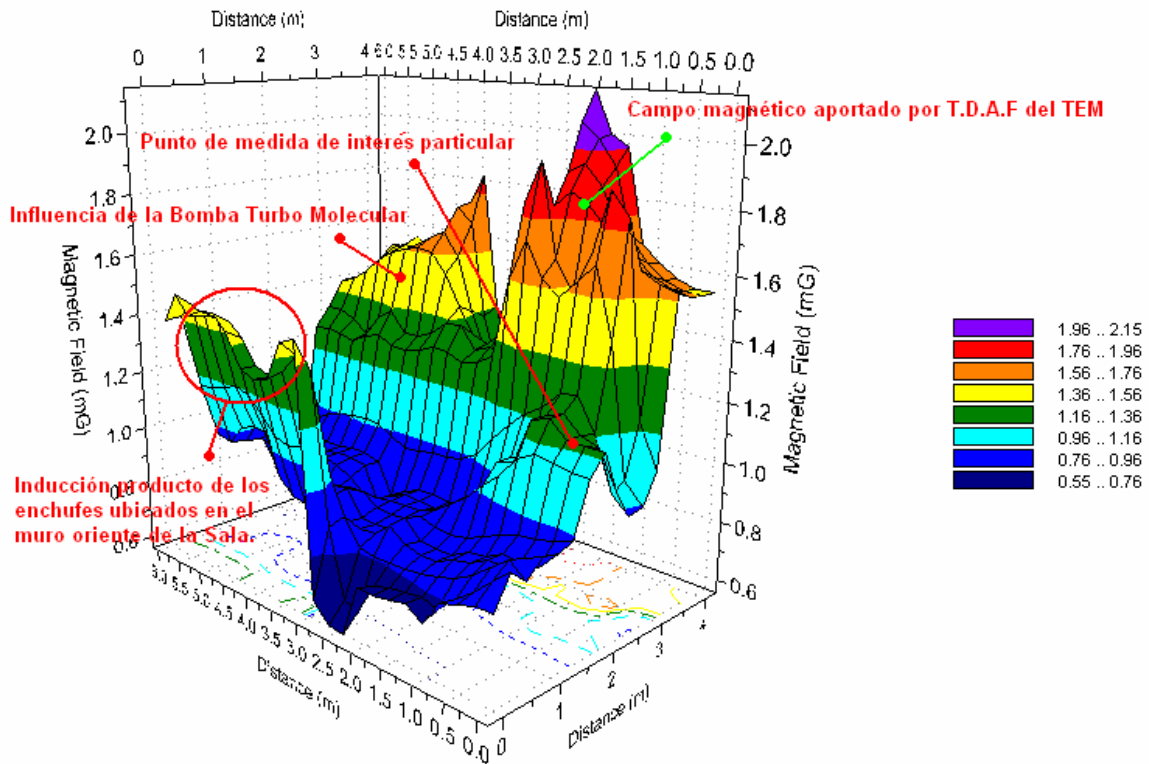


Figura 6.7: Intensidad de campo magnético resultante de la onda transmitida hacia el interior de la Sala TEM por el blindaje del muro Norte de la sala.

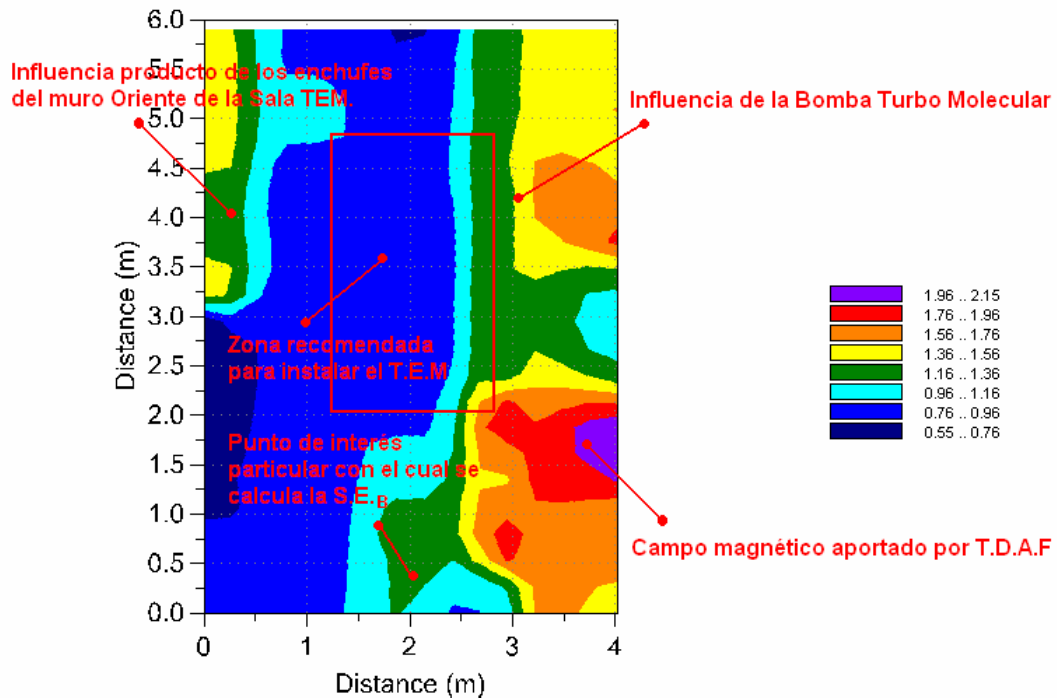


Figura 6.8: Curvas de Nivel - Intensidad de campo magnético resultante de la onda transmitida hacia el interior de la Sala TEM por el blindaje del muro Norte de la sala.

De los puntos indicados en las figuras 6.4 y 6.7, se desprende que la intensidad de campo magnético de la onda incidente es de alrededor de 2.1mG, mientras que la magnitud de la onda transmitida es de alrededor de 1.16mG respectivamente. Por lo tanto, la S.E._B aproximada para el blindaje del muro Norte de la Sala TEM, resulta ser de alrededor de los 5.16dB. Dicho resultado empírico resulta ser bastante grato, puesto que como se puede observar en la figura 6.1, el blindaje efectuado es solo una aproximación bastante gruesa del blindaje propuesto, el cual posee una S.E._B estimada en forma teórica mediante MoM de 7.53dB, lo cual implicaría una diferencia de tan solo 2.37dB, que es bastante pequeña si se considera que el experimento realizado considera solamente blindar con Fierro Silicoso “una” de las seis caras que constituyen las paredes de la Sala TEM.

Se debe considerar además, que al interior de la sala se encuentran instalados y operando todos los componentes y equipos propios del TEM, los cuales claramente son fuentes importantes de campo magnético al interior de la sala, según se puede observar en las figuras 6.7 y 6.8. No obstante, dichos niveles de campo magnético generado por los equipos propios del TEM han sido considerados por el fabricante, el cual garantiza la correcta operación del TEM, siempre y cuando se respeten las distancias mínimas establecidas por “FEI Company” entre tales equipos y la columna principal del TEM (ver figura 3.8). De esta forma, queda absolutamente claro que la S.E._B que se podría alcanzar con el blindaje electromagnético propuesto en los capítulos anteriores, deberá ser superior a los 5.16dB obtenidos en el experimento del blindaje del muro Norte de la Sala TEM.

Por otra parte, se sabe que un “Microscopio Electrónico de Transmisión - (TEM)” utiliza un haz de electrones para visualizar un objeto, debido a que la potencia amplificadora de un microscopio óptico está limitada por la longitud de onda de la luz visible. Lo característico de este microscopio es el uso de una muestra extremadamente fina, y que la imagen es obtenida a partir de los electrones que atraviesan la muestra. Entre sus principales componentes, es posible encontrar:

- Un cañón de electrones.
- Lentes magnéticas.
- Sistema de vacío.
- Placa fotográfica o pantalla fluorescente.
- Sistema de registro o PC.

Dichos componentes se observan de mejor forma en la “Figura 6.9”, en donde es posible observar las diferencias entre: un microscopio óptico (Figura 6.9 – (a)), uno electrónico de transmisión (Figura 6.9 – (b)) y uno de barrido (Figura 6.9 – (c)).

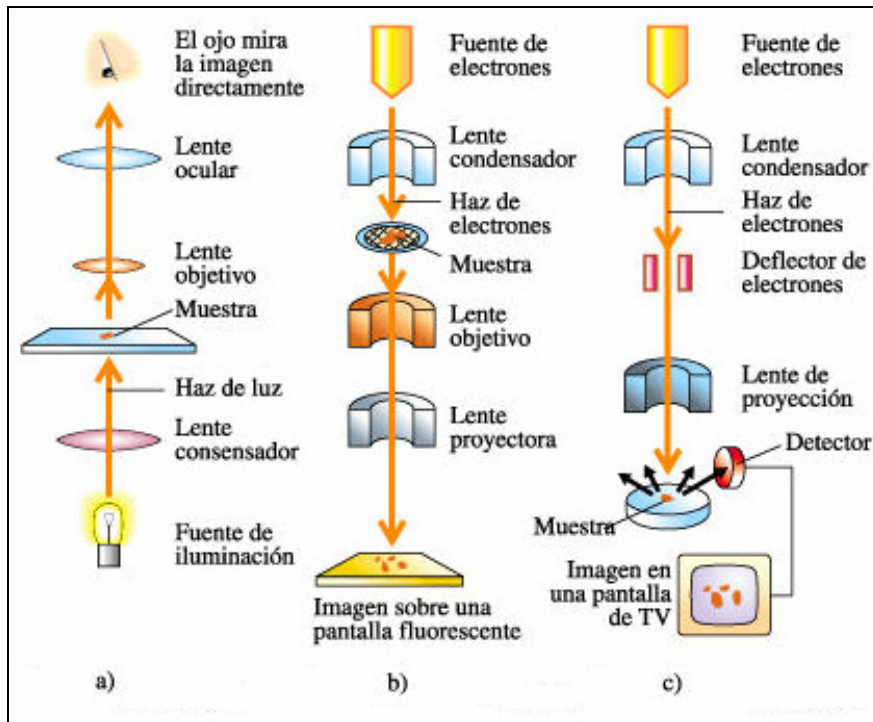


Figura 6.9: (a) Microscopio Óptico, (b) Microscopio Electrónico de Transmisión, (c) Microscopio Electrónico de Barrido [25].

Gracias a la ayuda de los microscopios electrónicos de transmisión, es posible observar incluso la estructura molecular que posee la muestra. Por tal motivo, la distorsión de la imagen a causa de la presencia de interferencias electromagnéticas puede ocasionar errores, como por ejemplo: a la hora de medir las distancias intermoleculares. A consecuencia de ello, el campo electromagnético en el entorno del TEM debe ser tan reducido como indique el fabricante, para no afectar la correcta operación de las lentes magnéticas.

Para complementar los buenos resultados obtenidos y clarificar el efecto que se podría obtener con la implementación completa del blindaje propuesto. A continuación se entrega una serie de fotografías de imágenes adquiridas con el TEM haciendo uso del modo S-TEM, en dos escenarios diferentes:

- En el primer escenario: las imágenes fueron adquiridas “sin” que el muro Norte de la Sala TEM haya sido blindado.
- En el segundo escenario: las imágenes fueron adquiridas “con” el blindaje del muro Norte de la Sala TEM implementado tal como se indica en la figura 6.1.

Los resultados obtenidos al capturar las imágenes mediante el microscopio electrónico de transmisión utilizando la modalidad de máxima resolución para ambos casos de análisis, resultan ser elocuentes con respecto al “efecto mitigador” que provee el blindaje mediante láminas de Fierro Silicoso de Grano Orientado M-4 a frecuencias industriales (Ver resultados en las figuras 6.10 – (a), (b), (c) y (d)). Puesto que, si se observa la figura 6.10 – (a), es posible apreciar como el campo electromagnético afecta a la imagen obtenida con el TEM en modo de máxima resolución, provocando una serie de líneas horizontales no deseadas en la imagen final, en comparación con la “misma imagen”, pero esta vez capturada utilizando el blindaje parcial del muro Norte de la Sala TEM (figura 6.10 – (c)). En esta última figura se observa que las líneas horizontales han desaparecido, obteniéndose en conclusión una imagen mucho más pura o limpia, de la muestra en cuestión.

Por otra parte, a modo de comprobación de lo anteriormente señalado, es claro que al realizar un acercamiento de la muestra, el problema de las líneas horizontales originadas en las imágenes producto de las interferencias electromagnéticas a las cuales se ve sometido el TEM, debe ser mayor. Por ende, en la figura 6.10 – (b), se ha realizado un “zoom” de la muestra de carbón grafitizado de la figura 6.10 – (a), en la cual efectivamente se observa una mayor influencia de las interferencias electromagnéticas sobre la imagen que finalmente se obtuvo, agudizándose mucho más las líneas que distorsionan la imagen.

Sin embargo, si se observa con detalle la figura 6.10 – (b) y se hace una comparación con la figura 6.10 – (d), es posible notar que ésta última “no presenta” distorsión a raíz de las interferencias electromagnéticas, producto que fue obtenida una vez realizado el blindaje parcial del muro Norte de la Sala TEM. Con ello queda claramente demostrado cual sería la influencia del blindaje electromagnético en el correcto funcionamiento del TEM.

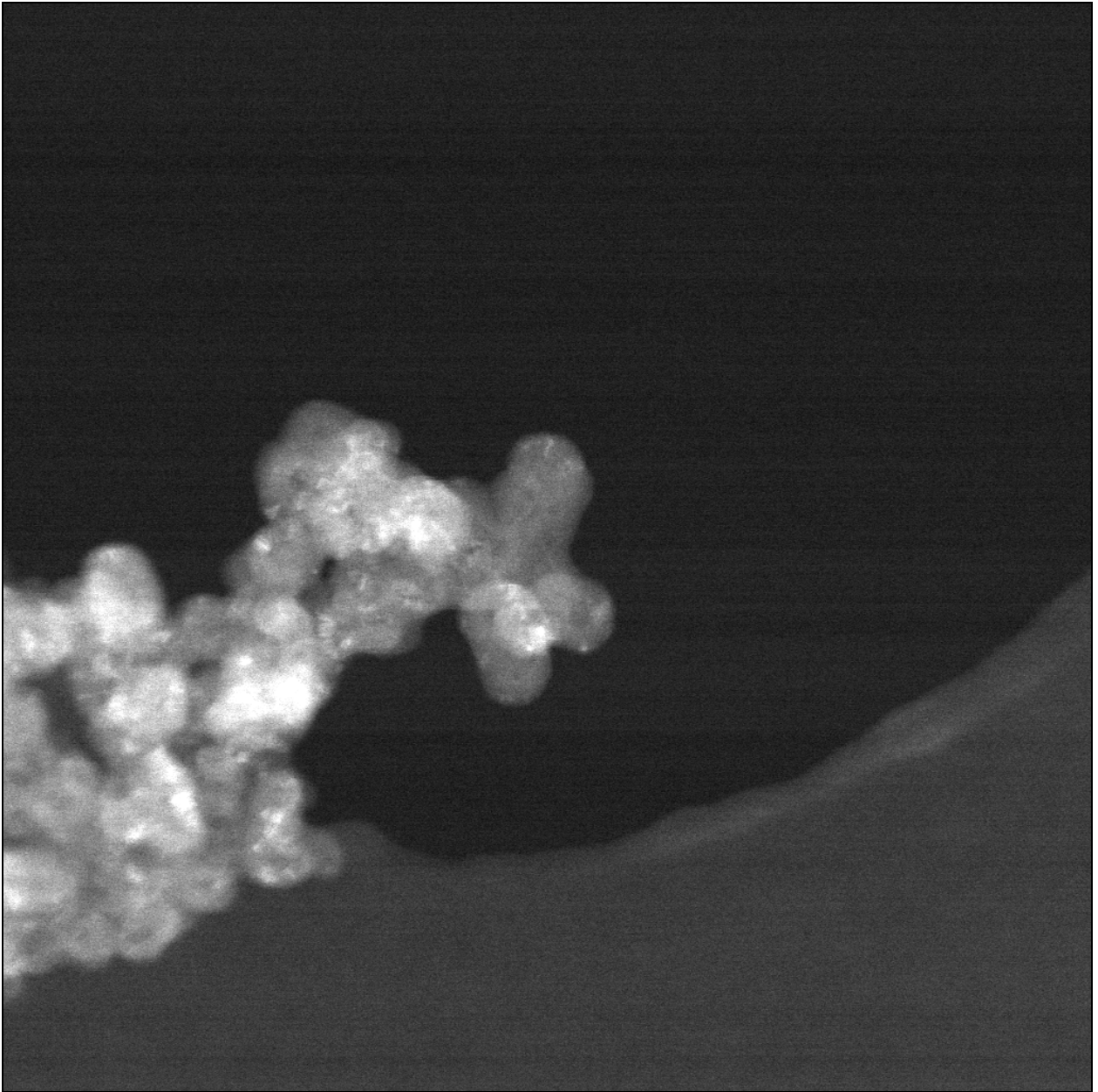


Figura 6.10 – (a): Muestra de Carbón grafitizado capturada en modo S-TEM con resolución de 225kX (Imagen capturada cuando el muro Norte de la Sala TEM se encontraba sin blindaje).

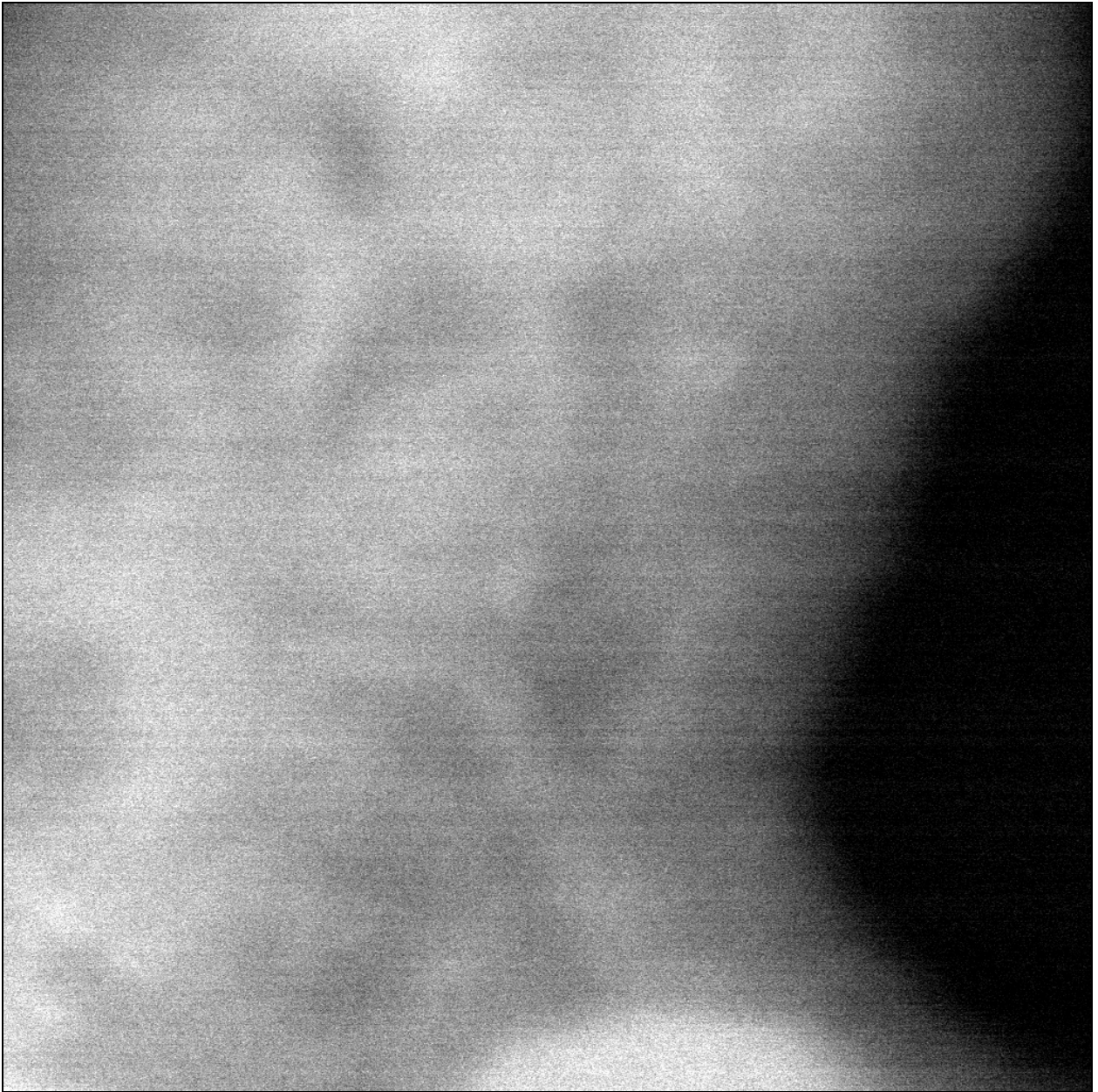


Figura 6.10 – (b): Zoom de la muestra de Carbón grafitizado anterior (Figura 6.10 – (a)), capturada en modo S-TEM con resolución de 25MX (Imagen capturada cuando el muro Norte de la Sala TEM se encontraba sin blindaje).

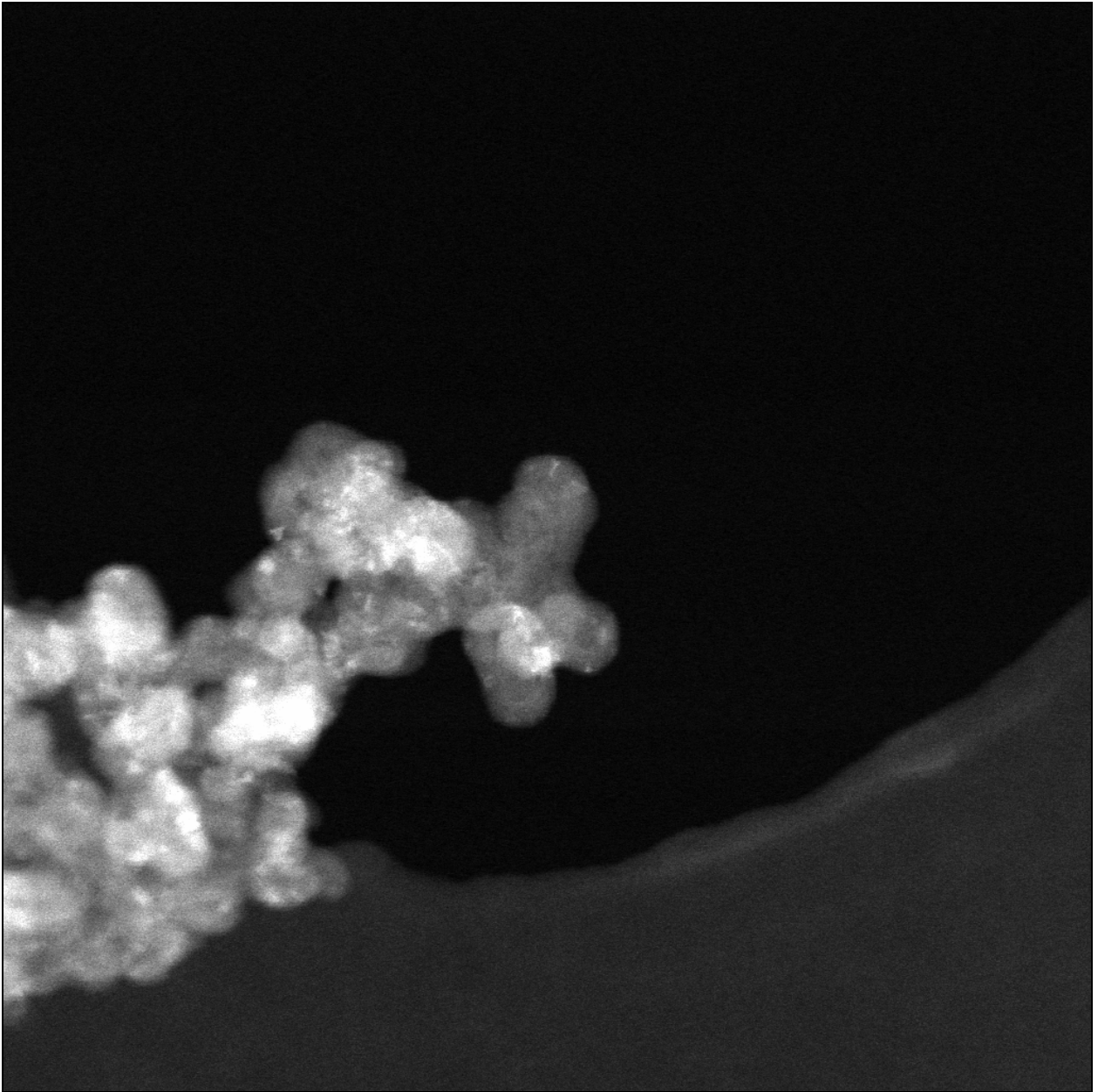


Figura 6.10 - (c): Muestra de Carbón grafitizado capturada en modo S-TEM con resolución de 225kX (Imagen capturada cuando el muro Norte de la Sala TEM se encontraba “con blindaje parcial”).

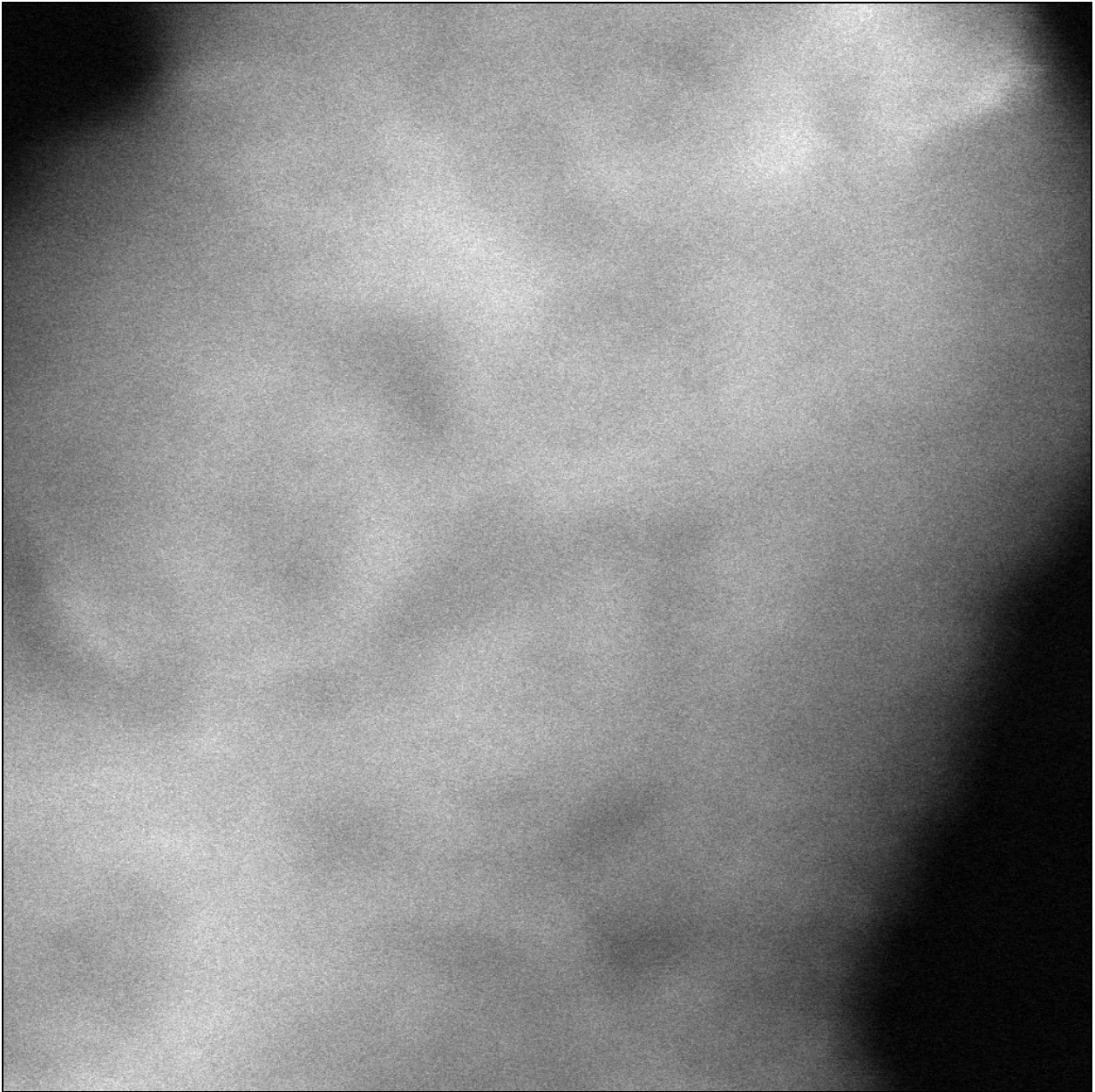


Figura 6.10 - (d): Zoom de la muestra de Carbón grafitizado anterior (Figura 6.10 - (c)) capturada en modo S-TEM con resolución de 25MX. Imagen capturada cuando el muro Norte de la Sala TEM se encontraba “con blindaje parcial”.

En virtud de la importancia de los resultados obtenidos anteriormente, nuevamente será mencionado que, al no existir un blindaje electromagnético en la Sala TEM, cuando el

microscopio se quiere utilizar en su modo de máxima resolución, las interferencias electromagnéticas “distorsionan la imagen obtenida” (aparecen líneas horizontales en las imágenes de la figura 6.10 – (a) y (b)). Sin embargo, cuando se blindo parcialmente la Sala TEM, los resultados de las imágenes obtenidas a “igual resolución” que para el primer escenario, se encuentran libres de interferencias electromagnéticas, lo cual queda de manifiesto en las figuras 6.10 – (c) y (d), imágenes de la muestra de carbón grafitizado sin la distorsión observada en las figuras 6.10 – (a) y (b). Con todo lo anteriormente señalado, queda de manifiesto que la principal inquietud de la presente Tesis ha sido resuelta a cabalidad.

6.1.2 Método de los Momentos y blindaje de capa múltiple.

En el capítulo tercero se ha presentado y desarrollado en detalle el denominado “Método de los Momentos – (MoM)”. Dicho método innovador, permite el cálculo de los campos electromagnéticos tanto externos como internos, para el caso de recintos rectangulares en los cuales existe presencia de agujeros también rectangulares en sus muros. Además de ello, pese a haber sido desarrollado hace varios años atrás, no es muy comúnmente utilizado o dicho de otra forma, no es muy popular (probablemente debido a su complejidad). Sin embargo, los buenos resultados obtenidos por Deshpande⁴⁴ y otros científicos como: Khan, Bunting y Rajamani, en el cálculo de problemas complejos en los cuales métodos como: FDTD, FEM, etc.⁴⁵ no son capaces de entregar resultados tan coherentes con la realidad, indican que el MoM será una herramienta de cálculo de campos electromagnéticos complejos, fundamental para el desarrollo de futuros programas computacionales especializados en el tema. Sin embargo, resulta muy importante saber que dicho método posee algunas consideraciones fundamentales, como por ejemplo [13]:

- En el caso de ondas incidentes en forma normal, el MoM resulta más efectivo si se utiliza para determinar la S.E. en caso que las aperturas rectangulares sean de menor tamaño que la dimensión de las paredes del recinto. Sin embargo, puede obtener resultados coherentes incluso si el tamaño de la apertura posee las dimensiones de una de sus paredes, siempre y cuando (para dicho caso particular), el blindaje del recinto sea de lámina simple.

⁴⁴ Creador del MoM aplicado al estudio de los campos electromagnéticos.

⁴⁵ Ver Glosario.

- Para el caso de ondas que incidan en forma oblicua sobre el blindaje electromagnético, el MoM puede determinar los resultados de la S.E. para un amplio espectro de ángulos, siempre y cuando éstos sean menores de 70° .

Tomando en cuenta la primera de las consideraciones anteriormente señaladas por Vignesh Rajamani [13], resulta evidente observar que para el caso del estudio particular de la presente Tesis, al trabajar con una onda plana que incide normalmente sobre el blindaje de Fierro Silicoso de Grano Orientado M-4 de la Sala TEM, es posible aplicar el MoM sin ningún problema o factor de corrección. Como resultado de todo ello, se ha logrado presentar a cabalidad el MoM y su campo de aplicación, entregando al lector todas las herramientas necesarias para poder “en el futuro” utilizar dicho modelamiento matemático en cualquier otro caso, distinto al estudiado al determinar el blindaje electromagnético de la Sala TEM.

Por otra parte, el mundo de hoy en día se encuentra cada vez más globalizado y existen cientos de herramientas computacionales disponibles en el mercado, las cuales integran numerosos métodos matemáticos para resolver todo tipo de problemas. Es por ello, y citando las palabras de Isaac Newton: “*Si he visto más lejos que otros, ha sido por estar parado sobre hombros de gigantes*”, que en esta oportunidad no se intentó programar una versión particular del MoM, sino que más bien se presentó una herramienta de cálculo que por sus potencialidades, es muy probable que en el mediano o corto plazo se vuelva un instrumento de uso habitual en el modelamiento de diversos problemas pertenecientes a la Ingeniería Eléctrica. Dicho software se denomina “FEKO”, y como se ha logrado apreciar en el desarrollo del modelamiento de la Sala TEM y el cálculo de su S.E., la amigable interfaz gráfica que provee permite desarrollar muy fácilmente problemas de alto nivel de complejidad.

Justamente haciendo uso de los atributos de FEKO, a continuación se presentarán los resultados del cálculo de la S.E._E y S.E._B para el caso de la Sala TEM cuando ésta se encuentra con su puerta principal abierta (Ver figura 3.10), para los casos en que el blindaje consta de:

- Dos capas de Fierro Silicoso de Grano Orientado M-4.
- Tres capas de Fierro Silicoso de Grano Orientado M-4.

Dichos resultados podrán enriquecer todavía más la discusión hasta ahora expuesta, permitiendo además obtener de ellos, más de alguna conclusión importante (Ver figuras: 6.11, 6.12, 6.13, 6.14, 6.15, 6.16, 6.17 y 6.18).

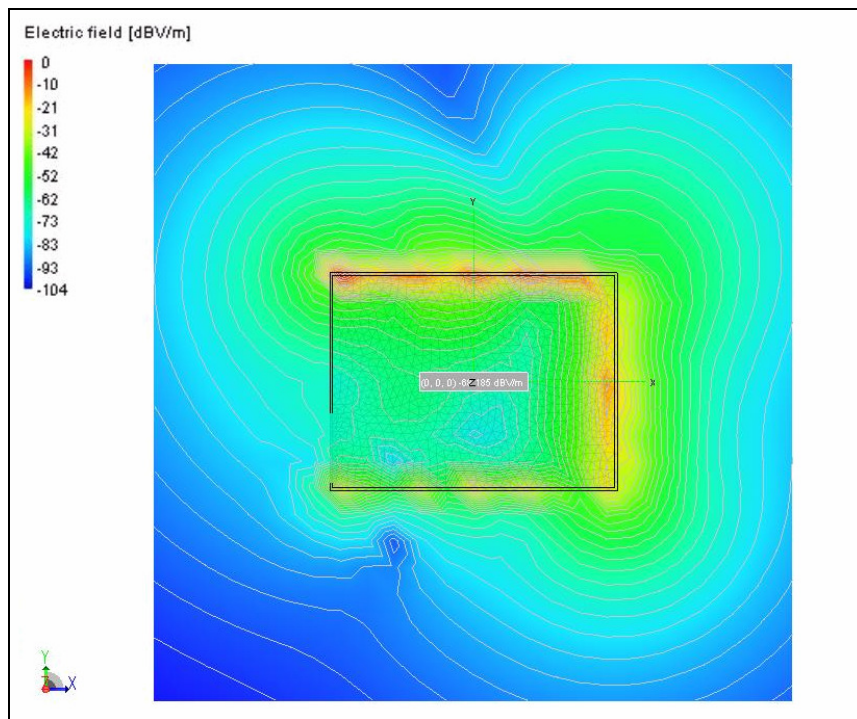


Figura 6.11: Cálculo S.E._E Blindaje de Capa Doble / Sala TEM (Plano X-Y) – Puerta abierta.

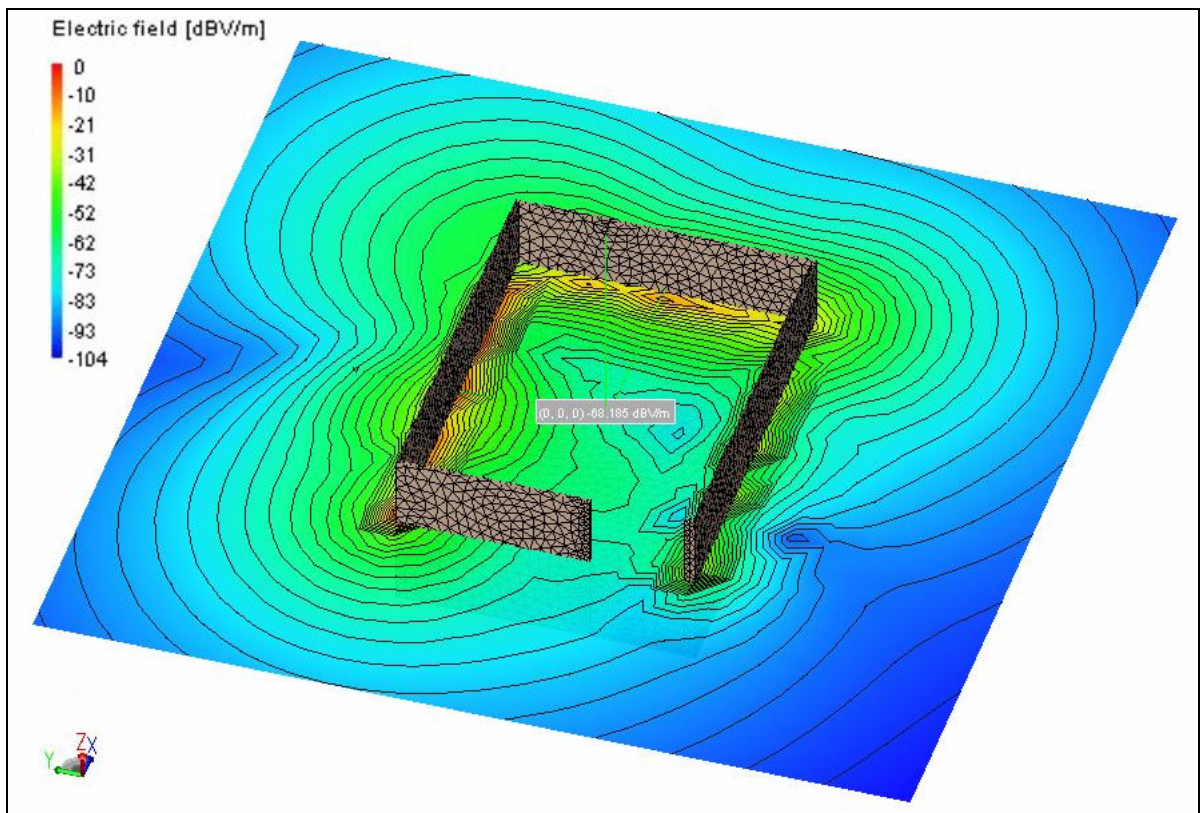


Figura 6.12: Cálculo S.E._E Blindaje de Capa Doble / Sala TEM – Puerta abierta.

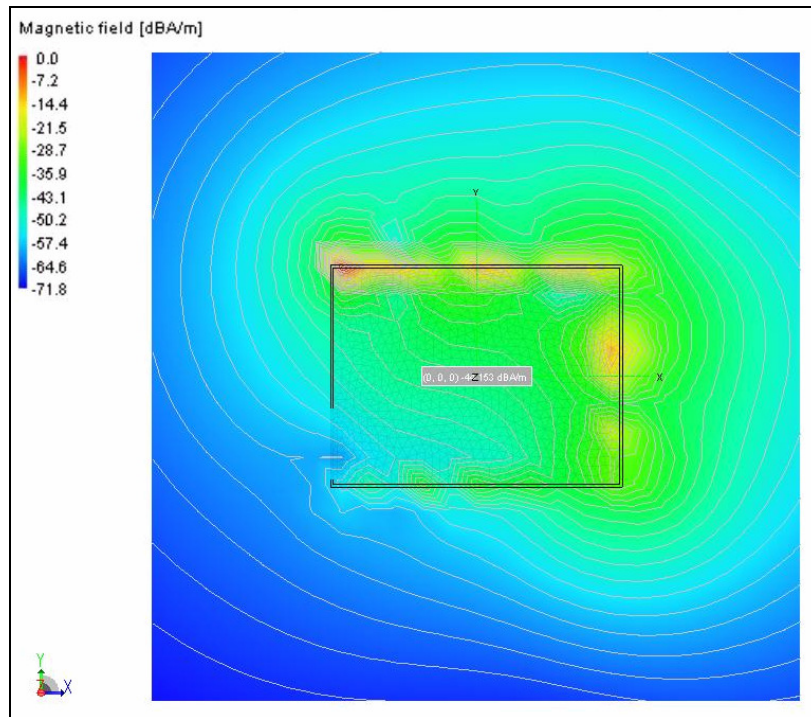


Figura 6.13: Cálculo S.E._B Blindaje de Capa Doble / Sala TEM (Plano X-Y) – Puerta abierta.

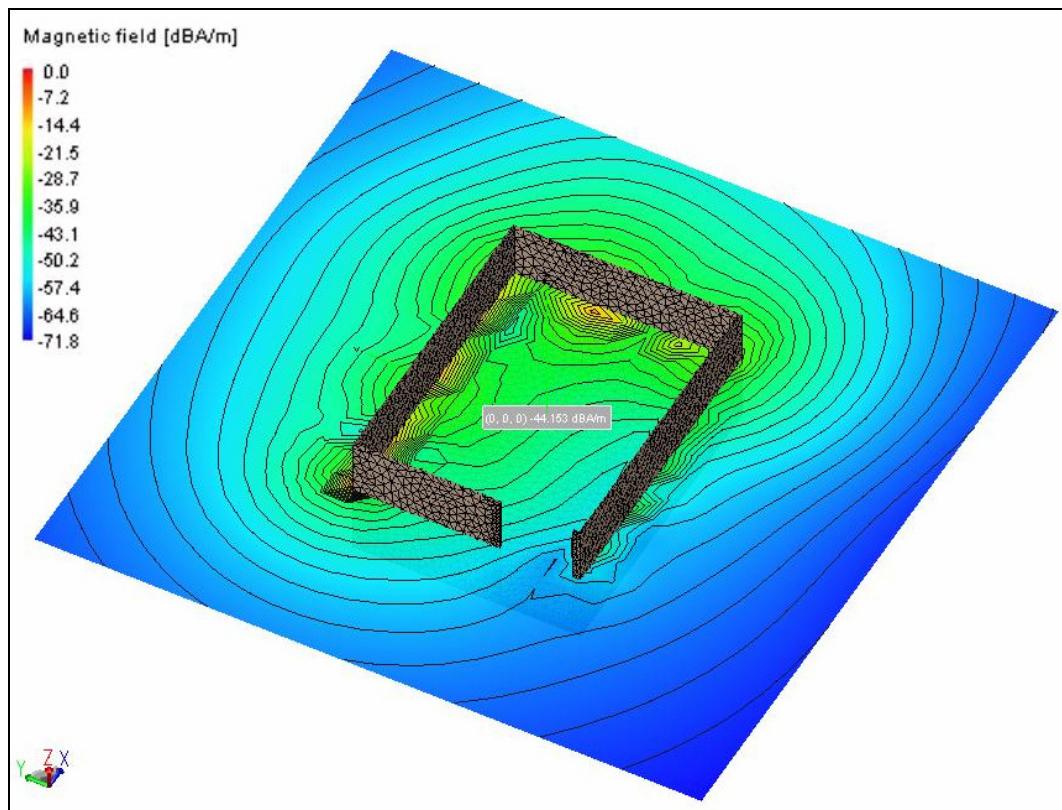


Figura 6.14: Cálculo S.E._B Blindaje de Capa Doble / Sala TEM – Puerta abierta.

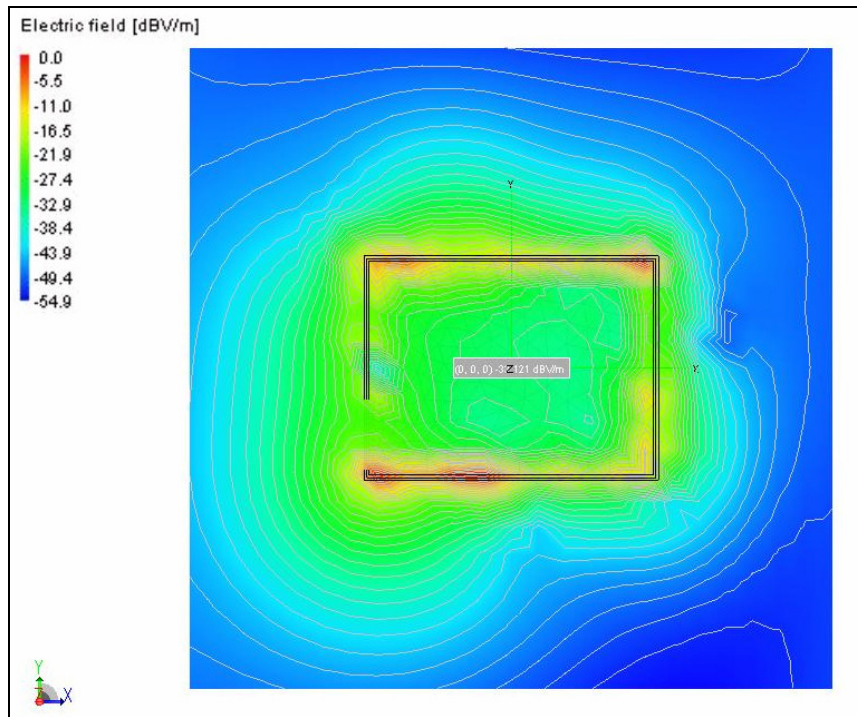


Figura 6.15: Cálculo S.E._E Blindaje de Capa Triple / Sala TEM (Plano X-Y) – Puerta abierta.

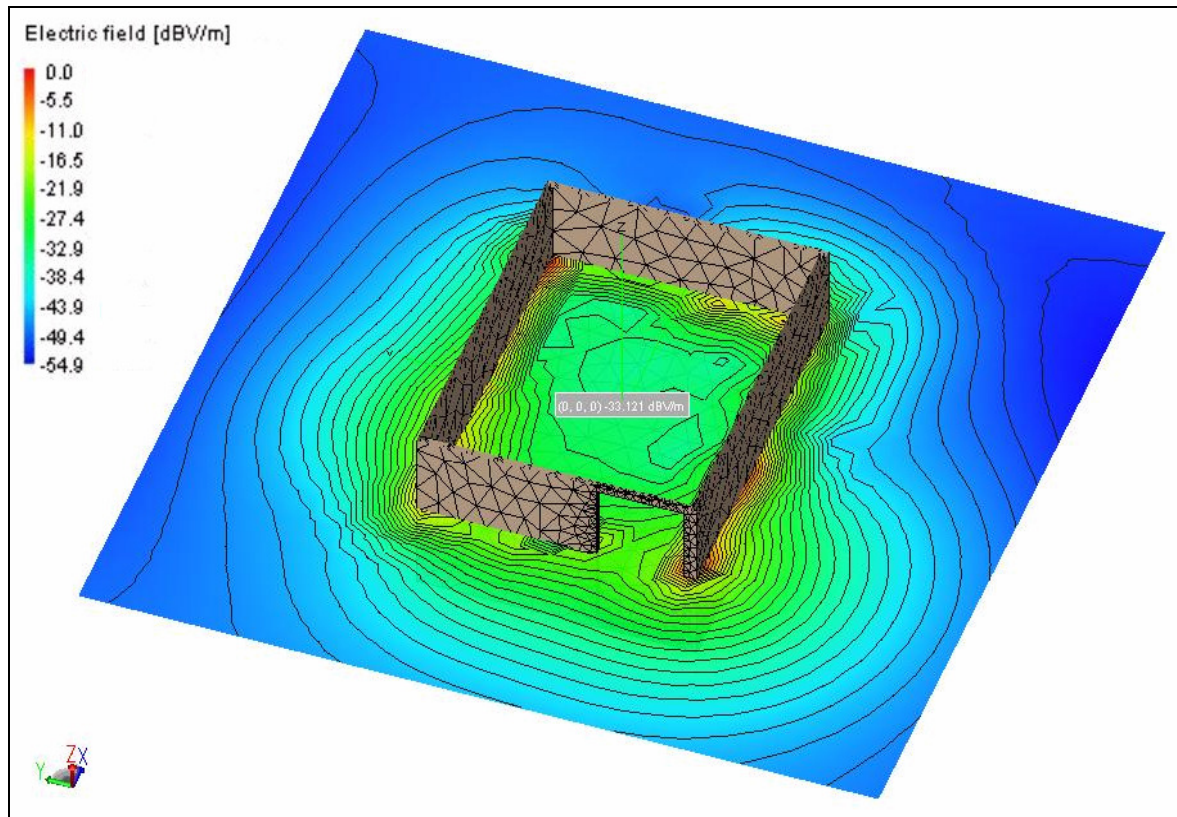


Figura 6.16: Cálculo S.E._E Blindaje de Capa Triple / Sala TEM – Puerta abierta.

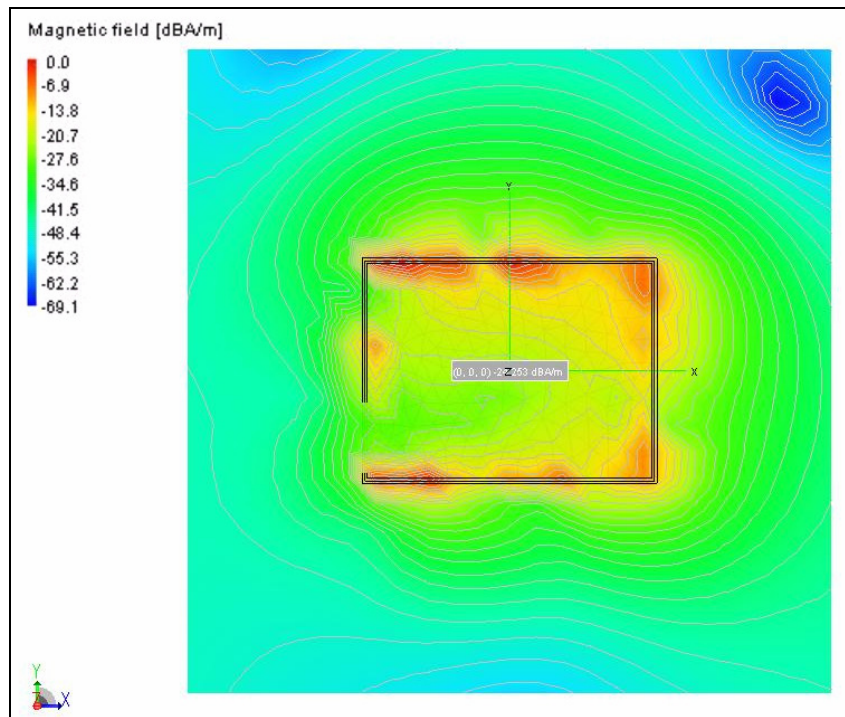


Figura 6.17: Cálculo S.E._B Blindaje de Capa Triple / Sala TEM (Plano X-Y) – Puerta abierta.

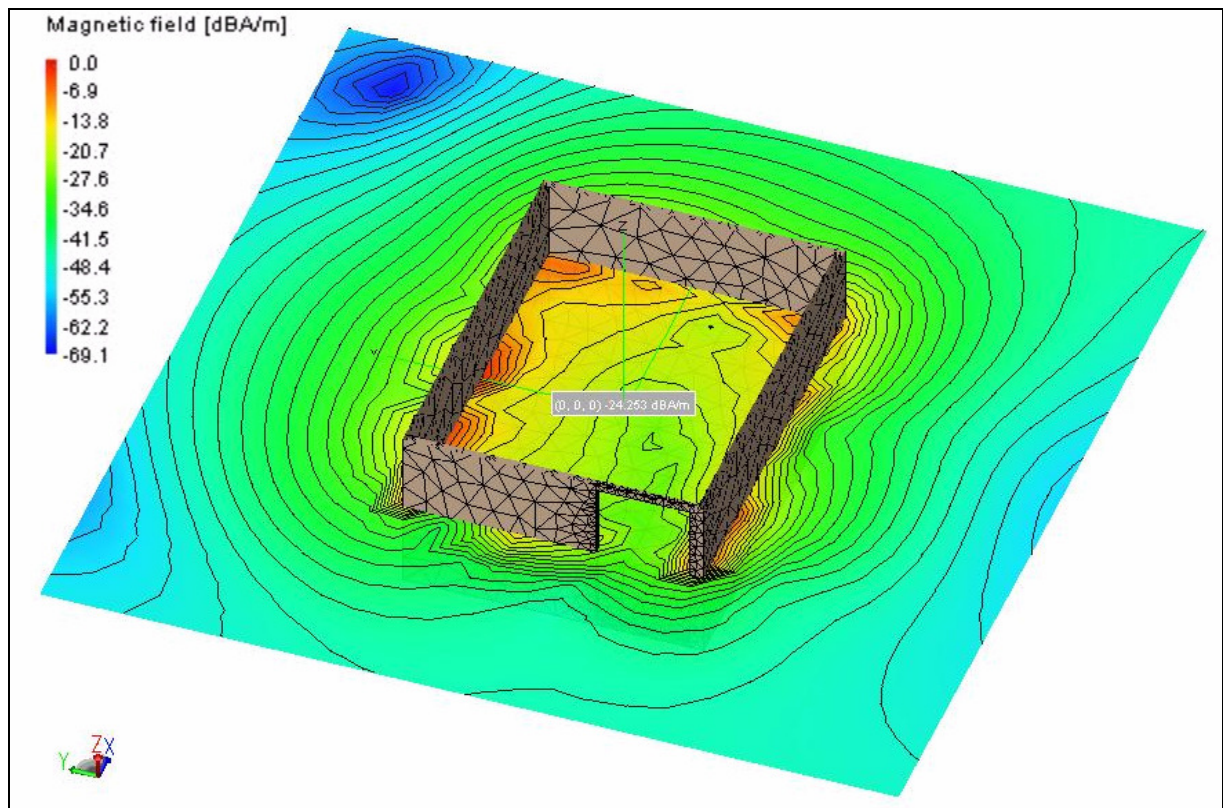


Figura 6.18: Cálculo S.E._B Blindaje de Capa Triple / Sala TEM – Puerta abierta.

Los resultados señalados en las figuras anteriores, se pueden condensar junto con los resultados obtenidos en el “Capítulo Tercero” apartado 3.2.3, en la Tabla 6.3 descrita a continuación:

	CASO IDEAL / (dB) (FEM)	PUERTA PRINCIPAL ABIERTA / (dB) (MoM)		
	CAPA SIMPLE	CAPA SIMPLE	CAPA DOBLE	CAPA TRIPLE
S.E. _E	57.201	55.993	68.185	33.121
S.E. _B	43.763	7.533	44.153	24.253

Tabla 6.3: Resumen de las Efectividades del Blindaje obtenidas para: el Caso Ideal (mediante FEM), y Blindaje de Capa Simple, Capa Doble y Capa Triple (mediante MoM).

En Tabla 6.3 se observa la gran efectividad del blindaje que se logra alcanzar gracias al blindaje electromagnético de la Sala TEM de “Capa Simple” para el caso ideal. Sin embargo, queda de manifiesto la gran degradación que afecta dicho blindaje (82.787% para el caso del campo magnético), producto de la apertura de la puerta de acceso principal a la Sala TEM. Sin embargo, según los resultados indicados en la Tabla 6.3, se observa también que al realizar un blindaje de la Sala TEM de “Capa Doble”, la efectividad magnética del blindaje aumenta considerablemente de 7.533dB a 44.153dB, magnitud que incluso supera la S.E._B obtenida para el caso ideal. Esto último podría sugerir que, en vez de realizar un blindaje con una lámina del “doble de su espesor”, es más recomendable instalar en forma consecutiva “dos láminas de igual espesor”. Con ello, la efectividad del blindaje no aumenta al doble de lo estimado en la S.E._B base de una cierta lámina específica, sino que aumenta muy por sobre dicha cantidad (para el caso particular señalado en la Tabla 6.3, el aumento es de 5.86 veces la S.E. obtenida para lámina simple), ya que en dicho fenómeno no solo entra en juego la profundidad pelicular del material con el cual realizar el blindaje, sino que también aumenta la interacción entre los fenómenos de: reflexión, refracción y absorción de la onda electromagnética entre ambas capas del blindaje.

Por otra parte, del análisis que es posible hacer a la Tabla 6.3, es posible inferir que efectivamente por el aumento de la interferencia a causa del efecto antena proveniente ya no

de una, ni de dos apertura rectangular en la puerta de la Sala TEM, sino de “tres” aperturas (una en cada capa del blindaje electromagnético de la Sala TEM, para el caso del Blindaje de Capa Triple), que en vez de obtener mejor resultados con un “Blindaje de Capa Triple”, se obtienen menores resultados que para el caso del “Blindaje de Capa Doble”. Es decir, observando en la Tabla 6.3 el resultado de la $S.E._B$ para el caso del blindaje de capa triple, se obtiene que éste posee una magnitud de 24.253dB, es decir alrededor de 20dB menos que en el caso del blindaje de capa doble, a causa del aumento del efecto antena que incorpora la gran apertura situada en la puerta de la Sala TEM. Cabe señalar también que no solo se deteriora el efecto del blindaje magnético, sino que también afecta en el rendimiento del efecto del blindaje sobre el campo eléctrico.

Lamentablemente el estudio de blindajes electromagnéticos de capa múltiple se escapa de los alcances de la presente Tesis (enfocada solo en los blindajes pasivos de lámina simple), por lo cual solo se ha intentado discutir los resultados más relevantes de dicha estrategia de blindaje. Sin embargo, queda como trabajo futuro el poder validar dichos resultados obtenidos con FEKO para los casos de blindajes de capa: doble, triple o mayor número de capas.

Además es muy importante tener en consideración que el MoM posee un elevado nivel de cálculos. Con el fin de poder cuantificar lo anteriormente señalado, es posible añadir que utilizando un computador con un procesador “Intel Pentium Dual Core” de 1.86GHz de velocidad y 1GB de memoria RAM, el tiempo que tomó FEKO en determinar la magnitud de los campos electromagnéticos al interior y exterior de los muros del blindaje electromagnético de lámina simple de la Sala TEM, mediante dicho método, fue de alrededor de 15 hrs. para una malla equiespaciada de 30cm. Luego para el caso en que el blindaje electromagnético estaba compuesto por dos capas (también con un enmallado de 30cm), el tiempo que tardó FEKO en resolver dicho problema fue de alrededor de 27hrs. Finalmente para el caso en que el blindaje constaba de tres capas del mismo material, el tiempo de cálculo fue de prácticamente 45hrs también para un enmallado de 30cm. Por lo cual, queda a simple vista que el nivel de cálculos es sumamente complejo, y a pesar de que se obtienen buenos resultados en el caso de blindajes de lámina simple y de lámina doble, se debe tener muy presente dicha consideración.

6.2 Discusión de Resultados Globales.

Para el caso de la discusión de los resultados globales, lo que se pretende es poder agrupar los puntos más relevantes que conciernen a todo tipo de blindajes electromagnéticos pasivos, más

que hacer referencias al caso particular de la Sala TEM. Es por ello que gracias al trabajo que se ha desarrollado en el presente trabajo de Tesis, es posible destacar los siguientes puntos.

6.2.1 Metodología y Procedimiento de Diseño de Blindajes Pasivos.

Siempre y en todo problema de blindaje electromagnético, es necesario evaluar las condiciones del entorno en el cual se sitúa dicho problema y los requerimientos particulares de este último. Para ello, es fundamental saber la frecuencia a la cual oscilan los campos que se desean blindar y su naturaleza. Con el fin de guiar el procedimiento de toma de decisión de los requerimientos de la efectividad del blindaje y brindar al lector un completo resumen de la metodología y procedimiento de diseño de cualquier blindaje electromagnético de tipo pasivo físico, la figura 6.19 muestra un diagrama de flujo el cual integra de manera condensada todos los conceptos tratados en el desarrollo de la presente Tesis.

Como es posible observar en él (figura 6.19), todo proceso de diseño de un blindaje electromagnético comienza por cuestionarse si son, o no, conocidos los requerimientos de S.E. del blindaje a realizar (Bloque 2). Si son conocidos dichos requerimientos, se procede a añadirles un margen de protección (M.O.P)⁴⁶, con el fin de cumplir con los objetivos planteados de S.E. (Bloque 12). Sin embargo, si no son conocidos tales requerimientos de S.E., es necesario determinar cuales serán las amenazas ambientales a las cuales estará sometida la víctima que estará protegida por dicho blindaje (Bloque 4), para ello generalmente se recurre a diversas fuentes, tales como: CBEMA [21], SAE.AE4 [22], SAMA [23] y MIL- STD- 461/RE02 [24]. Para el caso de algún ambiente de características muy particulares, es posible analizar los requisitos propios de la víctima en conjunto con las recomendaciones existentes para recintos bajo condiciones TEMPEST o instalaciones de tipo comercial (Bloque 3). Luego, se debe determinar la ubicación física en la cual se encontrará el producto blindado (Bloque 5), analizando el ambiente electromagnético tanto al interior como al exterior de dicho recinto (Bloque 6). Una vez hecho eso, entonces se debe determinar a que familia pertenece la víctima, es decir: pertenece a la familia de los componentes analógicos o a la familia de los componentes digitales, ya que los primeros por lo general son más sensibles a las EMI, pero de respuestas más lentas que la familia de los componentes digitales⁴⁷ (Bloque 7).

⁴⁶ Ver Glosario.

⁴⁷ Los componentes analógicos se caracterizan por su relación de "Señal a Ruido" y los componentes digitales, por el denominado NIL (Noise Immunity Level).

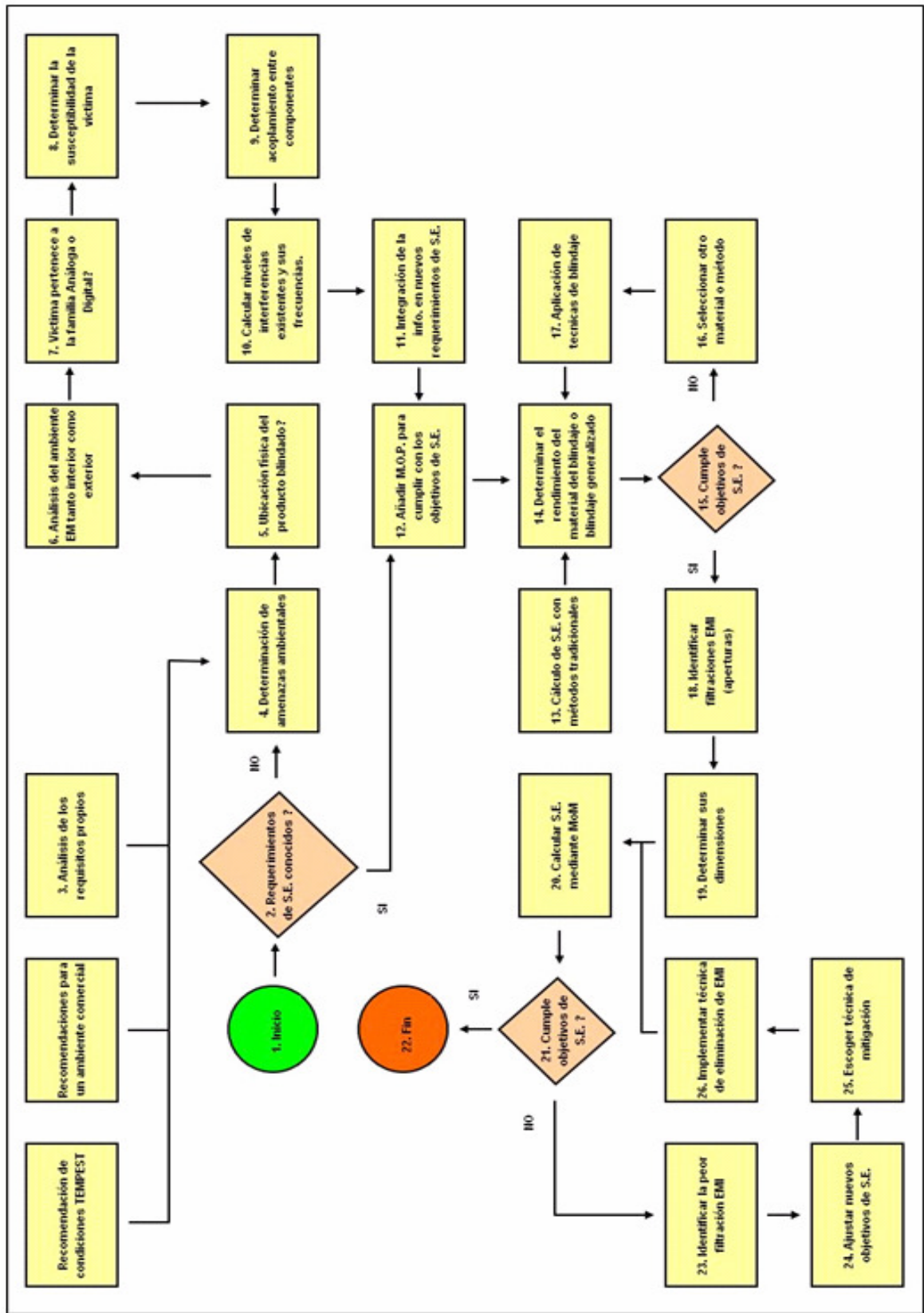


Figura 6.19: Diagrama de flujo con la metodología y procedimiento de diseño de cualquier blindaje electromagnético de tipo pasivo físico.

Posteriormente, se determinará cual es la susceptibilidad de la víctima a los campos electromagnéticos del entorno en el cual se encuentra interactuando (Bloque 8), para más tarde poder determinar cuales serán los niveles de acoplamiento existentes entre los componentes que comparten un mismo ambiente de trabajo (Bloque 9). Esto último, es posible gracias al cálculo de los niveles de interferencias existentes entre dichos componentes y sus diversas frecuencias de trabajo (Bloque 10). A continuación de ello se procede a integrar toda la información obtenida de las etapas previas, en lo que comprenderá los nuevos requerimientos de S.E. (Bloque 11).

Con los requerimientos de S.E. conocidos, se procede a añadir un margen de protección para poder cumplir con los objetivos planteados de S.E. en todo momento, incluso bajo una condición anómala (Bloque 12), con lo cual se procede a determinar el rendimiento del material escogido para realizar el blindaje o la S.E. de un blindaje generalizado previo a uno físico (Bloque 14), lo cual es posible gracias al cálculo grueso de la S.E. que presenta el blindaje diseñado (en forma ideal, sin considerar filtraciones), mediante la aplicación de los métodos tradicionales como: FDTD, FEM, MLFMM, UTD, etc.⁴⁸, tomando en consideración las frecuencias de interés particular para el problema (Bloque 13). Como consecuencia de ello, es posible saber si dicho blindaje cumple con los objetivos planteados de efectividad del blindaje, o no (Bloque 15). Si no se cumplen dichos objetivos, se debe seleccionar algún otro tipo de material o método de cálculo (Bloque 16), que a su vez implica revisar las diversas técnicas de blindajes pasivos existentes, ya que existe la posibilidad de estar cometiendo algún error ocupando alguna técnica de blindaje inadecuada (Bloque 17)⁴⁹.

Cuando ya se ha cumplido con los objetivos de S.E. planteados (Bloque 15), se procede a identificar todas las filtraciones EMI que afectan al blindaje (Bloque 18), determinando las dimensiones de cada una de ellas (Bloque 19). Una vez que se han identificado todas las filtraciones de EMI, se calcula la S.E. del blindaje electromagnético en presencia de las filtraciones que degradan la calidad de la S.E. obtenida para el caso ideal, esto último gracias a la aplicación del MoM ampliamente tratado en el “Capítulo 3” del presente documento (Bloque 20). Así, nuevamente se debe consultar si los objetivos de S.E. se cumplen para los resultados obtenidos mediante la aplicación del MoM (Bloque 21). Si la respuesta a dicha consulta es afirmativa, entonces quiere decir que tomados en consideración todos los factores que interactúan en la magnitud del campo electromagnético resultante en el entorno de la víctima,

⁴⁸ Ver Glosario.

⁴⁹ Revisar el “Capítulo 2” de la presente Tesis, y en particular referencia [2].

se ha logrado diseñar un blindaje que cumple con los objetivos de S.E., por lo cual el diseño del blindaje sería el indicado y el problema estaría resuelto (Bloque 22).

En el caso contrario, es decir cuando los objetivos de S.E. no se satisfacen, se debe identificar la peor filtración EMI que afecta al blindaje (Bloque 23). Luego de ello, es necesario redefinir nuevos objetivos de S.E. para dicha filtración en particular (Bloque 24), y más tarde se debe escoger alguna técnica de mitigación específica para dicha filtración EMI crítica (Bloque 25). Una vez que ya se ha escogido dicha técnica de mitigación de la filtración de EMI, se requiere implementarla en forma práctica para lograr reducir los efectos adversos que incorpora al blindaje diseñado (Bloque 26). Cuando se ha podido realizar el mejor esfuerzo posible para mitigar los efectos de la peor fuente de filtraciones EMI, el paso siguiente es nuevamente calcular la S.E. mediante el MoM (Bloque 20), y observar si efectivamente se logra esta vez cumplir con los objetivos de S.E. planteados para el diseño del blindaje. Si la respuesta a dicha consulta resulta ser afirmativa, entonces se ha encontrado la solución al problema (Bloque 22). Sin embargo si la respuesta nuevamente es negativa, se debe volver al proceso encabezado por el Bloque 23.

6.2.2 Materiales de Alta Conductividad vs Ferromagnéticos.

Para el caso de los campos electromagnéticos de frecuencias extremadamente bajas (menores a 300Hz), la longitud de onda en el espacio libre es mucho mayor que la dimensión de la geometría de los problemas. Por ende, se debe suponer para dichos casos que los materiales son homogéneos y lineales, dependiendo el resultado de la efectividad del blindaje fundamentalmente del tipo de material empleado en dicho blindaje, más que de la geometría que éste pueda tener.

Otro punto interesante de ser destacado, es el comportamiento fundamental de dos clases de materiales: los materiales altamente conductivos, y los materiales ferromagnéticos. En el caso de los materiales altamente conductivos (σ tendiendo a infinito), cuando estos son sometidos al efecto de algún campo electromagnético homogéneo, surgen corrientes de Foucault en el metal las cuales se encargan de crear un campo contrario al cual se encuentra siendo sometido. De dicho modo, el campo externo es rechazado por el metal y obligado a correr en forma paralela a la superficie del metal, dando como resultado una baja densidad de flujo en el interior del material del cual se encuentra hecho el blindaje (Ver figura 6.20 – (a)).

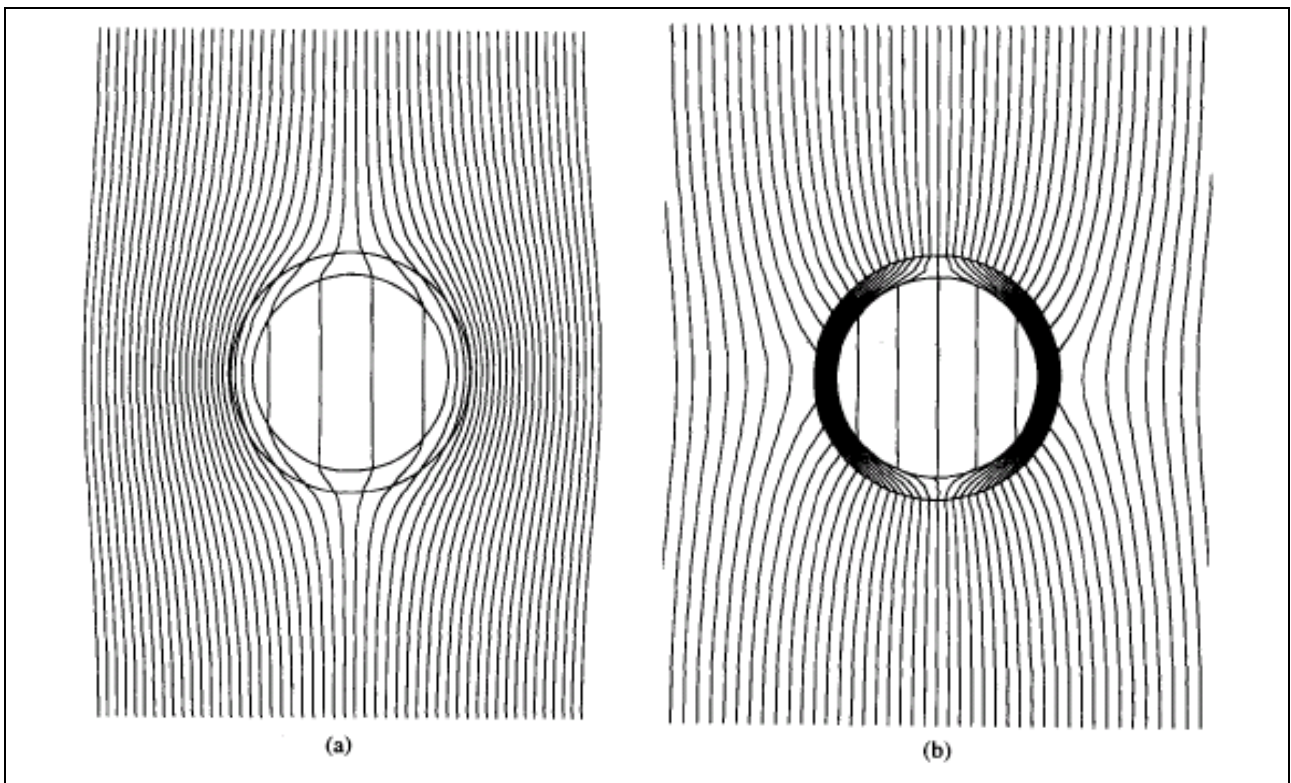


Figura 6.20: Campo magnético al exterior e interior de dos casquetes esféricos sometidas a la influencia de un campo magnético externo homogéneo. (a) Casquete esférico altamente conductivo. (b) Casquete esférico Ferromagnético [26].

Por otra parte, para el caso de los materiales ferromagnéticos, el campo exterior incide casi perpendicularmente a la superficie del blindaje, siendo guiado al interior del metal a lo largo de toda su superficie de contorno en lugar de pasar a través de la capa del blindaje, desarrollándose una suerte de guía de ondas al interior del material ferromagnético. Con ello, es posible obtener el efecto de blindaje deseado (Ver figura 6.20 – (b)).

Cabe señalar también, que en la vida cotidiana existen numerosos casos en los cuales no existe la posibilidad de efectuar un blindaje mediante algún recinto blindado el cual sea completamente cerrado o hermético. Por ende, para casos de éste tipo y con el fin de poder entregar otro ejemplo claro de los dos mecanismos de blindajes que actúan en los casos de materiales altamente conductivos o en el caso de materiales ferromagnéticos (corrientes de Foucault o guía de ondas, respectivamente), en la figura 6.21 es posible observar un corte transversal de la geometría de un problema en el cual, se ha efectuado un blindaje de una fuente compuesta por dos conductores de largo infinito, que transportan corrientes de magnitudes “+I” y “-I”, mediante una pantalla de tres caras de largo “L”.

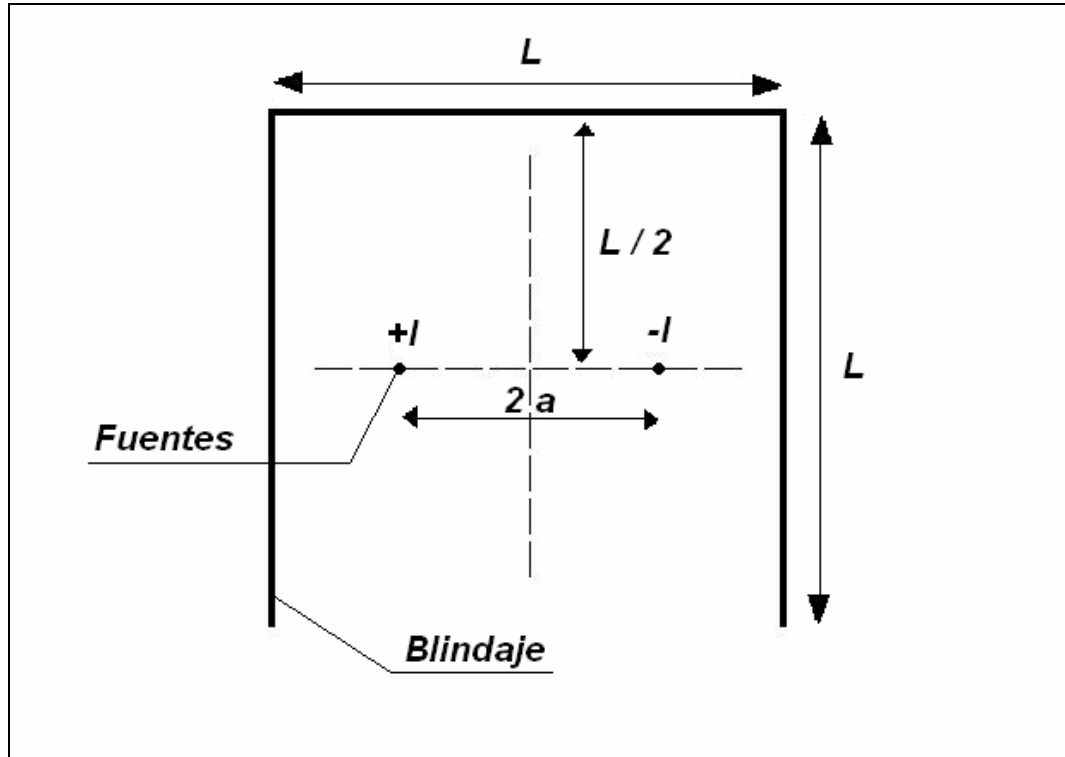


Figura 6.21: Corte transversal de la geometría de una lámina de tres caras que apantalla a un conductor doble e infinito, que transportan una corriente “+I” y “-I”. Las dimensiones para este caso son: $L = 0.5\text{m}$ y $2a = 100\text{mm}$, con un espesor de la lámina de $d = 1\text{mm}$.

Los resultados que se obtienen al efectuar dicho blindaje con una pantalla tanto de material altamente conductor (que para este caso en particular es el Cobre), como también mediante un material ferromagnético (que para este caso en particular es el Fierro Silicoso de tipo CK- 37), se pueden observar en la figura 6.22 – (a) y (b).

La figura 6.22 – (a) y (b), indican que el comportamiento de las líneas de campo en ambos casos es similar al señalado por la figura 6.20, en el cual se efectúa el blindaje mediante casquetes esféricos de ambos tipos de materiales, pese a que en la figura 6.21 y 6.22 solo existe una pantalla de tres caras, la cual intenta de la mejor forma posible encerrar a la fuente de campo magnético al interior de sus paredes.

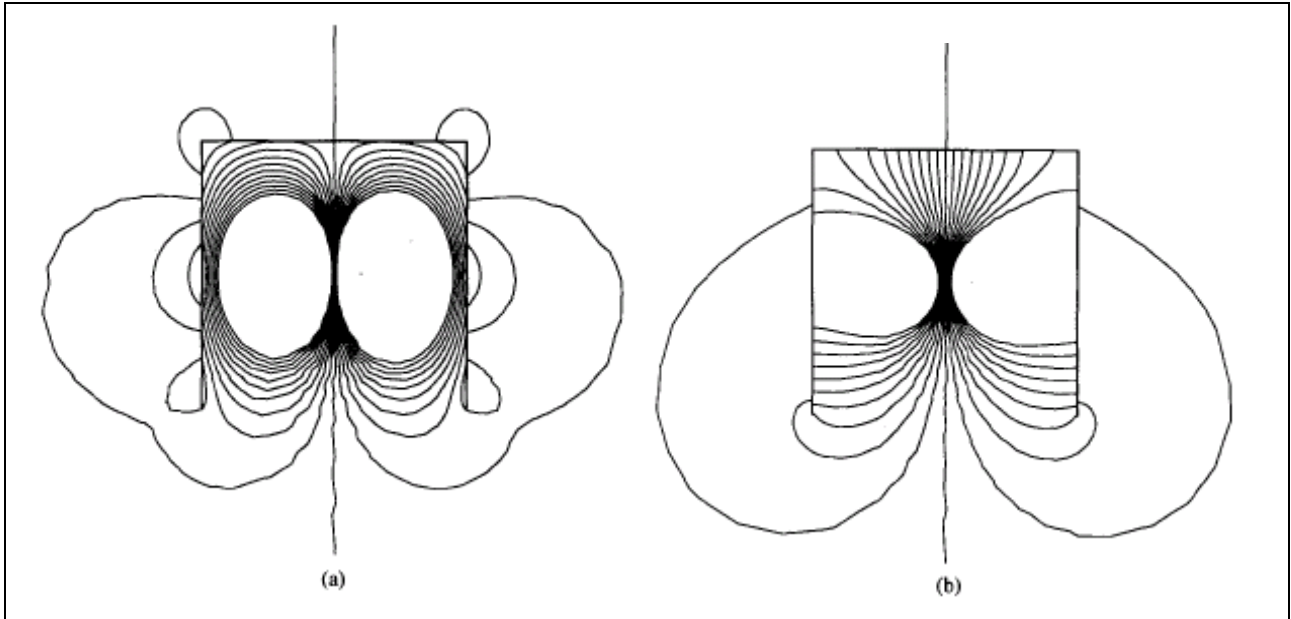


Figura 6.22: Gráfico de la distribución de las líneas de campo magnético, para el caso en el cual al interior de un blindaje de 3 caras (figura 6.21), se instala un doble conductor en el cual circula corriente en el sentido positivo y negativo. (a) Blindaje de Cobre. (b) Blindaje de Fierro Silicoso tipo CK- 37 (Espesor de las láminas $d = 1\text{ mm}$) [26].

Como resultado de lo anteriormente señalado, las propiedades del material con el cual se desarrolla un determinado blindaje, en conjunto con la frecuencia del campo magnético que se desea blindar, decidirán cual de los dos mecanismos de blindaje (corrientes de Foucault o guía de ondas) será el que predomina en cada caso particular. Con lo cual, la geometría del blindaje queda supeditada a un segundo lugar, permitiendo entonces desarrollar primeras aproximaciones de la S.E. de un determinado blindaje electromagnético, mediante el cálculo de la S.E. de un casquete esférico cuyo radio equivalente será aproximado al de dicho blindaje específico.

Capítulo 7: Conclusiones.

Con respecto al “Capítulo 1”, es posible concluir que hoy en día, dos grandes sistemas de blindaje han sido desarrollados por la industria: los Sistemas de Blindajes Activos y los Sistemas de Blindaje Pasivos, los cuales deben cumplir con los siguientes objetivos:

- Prevenir tanto de los ruidos atmosféricos, como de las EMI⁵⁰ y los EMP, que puedan causar mal funcionamiento de equipos.
- Prevenir al ser humano de exposiciones continuas a campos magnéticos fuertes que podrían llegar a ocasionarle daño.

Cualquiera sea la opción de blindaje a ser tomada, ésta dependerá de su factibilidad técnica económica y de la cantidad de equipos que se desea blindar, ya que de ser necesario blindar un gran número de equipos específicos, es claro que la mejor opción estará dada por el blindaje arquitectónico de la sala madre, la cual albergará en su interior a todos los sub- equipos relacionados con ella.

En el “Capítulo 2”, se ha entregado en forma muy condensada todos los conceptos fundamentales de la teoría del blindaje electromagnético, permitiendo al lector entender la naturaleza de los fenómenos de “Blindaje Generalizado” y los diversos mecanismos de blindaje, tanto para campos estacionarios como para el caso de campos electromagnéticos variables en el tiempo.

Luego de ello, en el Capítulo 3, se realizó el análisis exhaustivo del análisis y la modelación del blindaje electromagnético de la Sala TEM. Para ello, en primer lugar, se estudio en forma teórica el comportamiento que presenta el “Blindaje Generalizado”, pudiendo concluirse que éste último representa un mecanismo de blindaje efectivo, en el cual el factor fundamental a ser considerado es la relación existente entre los campos eléctricos y magnéticos con respecto a la distancia.

Es así como para el caso de las inmediaciones a la fuente, el campo eléctrico varía en forma inversamente proporcional a la distancia que existirá entre la fuente y el punto en cuestión ($1/r$)

⁵⁰ Ver significado de las siglas utilizadas en “Glosario” adjunto al presente trabajo de Tesis.

(ecuación 3.13). Sin embargo, para el caso de posiciones muy alejadas a la fuente (campo lejano), el campo eléctrico varía en forma inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que existirá entre la fuente y la posición del punto en estudio ($1/r^2$) (ecuación 3.14 – Tabla 3.1 y Figura 3.3). Análogamente, para el caso del campo magnético, se concluye que existe una relación inversamente proporcional entre la magnitud de la inducción magnética y la distancia al conductor, cuando el punto en estudio se encuentra cercano al conductor ($1/r$) (ecuación (3.23)). No obstante, cuando el punto de análisis se sitúa a una distancia mayor, la inducción magnética decrece a razón del cuadrado de la distancia ($1/r^2$) (ecuación (3.24)), y en el infinito decrece a razón de la distancia al cubo ($1/r^3$) (ecuación (3.28), Tabla 3.2 y Figura 3.5).

A continuación: se presentó, analizó y modeló el blindaje electromagnético de la Sala TEM mediante el método de los momentos modales (Modal/MoM), el cual es un método computacional de cálculo numérico utilizado en la resolución de ecuaciones diferenciales lineales en derivadas parciales. Utilizando este método, el problema de acoplamiento electromagnético fue dividido en dos:

- El problema de la región externa, que consiste en el análisis de las fuentes de corrientes magnéticas atrás de los planos de tierra infinitos, dados por cada uno de los muros.
- Y el problema de la región interna, el cual consiste en el análisis del volumen rectangular encerrado por el blindaje, el cual se encontrará iluminado por una serie de corrientes magnéticas equivalentes.

El campo magnético total fuera del blindaje, se obtiene mediante la superposición del campo producto de la onda plana incidente y del campo disperso por el efecto scattering proveniente de las aperturas rectangulares, las cuales son consideradas como fuentes equivalentes de corrientes magnéticas que irradian campos al interior del recinto. Por lo cual, el campo electromagnético total en cualquier punto ubicado al interior de éste, se obtiene mediante la superposición de campos provenientes de cada una de dichas fuentes de corrientes magnéticas.

Los campos electromagnéticos pertenecientes a todas las regiones del problema, deben satisfacer las relaciones de continuidad en las superficies comunes. Por tanto, la componente tangencial del campo eléctrico en las aperturas debe ser continua, al igual que la componente tangencial del campo magnético en las aperturas. De ello, surgen una serie de ecuaciones integrales que, en conjunto con el método de los momentos, permiten despejar las incógnitas

del problema, que en este caso serían las magnitudes de las corrientes magnéticas en las aperturas del recinto rectangular (vector $[X]$, solución del sistema $[A][X]=[B]$ – ecuación (3.109)).

Además, en el Capítulo 3 también se logró concluir que el Fierro Silicoso de grano orientado tipo M-4 resultó ser el material que brinda las mayores prestaciones frente a los requerimientos que se necesitan satisfacer con el blindaje electromagnético de la Sala TEM. En efecto, según los cálculos obtenidos para el peor escenario posible mediante MoM y su resolución a través del programa computacional “FEKO”, se obtiene que su $S.E._E$ ⁵¹ es de 55.99dB y su $S.E._B$ es de 7.53dB. Mientras que para el caso ideal, los cálculos obtenidos mediante FEM indican como resultado que la $S.E._E$ es de 57.20dB y su $S.E._B$ es de 43.76dB.

Con respecto al software “FEKO”, se puede concluir que representa una herramienta muy poderosa de resolución de problemas de electromagnetismo. Sin embargo, sus complejos algoritmos de cálculo lo tornan algo lento. No obstante, para compensar aquello, es posible trabajar con las simetrías de los problemas y de dicha forma resolver solo parte de éste, para luego extrapolar los resultados al problema global. Su amigable interfaz gráfica, permite plantear problemas complejos sin mucho trabajo, mediante el desarrollo de esquemas “CAD”. Además de ello, tienen un excelente servicio de atención al cliente y soporte técnico, lo cual lo hacen un software mucho más amigable y atractivo, con múltiples potencialidades tanto docentes como comerciales e industriales.

Cabe señalar también, que se hizo un análisis del problema mediante la aplicación en detalle del método de “Propagación de Onda Plana - PoOP”, con el fin de obtener resultados aproximados de un modo simple y rápido, el cual pudiese ser una alternativa para el cálculo de una primera aproximación de la $S.E.$ de un blindaje en general. Sin embargo, se logró concluir que dicho método entrega como resultados magnitudes de $S.E.$ exageradamente altos, a causa de los numerosos supuestos teóricos e ideales que involucra su utilización (en el caso del blindaje de la Sala TEM, los resultados de $S.E._E$ y $S.E._B$ fueron igual a 67.67dB para ambos casos). Por ende, se concluye que no es recomendable su uso en la determinación del diseño de blindajes electromagnéticos de ningún tipo (Ver tabla 3.3 y Anexo C.6).

En el Capítulo 4, se exponen todas las medidas experimentales realizadas tanto en el interior de la Sala TEM como en sus inmediaciones, mediante el uso del EMDEX II (medidor de campos electromagnéticos de tipo triaxial), estando dicha sala en sus condiciones iniciales y más tarde

⁵¹ Ver significado de las siglas utilizadas en “Glosario” adjunto al presente trabajo de Tesis.

en la condición “Post- Blindaje Generalizado”. Al respecto es posible concluir que gracias al EMDEX II, fue posible efectuar un mapeo en tres dimensiones de las intensidades de campos magnéticos existentes al interior de la Sala TEM en todos sus ejes, a través del barrido completo de la superficie de la Sala TEM mediante el uso de un “camino imaginario” que constituye la estrategia de medida, el cual se encuentra desplazando en 50cm tanto del muro Norte como del Muro Oriente (ver como ejemplo, la figura 4.6). Todo ello, gracias a la posibilidad de convertir la información obtenida con el EMDEX II desde “campo magnético en función del tiempo” a “campo magnético en función de la posición espacial”, mediante la opción “Convert lo LINDA” incorporada en el Software propietario del EMDEX II, EMCALC 2000.

Los resultados obtenidos en los gráficos (desde la figura 4.7 a la 4.15), indican que los principales elementos que actúan como fuentes de EMI inicialmente para la Sala TEM son: los Tableros de Alumbrado del Zócalo, T.D.A.F. y COMP, las bandejas porta conductores, la puerta del acceso principal a la Sala TEM, equipos de aire acondicionado, las unidades condensadoras externas pertenecientes a otros equipos de aire acondicionado del edificio de Geología y las ventanas del muro Sur de la sala (ver figura 4.15). Lo cual implica que en su condición inicial, la Sala TEM presenta una magnitud de campo magnético resultante “peak” igual a 20.5mG.

Dado que los requerimientos del TEM indican como magnitud máxima admisible 0.76mG de campo magnético resultante, el blindaje requerido debería tener una S.E._B igual a 28.6dB. Para ello, y utilizando los resultados del Capítulo 3, se procedió a efectuar en primer lugar un blindaje generalizado de la Sala TEM, alejando como mínimo a un radio de 8m cualquier fuente de campo electromagnético que pudiese interferir con el TEM (Tabla 4.5 y ecuación (4.2)). Los resultados fueron categóricos, y quedan de manifiesto desde la figura 4.23 a la figura 4.30, en las cuales se observa que la magnitud del campo magnético resultante disminuyó a 0.78mG (representado en el valor medio de la Tabla 4.6), es decir que la S.E._B del blindaje generalizado que se realizó, fue de 26.4dB. Sin embargo, como el valor máximo obtenido post- blindaje generalizado es de 0.98mG, se consideró dicha magnitud para ser blindada hasta lograr cumplir con el objetivo de blindaje propuesto, el cual es de 0.76mG. Es decir, realizar una reducción adicional final de 2.21dB para cumplir con los requerimientos del TEM. Y a consecuencia que la S.E._B del Fierro Silicoso M-4 determinada en forma teórica mediante MoM es de 7.53dB, un diseño de blindaje de lámina simple de dicho material, cumple con los requisitos señalados.

Por otra parte, también es posible concluir que, de acuerdo con los resultados empíricos obtenidos de la medición con el EMDEX II de la S.E._B que presenta una lámina de Fierro Silicoso M-4 (la cual es igual a 6.021dB, ver figura 4.32). Existe una diferencia de 1.509dB en

comparación con el resultado teórico obtenido mediante MoM (Figuras 3.12 y 3.13). Sin embargo, esto se puede explicar ya que en la estrategia de medida indicada por el estándar NSA 65-6 de la figura 4.31, existe una mayor cantidad de filtraciones de EMI a causa que las líneas de campo tienden a “rodear” los bordes de la placa de tan solo 88cm de ancho. Por ende, la medida se ve degradada en una magnitud no menor en comparación con el resultado teórico.

Con respecto al Capítulo 5, se puede concluir que luego del análisis de las diversas técnicas de blindaje, se optó por efectuar un diseño que incorpora como principal método de acoplamiento entre sus componentes, las denominadas “Junturas Tipo Sándwich”. Esto último, como consecuencia de su fácil instalación, gran confiabilidad y alto rendimiento (Figura 5.1 y 5.2). Este tipo de junta se sustenta en el principio fundamental de “eliminación de las guías de ondas”, el cual se basa en que el ancho de la junta y el patrón de pernos forman intervalos equiespaciados (guías de onda) que eliminan la energía electromagnética bajo una cierta frecuencia dada (Ver figura 5.1 y 5.2). A su vez, la geometría de la junta se basa en la ecuación (5.1) de carácter netamente empírico, la cual incorpora: la longitud de la unión entre juntas, el orificio (o espacio) que queda entre placas de la junta, la frecuencia de operación, el ancho de la junta, etc. A partir de dicha ecuación, se obtuvo la Tabla 5.1 y la Figura 5.3, de donde finalmente se concluyó diseñar la junta tipo sándwich para el blindaje de la Sala TEM de un ancho de 6in y de un espaciamiento entre tornillos de 2.5in, para asegurar la eficiencia del blindaje en su totalidad.

Lo importante en todo diseño de blindajes, es cuidar el correcto acoplamiento “metal – metal” entre los componentes de dicho blindaje. Poniendo un especial cuidado al ensamblar todas sus esquinas, y al escoger los mecanismos de control adecuados para las filtraciones de EMI que son inevitables, como por ejemplo: puertas, sistemas de aire acondicionado y sistemas de alumbrado y fuerza. En el caso particular de la Sala TEM, se ha diseñado un esquema de puertas de tipo “RCM – RF” automáticas. Por otra parte, es bueno mencionar que el aire acondicionado llega hacia la sala mediante un esquema de ductos que prácticamente no invaden dicha sala (solo a través de sus celosías), y finalmente el sistema de alumbrado y fuerza, se encuentra confinado al interior de un circuito de cañerías de acero galvanizado, las cuales proveen de muy buen blindaje para los conductores eléctricos, según se observa en el “Anexo E-2”. De dicha forma, como conclusión, se deja propuesto el diseño del blindaje arquitectónico de la Sala TEM mediante los planos adjuntos en el “Anexo E-1”. En dicho anexo, es posible observar todos los detalles requeridos para el blindaje y sus especificaciones.

En relación a lo expuesto en el Capítulo 6, es posible concluir que gracias al desarrollo experimental del blindaje parcial del muro Norte de la Sala TEM, se pudo obtener un nuevo valor aproximado de la S.E._B de dicho blindaje (5.16dB). Tal magnitud resulta ser algo inferior a la obtenida en el Capítulo 4 - punto 4.3 – igual a 6.021dB, ya que además de ser blindado sólo uno de los muros de la Sala TEM, al interior de la sala se encontraban numerosas fuentes de EMI a plena carga, a consecuencia que el TEM ya se encontraba completamente operativo. No obstante, como solo se requiere de una atenuación final del campo magnético de 2.21dB para lograr encuadrar al TEM dentro de los requerimientos del fabricante, con 5.16dB se tiene incluso un factor de protección igual a dos⁵². Por ende, los resultados son categóricos y en la Figura 6.10 – (c) y (d), es posible apreciar que cuando se encuentra blindado el muro Norte de la Sala TEM, es posible emplear el modo S-TEM sin experimentar distorsión en la imagen.

Con respecto al blindaje de capas múltiples, pese a que no se encuentra dentro de los alcances de la presente Tesis, los resultados obtenidos en la Tabla 6.3 indican que el concepto intuitivo: “a mayor número de placas, mayor debe ser el blindaje obtenido” no aplicaría para el caso de blindajes con aperturas de tamaños considerables (que es el caso de la Sala TEM). Puesto que como se observa en dicha tabla, resulta mejor blindar la sala con solo dos capas del material, y no con tres. Probablemente a consecuencia de la introducción de un nuevo orificio de gran tamaño (en comparación al caso de capa doble), y por ende el aumento del “efecto antena” que ellos traen consigo, sumado al acoplamiento existente entre las tres capas del material.

Por otra parte, el esquema entregado en la Figura 6.19 pretende resumir en forma global, toda la metodología y procedimientos de diseño de cualquier blindaje electromagnético de tipo pasivo físico, intentando ser una herramienta práctica que condense todos los conceptos que hasta ahora han sido expuestos, en tan solo una página.

Finalmente, es importante señalar que al comienzo de la presente Tesis se intento además buscar una forma de construir un blindaje de “tipo activo”. Sin embargo, en aquel tiempo, la falta de sensores de bajo costo que fueran lo suficientemente sensibles para captar campos del orden de los mG, hicieron que la idea no llegara a buen término. Hoy en día, ya existen sensores de bajo costo incluso triaxiales, incorporados en un sólo circuito integrado (como por ejemplo los creados por la empresa “Honeywell” en su modelo HMC1055). Por ende, también queda la elaboración de un sistema de “blindaje activo”, para un posible trabajo futuro [27].

⁵² El cual aumenta a “tres”, según el cálculo teórico mediante MoM para el caso del blindaje completo de la Sala TEM en el peor de los casos. Es decir, si su S.E._B fuera de 7.53dB.

El camino no tomado.

*Dos caminos divergían en un bosque de otoño,
Y disgustado por no poder seguir ambos
Estando solo, a lo largo me detuve
Escrutando uno de ellos como podía
Allá en donde se perdía entre los arbustos.*

*Luego tomé el otro, que era bueno igualmente
Tal vez más atractivo
Porque era herboso y poco frecuentado;
Aunque, en el fondo, los pasos de los transeúntes
Los hubiese marcado del mismo modo,
Porque ninguno en esa mañana mostraba
Sobre la hierba la huella de un paso.*

*Dejé el primero para otro día!
Sabíendo también cómo un camino lleva a otro,
Dudaba si regresaría.
Narraré esta historia con un suspiro
Quién sabe donde dentro de mucho, mucho tiempo:
Dos caminos divergían en un bosque, y yo...
Tomé el menos frecuentado,
Y de ahí vino toda la diferencia.*

(Robert Frost).

Bibliografía.

- [1] Romero G. Pedro, “Puesta a Punto de mediciones de campo magnético y eléctrico a frecuencia industrial. Antecedentes Biológicos”, memoria para optar al título de Ingeniero Civil Electricista, FCFM Universidad de Chile, Cap. 2-3, Santiago de Chile, 2004.
- [2] Leland H. Hemming, “Architectural Electromagnetic Shielding Handbook”, IEEE PRESS, New York, 1992.
- [3] Norman Ellis, “Interferencias Eléctricas Handbook”, Paraninfo, Madrid, 1999.
- [4] Karlsson, T. “The Topological Concept of Generalized Shield”, AFWL Interaction Note 461, Air Force Weapons Laboratory, Kirtland AFB, NM, Enero 1988.
- [5] Frederick M. Tesche, Michel V. Ianoz, Torbjörn Karlsson, “EMC Analysis Methods and Computational Models”, Wiley- Interscience, Canada, 1997.
- [6] Van Bladel, J., “Electromagnetic Fields”, McGraw Hill, New York, 1964.
- [7] Rikitake, T. “Magnetic and Electromagnetic Shielding”, D. Reidel Publishing Company, Japón, 1987.
- [8] Watson, J.K., “Applications of Magnetism”, publicado por el autor, University of Florida, Gainesville, FL, 1985.
- [9] B. Jacard H., “Apuntes de Campos Electromagnéticos”, Publicación T(P)/7 Universidad de Chile, Santiago, 1997.
- [10] FEKO Suite 5.2, Version 2.0.5, EM Software and Systems S.A (Pty) Ltd.(2006). Disponible online en: www.feko.info
- [11] M. D. Deshpande, “Electromagnetic Field Penetration Studies”, NASA/CR – 2000 - 210297, Langley Research Center, NYMA Inc., Hampton Virginia, Junio 2000.

- [12] C. J. Reddy y M. D. Deshpande, "User's Manual for CBS3DS Versión 1.0", NASA Contractor Report 198236, Oct. 1995.
- [13] V. Rajamani, C. F. Bunting, M.D. Deshpande, Z. A. Khan, "Validation of Modal/MoM in Shielding Effectiveness Studies of Rectangular Enclosures With Apertures", IEEE Transactions on EMC, Vol. 48, No. 2, Mayo 2006.
- [14] Díaz T. Marco, "Mediciones de campos eléctricos y magnéticos en las cercanías de instalaciones eléctricas", memoria para optar al título de Ingeniero Civil Electricista, FCFM Universidad de Chile, Santiago 2004.
- [15] Vance, E. F. & Graf, W., "The Role of Shielding in Interferente Control", IEEE Transaction Electromagnetic Comp., Vol. EMC – 30, No. 3, Agosto 1988, pag. 294- 297.
- [16] Karlsson, T., "On Grounding: Practical Procedures Based on Electromagnetic Theory", Proceedings of the 9th International Symposium and Technical Exhibition on EMC, Zurich, Marzo 3-5, 1987.
- [17] S.C.Jewell, "Aluminum foil RF Shielding Systems", ITEM, 1988.
- [18] "Shield system and sandwich seam for attenuation of clad metals for EMI room shielding", U.S. Patent 4 733 013 issued Mar. 22 1988.
- [19] Tech. Rep. 87.6.4, Ark Electronics, Inc., "Shielding effectiveness measurements of electromagnetic shielded enclosure."
- [20] Test Rep. ERC Corp., "Shielded Enclosure performance test report for Rantron Systems.", Sept. 1987.
- [21] CEBEMA, Computer and Business Equipment Manufacturers Association. Suite 1200, 1828 L Street, N. W., Washington, DC., CBEMA/ ESC5/ 75/ 31.
- [22] SAE.AE4, Society of Automotive Engineers, Subcommittee AE4 on Electromagnetic Compatibility. AIR – 1499: "Recommendation for Commercial EMC Susceptibility Standards."

[23] SAMA - Scientific Apparatus Makers Association, 1101 16th street, N.W., Washington, D.C., 20036.

[24] MIL- STD- 461B, Electromagnetic Emission and Susceptibility. Requirements for the Control of Electromagnetic Interference, 1 April 1980, Notice 1 (update), dated 5 January 1983.

[25] Imagen disponible Online en la dirección Web indicada a continuación:

<http://iescarin.educa.aragon.es/depart/biogeo/varios/BiologiaCurtis/Seccion%201/4-21.jpg>

[26] Hasselgren, L. & Luomi, J. "Geometrical Aspects of Magnetic Shielding at Extremely Low Frequencies", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 37, No. 3, August 1995.

[27] Antonini, G. & Cristina, S. "An Efficient Digital Controller for Active Shielding Circuits", Electromagnetic Compatibility, 2000. IEEE International Symposium on., Vol. 1, pages: 49 – 53, Washington, DC, USA.

ANEXO A

Anexo A-1 Extracto especificaciones técnicas TECNAI F20 UT.

3 Ambient conditions of the site

Some situations likely to be met, together with the ambient specifications are covered in this chapter. Should there be any doubt about the use of the proposed site, our team of experienced engineers will gladly advise as to the best course of action.

For a complete survey, refer to the checklist in [8 "Pre- installation check-list"](#). We recommend to re-check the site when equipment is placed that may affect the instrument.

Pre-installation measurement equipment

To meet the requirements for magnetic fields, vibrations and acoustical noise, these conditions must be measured using calibrated measurement equipment. FEI Company recommends using one combined pre-installation measurement kit, adapted for use by EOPD. This avoids confusion about the interpretation of specifications between EOPD and the service engineer doing the site survey.

The kit adaptation consists of:

- Measurements in the octave bands from 0.5 Hz upwards
- Pre-programmed modes for each type of measurement
- The use of templates, specific for each type of instrument, thus enabling an on-the-spot go/no go decision of this part of the specification.
- Specific user's manual

3.1 General

The following points should be taken into account when choosing a site for the microscope. It is not possible in this document to cover all the situations liable to be met.

Avoid:

- Rooms subject to heavy vibrations, e.g. near lift-shafts, over underground installations producing vibrations, adjacent to busy roads, near rooms housing heavy machines.
- Rooms subject to high levels of stray magnetic fields, e.g. near large electric motors, transformers, mains switch boxes, cable ducts, overlooking electric railways or tramways.
- The microscope column (compustage) lying directly in the air flow of the air-conditioning. (See figures 12 example of room layout including light and air conditioning and 13 Example of air conditioning inlets and outlets)

NOTE: For the UltraTwin, the design of the air-conditioning system must be such that the air flow required to cool the microscope area is minimal. This can best be achieved by splitting the air-conditioning system into two parts: one to cool the microscope area, and one to cool the service area.

- Places near heavy duty equipment or power supplies.
- Another instrument closer than 3 meters distant from this one.

3-2

10466 020630

Tecnai G² 20 Pre-installation

- The use of a common electrical ground to other equipment.
- Loud sound sources.
- Unnecessary items in the room.

Matters to consider are:

- If ambient conditions are liable to vary from those detailed in this chapter, a dust free, air-conditioned room is strongly recommended for the installation.
- Means must be provided to entirely eliminate natural lighting.
- An ambient noise level as low as possible (no audible sounds); preferably an anechoic room.
- If a main closed-circuit cooling unit is to be used in conjunction with the microscope (see [4.2.3 "Closed loop cooling units"](#)), there must be provision for it to stand at least 3 meters (10 feet) from the microscope (preferably in an adjoining room which must be ventilated).
- Heat dissipated into the air and into cooling water.
- Good ventilation.
- A low dust class atmosphere and washable wall covering will help. For the FEG a dust class of 1,000,000 is necessary.
- A floor covering (no carpet), that is easily cleaned, resistant to oil and chemicals, non-flammable and antistatic. For the UT a carpet is mandatory.

3.2

Heat dissipation

The nominal heat dissipation of the instrument depends on the setting and operating mode. The numbers below are estimated maximum values for the heat dissipation of the different parts intended for the design of the air-conditioning and cooling water supply

Dissipation in Watts	Heat dissipated into air of microscope room	Heat dissipated into air of service room	Heat dissipated into cooling water
Column (TWIN and S-TWIN), incl diff pump & elec console	500		2400
Column (U-TWIN), incl diff pump	500		1800 Tot.=1800+1200
Power cabinet		1200	
HT tank		200	
ZEM 300 (U-TWIN)		500	1200
Accessories (connected to power cabinet)	2300 (T&ST) 1700 (UT)		

Table 3-1 Heat dissipation

3-2

10466 020630

Tecnai G² 20 Pre-installation

NOTE: The primary cooling water of the ZEM300SW is connected and thus cooled by the outlet of the ZEM1000.

It is strongly recommended that all microscope rooms have a curtain that separates the microscope from the so-called service part. In order to optimally calculate the air-conditioning system capacity, the heat transferred into the environment is given per room.

The power supply units are equipped with ventilators, but do not have pipes to conduct the heat outside the room.

The STEM unit will dissipate about 800 Watt into the ambient air, divided over microscope and service room.

The dissipation of the outlets can contribute both to the microscope or service room, depending on the position of the accessories. Because the ZEM300SW in case of a U-Twin is connected to the outlets the dissipation is subtracted from the total value (2300W) of the outlets.

3.3 High voltage and X-ray safety regulations

Because of the use of a max. accelerating voltage of 200 kV, local safety regulations concerning equipment employing such voltages must be checked and observed at installation.

Additionally, local X-ray safety requirements must be fulfilled. The maximum radiation leaving the microscope is under all circumstances < 1 µS/hr at 10 cm distance from any surface.

In order to test this specification a suitable X-ray meter must be present during installation (e.g. the Victoreen 190 + 190RP1).

3.4 Temperature specification

Recommended ambient temperature (for operator)	20 °C
Maximum ambient temperature range for operation within specification	18 °C to 23 °C
Maximum ambient temperature range without damage to the microscope	5 °C to 40 °C
Relative humidity at 20°C	<80%, dewpoint below 18°C
Around the Compustage: Maximum permissible rate of temperature change for operation within specifications Air flow v_a at the column away from the column	0.5 °C/h temperature drift 0.05 °C/min. fluctuations <5m/min

Table 3-2 Temperature specification

3.5 Magnetic fields

3.5.1 Magnetic field specification

It is important when placing the microscope to avoid locations subject to strong magnetic fields. The microscope is most affected by stray fields in the horizontal plane.

For measuring magnetic fields, we strongly advise the use of the Bartington magnetic field sensor. This sensor is capable of measuring magnetic fields down to DC level, thus making it much more reliable than the test coil which was unable to measure magnetic fields at low frequencies.

The maximum tolerable interfering stray field (measured at the position of the objective lens) at which the guaranteed resolving power can be achieved is:

Type	Horizontal (x, y)	Vertical (z)	Comment
Tecnai 20	350nT _{p-p} 64mV _{p-p}	650nT _{p-p} 118mV _{p-p}	mV (50Hz)
Tecnai 20 UT	220nT _{p-p} 40mV _{p-p}	410nT _{p-p} 75mV _{p-p}	mV (50Hz)
Tecnai F20	125nT _{p-p} 23mV _{p-p}	125nT _{p-p} 23mV _{p-p}	for 0.3 nm spot mV (50Hz)

Table 3-3 Magnetic field specification

The values for TWIN, SuperTWIN and UltraTWIN are determined by the point resolution specifications. The values for the FEG are determined by the specified minimum spot size and the information limit.

The given values are valid for a single frequency stray field. If the stray field consists of a number of significant frequencies, their individual contributions should be added linearly and the sum may not exceed the given values.

This specification must be met throughout the entire room in which the microscope is to be located.

The accessory mains matching transformer must be installed at a distance of at least 3 meters from both the microscope column and the high tension generator to minimize stray fields. For the same reason the power supply unit must be installed preferably as far away as possible from the microscope column and the high tension generator.

For the UltraTwin:

The subsidiary Zephyr units ZEM 300SW must be located in the service area and can best be placed next to the power supply unit.

If diffractograms must be recorded, the following factors must also be taken into account:

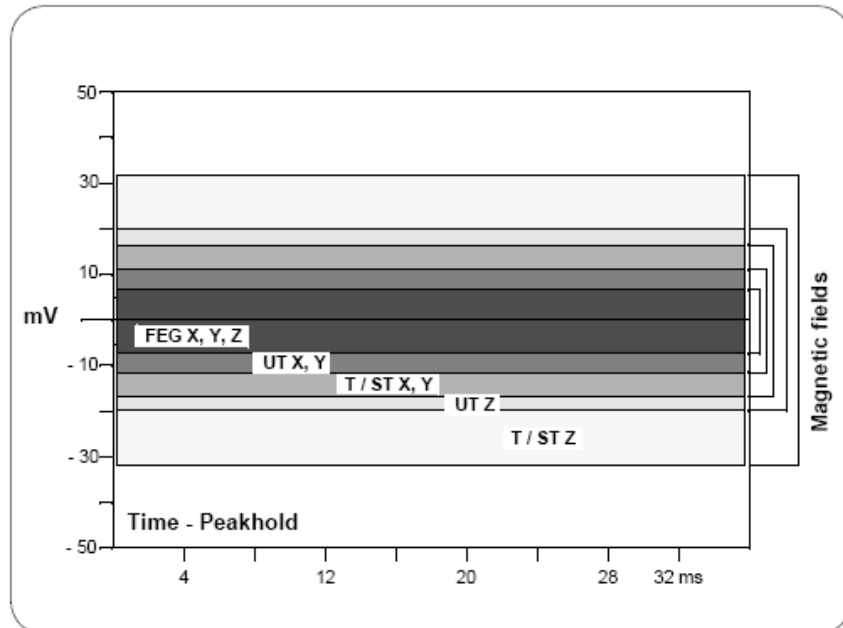
- The location of the power cabinet is critical: for optimum performance of the microscope the power cabinet is to be located as far away as possible.
- The location of the HT tank w.r.t the power supply unit is critical and should be located as far away as possible.
- The location of the HT tank w.r.t the microscope is critical and should be located as far away as possible.

3.5.2 Magnetic field measurement

For the magnetic field measurement the following measuring equipment must be present:

- Bartington meter
- Hewlett Packard analyzer model HP3560A.

For information on the measuring equipment required, specification and typical test results, refer for Hewlett Packard to the Quick Reference Manual or the manual "Site selection and pre-installation considerations for EM's" ordering code 4822 870 10439.



EM8109

Fig. 3-1 Magnetic field measurement screen (all types)

3.6 Mechanical vibration specification

As excessive mechanical vibrations seriously affect the performance of the microscope, it is important when choosing a site to make sure that this type of interference is not normally present.

The maximum allowable mechanical vibration levels at the position where the microscope will be installed are given in the following figures. The RMS value of the velocity as a function of the frequency is plotted. There are two curves.

If all frequency components are below curve I the high resolution performance will not be affected. If there are components which lie above curve I and below curve II, the measurement results must be sent to Supply Centre Service for further analysis. SC-service must decide if the microscope site is acceptable. If there are frequency components which rises above curve II the site is unsuitable for installation.

For the measurement the following measuring equipment must be present:

- Sensor
- Hewlett Packard analyzer model HP3560A.

For information on the measuring equipment required, specification and typical test results, refer for Hewlett Packard to the Quick Reference Manual or the manual "Site selection and pre-installation considerations for EM's" ordering code 4822 870 10439.

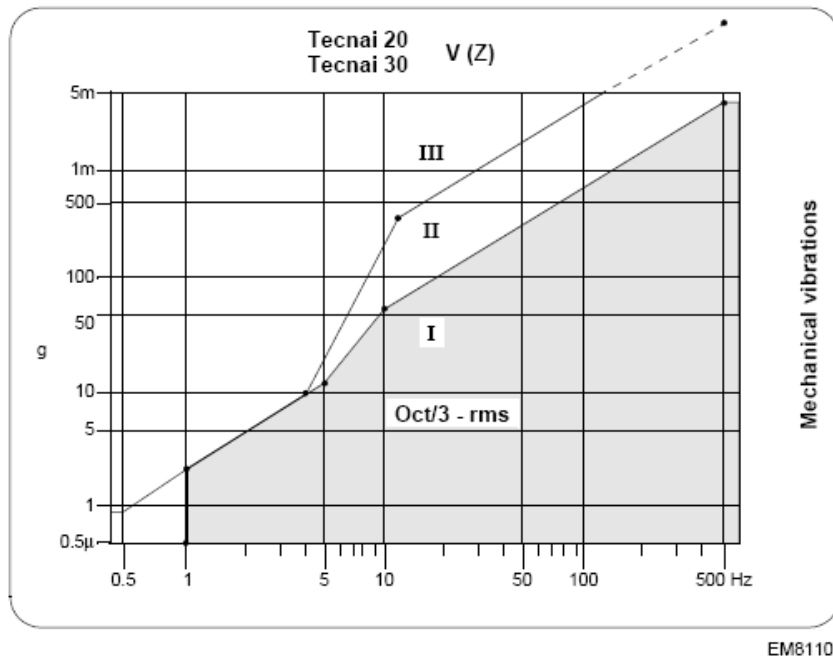
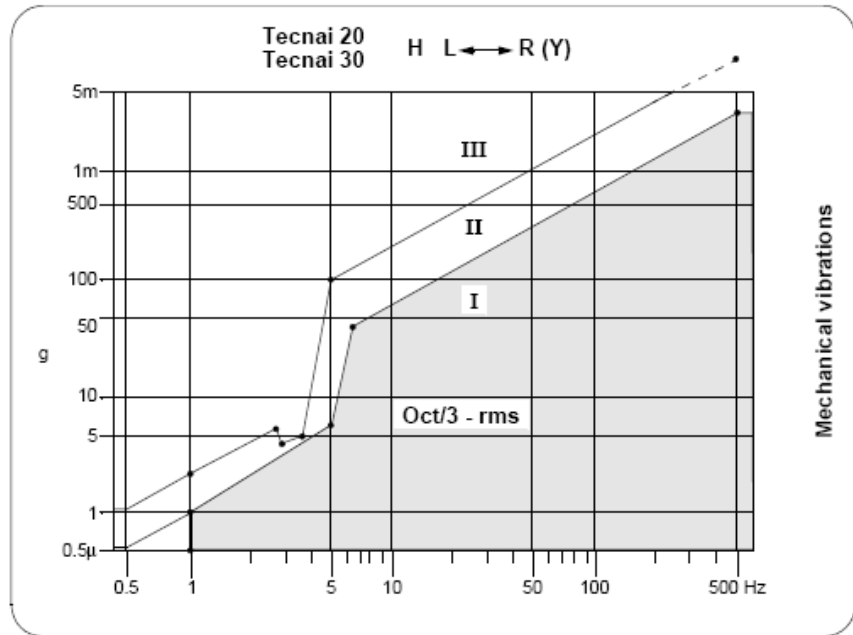
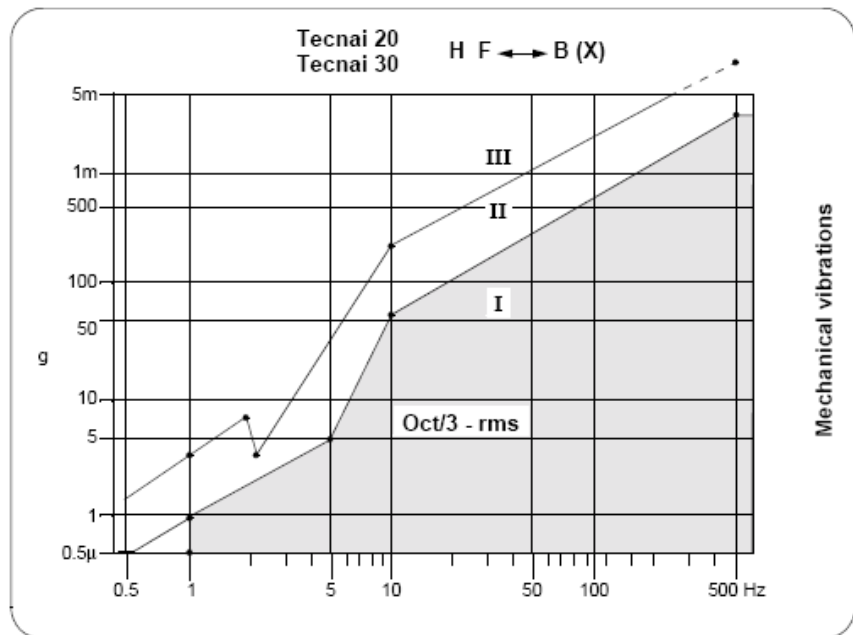


Fig. 3-2 Mechanical vibration measurement (Vertical)



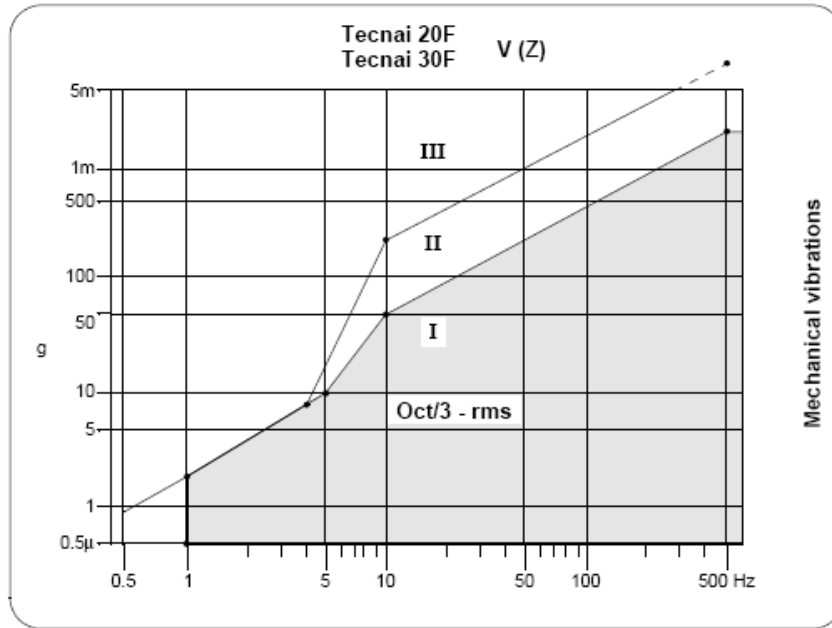
EM8111

Fig. 3-3 Mechanical vibration measurement (Horizontal left-right)



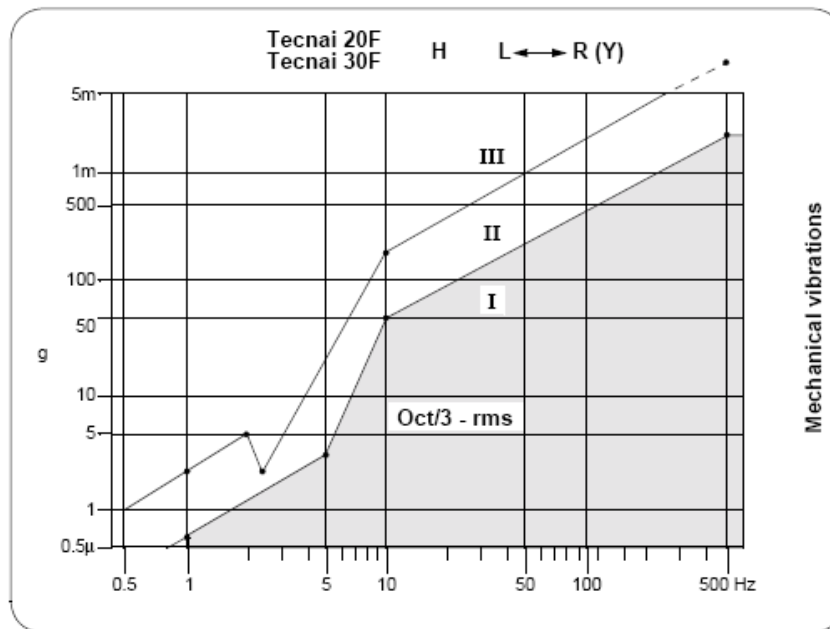
EM8112

Fig. 3-4 Mechanical vibration measurement (Horizontal front-back)



EM8113

Fig. 3-5 FEG Mechanical vibration measurement (Vertical)



EM8114

Fig. 3-6 FEG Mechanical vibration measurement (Horizontal left-right)

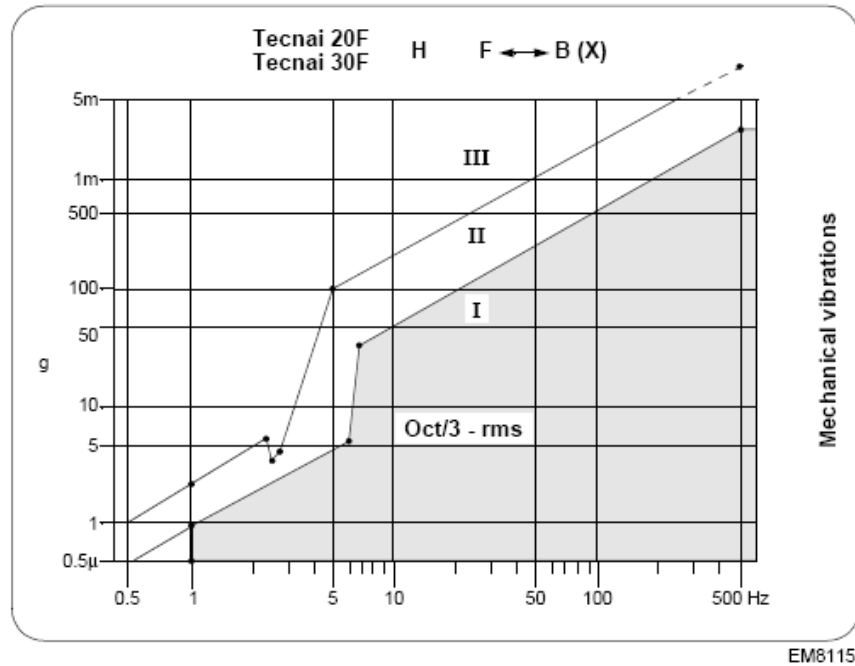


Fig. 3-7 FEG Mechanical vibration measurement (Horizontal front-back)

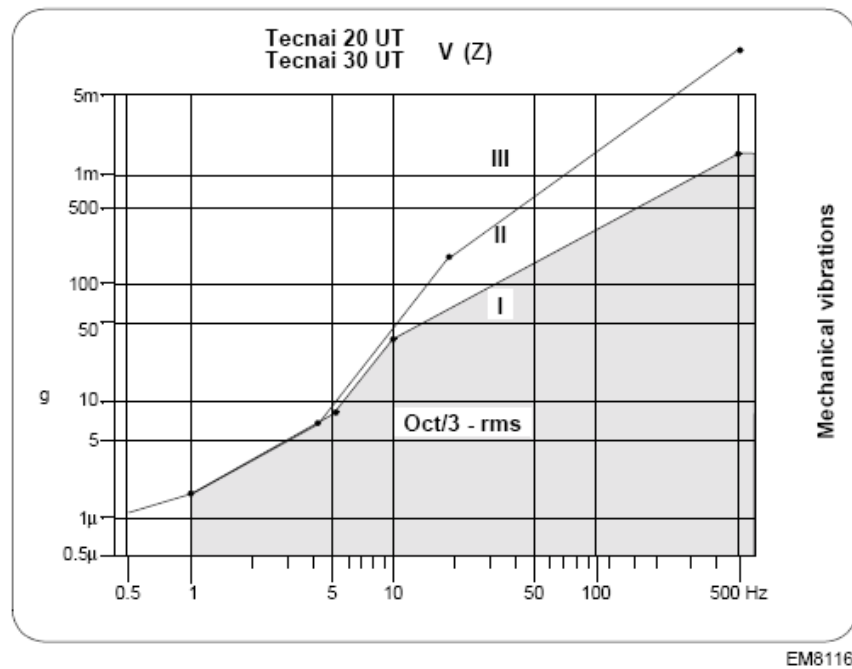


Fig. 3-8 UT Mechanical vibration measurement (Vertical)

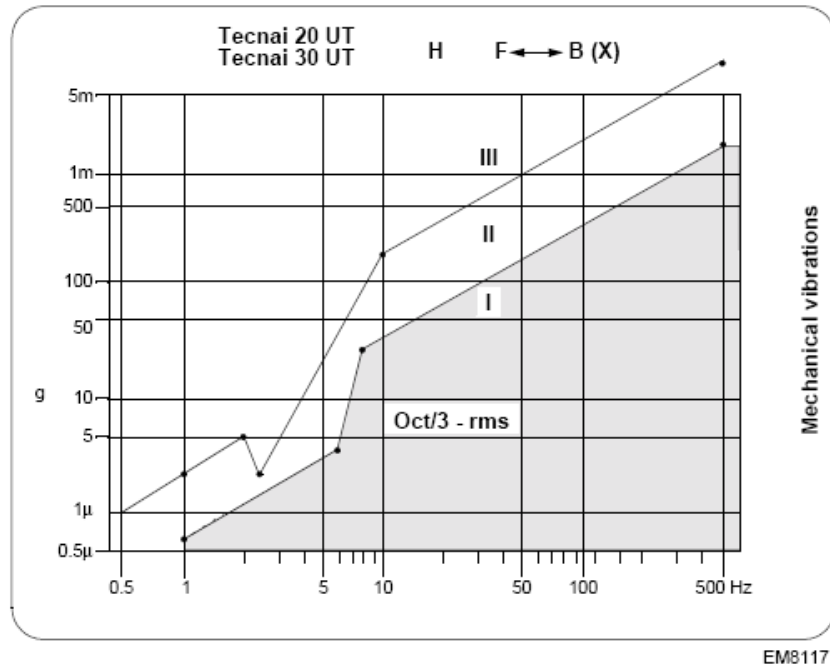


Fig. 3-9 UT Mechanical vibration measurement (Horizontal front-back)

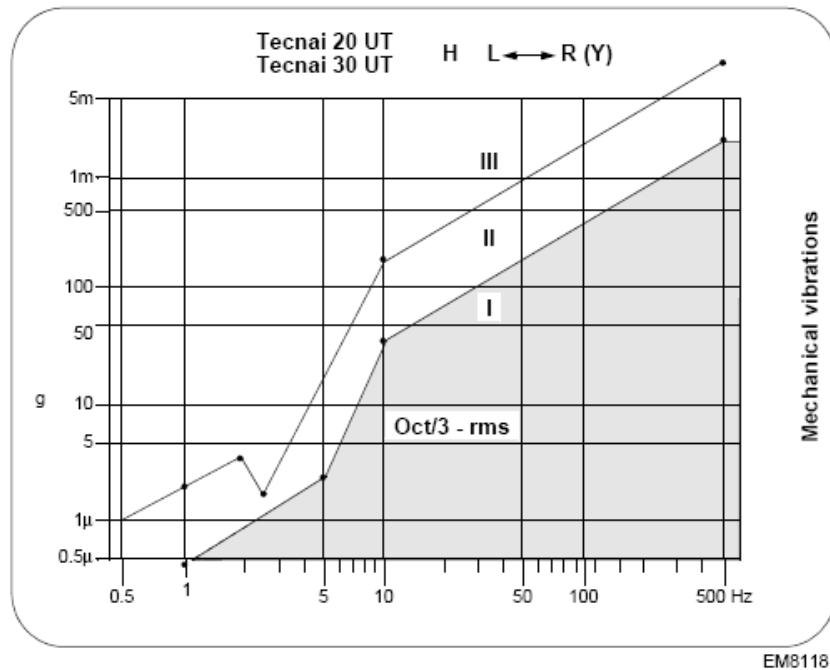


Fig. 3-10 UT Mechanical vibration measurement (Horizontal left-right)

3.6.1 Mechanical vibration evaluation and interpretation

The proposed procedure at the site is to measure a 1/3 octave vibration spectrum during a sufficiently long time to get enough low frequency information. Then the graphical specification of this direction is compared to this measurement. Now one of the following conclusions can be drawn:

1. In all points the measured level is clearly below curve I. This means the **site is appropriate!**
2. In only one point the level is below curve II, but in *all other points* at least a factor three lower. This means the **site is appropriate!**
3. When two or more points are below curve II consultation of an expert is required! (This situation is not likely to occur in practise very often, but it is the most critical one: the several points do not necessarily have to be *over the limit* to result in an inappropriate site!)
4. One or more points are clearly above curve III. This means the **site is NOT appropriate.**

3.7 Acoustical vibration specification

Acoustical noise will affect the high resolution performance of the microscope. The acoustical noise level must be as low as possible. For Standard and FEG instruments, the ambient noise must be < 70dB for the whole spectrum and < 55dB per individual third octave band for the frequency range between 10 Hz and 10000 Hz. For the UT, **no audible sounds are allowed**; the room must be acoustically "dead".

The following recommendations may help in achieving this:

- Cover the floor (and if necessary also the walls) with short-pile carpet that is easily cleaned, impervious to oil and chemicals, and non-flammable;
- The power cabinet, the Zephyr 300SW, the HT tank and the mains matching transformer must be located behind a curtain (see [Figure 9-4](#) to [Figure 9-8](#) incl);
- One of two opposite walls must be covered with an acoustic absorbing material;
- The air-conditioning must be absolutely silent. See [Figure 9-15](#)

For the measurement the following measuring equipment must be present:

- Sensor
- Hewlett Packard analyzer model HP3560A.

For information on the measuring equipment required, specification and typical test results, refer for Hewlett Packard to the Quick Reference Manual or the manual "Site selection and pre-installation considerations for EM's" ordering code 4822 870 10439.

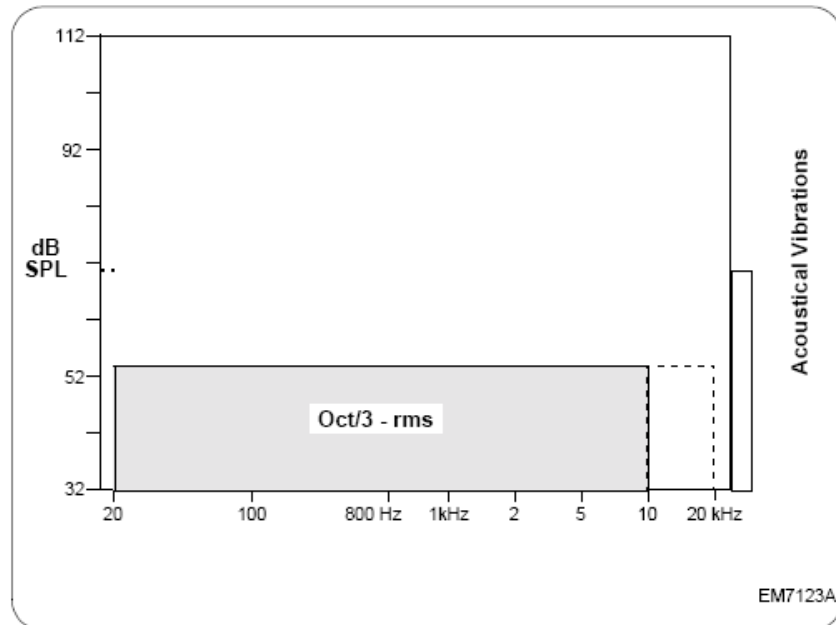


Fig. 3-11 Acoustic measurement screen (all types)

3.7.1

Acoustical vibration evaluation and interpretation

The proposed procedure at the site is to measure a 1/3 octave acoustic spectrum during minimal 20 sec. in the neighbourhood (approx. 0.5m distance) of the microscope. Then the graphical specification of this direction is compared to the measurement. Now one of the following conclusions can be drawn:

1. In all points the measured level is clearly below the specification. This means the **site is appropriate!**
2. In only one point the level is just outside the specified limit, but in *all other points* at least a factor three lower. This means the **site is appropriate!**
3. When two or more points are about the specified limit, consultation of an expert is required! (This situation is not likely to occur in practise very often, but it is the most critical one: the several points do not necessarily have to be *over the limit* to result in an inappropriate site!)
4. One or more points are clearly above the specified limit. This means the **site is NOT appropriate.**

3.8 Room Cleanliness (required for FEG, recommended for other versions)

The room must be as free as possible of dust: the advised dust class is 1,000,000.

The reason for this is that the performance of a FEG instrument (but also all other versions) is highly influenced by the concentration of dust particles in the emission chamber or filament region. Too high a dust concentration in the emission chamber will result in an unstable high tension and/or danger of damaging the tip.

Dust class 1,000,000 means that in the microscope room a certain maximum number of particles/cubic foot is allowed according to the following graph:

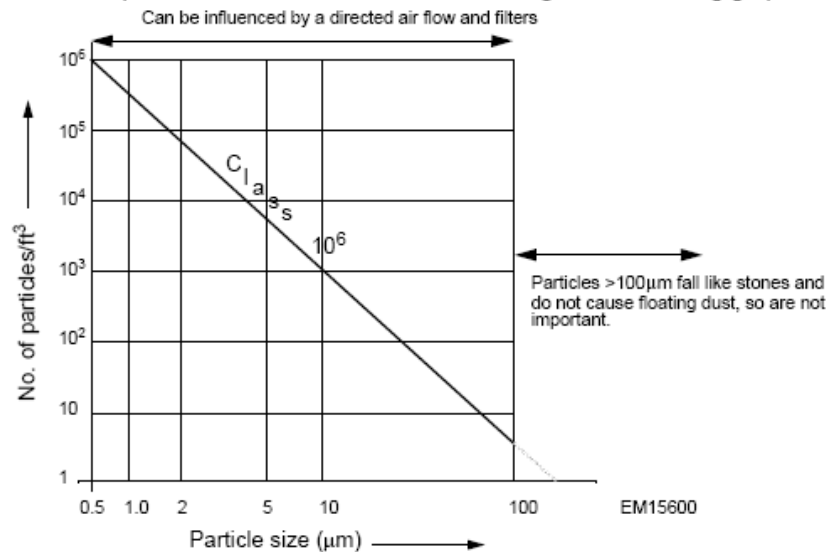


Fig. 3-12 Dust class 1,000,000 graph

Measuring if the room fulfils dust class 1,000,000 is possible, but is difficult and expensive.

For this reason, if measurement is out of the question, be sure that the room fulfils the following requirements:

1. A directed air flow with use of filters.
2. Regular (about three times a week) floor washing.
3. The ceiling must be hard, but not brittle.
4. Painted walls (washable).
5. If the room door(s) open into a very dusty room, a sort of "air-lock" should be made.
6. Make sure that if the room is to be carpeted, the carpet is intended for acoustic reasons and depending on the material selected will reduce the cleanliness of the room. Therefore a carpet with a short pile that is easily cleaned must be chosen. A vacuum cleaner (with micro filter) must be present in the room. This vacuum cleaner should only be used for the microscope and not to clean the room. In other words: **Avoid dust.**

Anexo A-2 Rendimiento de diversos tipos de blindajes.

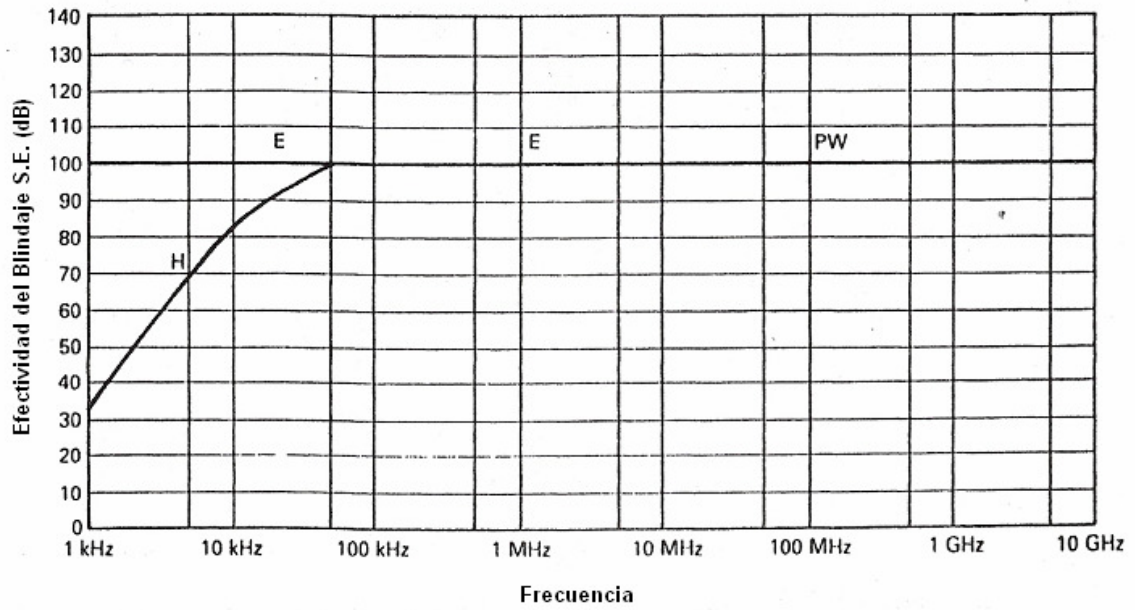


Figura A2.1: Rendimiento característico de un blindaje de “Tipo Modular” con Acero Galvanizado [2].

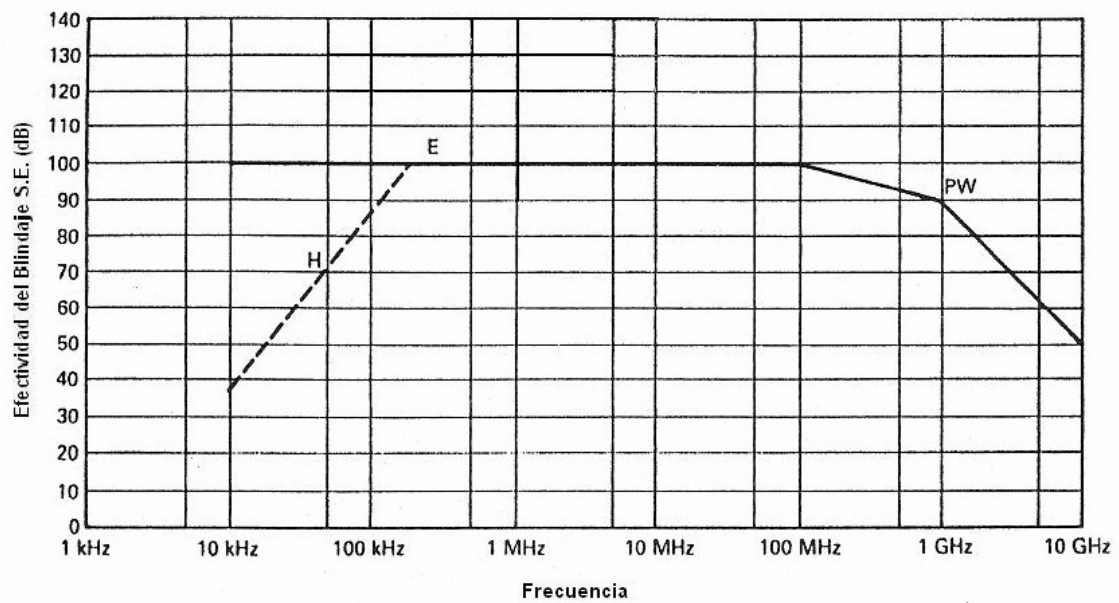


Figura A2.2: Rendimiento característico de un sistema de blindaje modular mediante dos capas de láminas de Cobre [2].

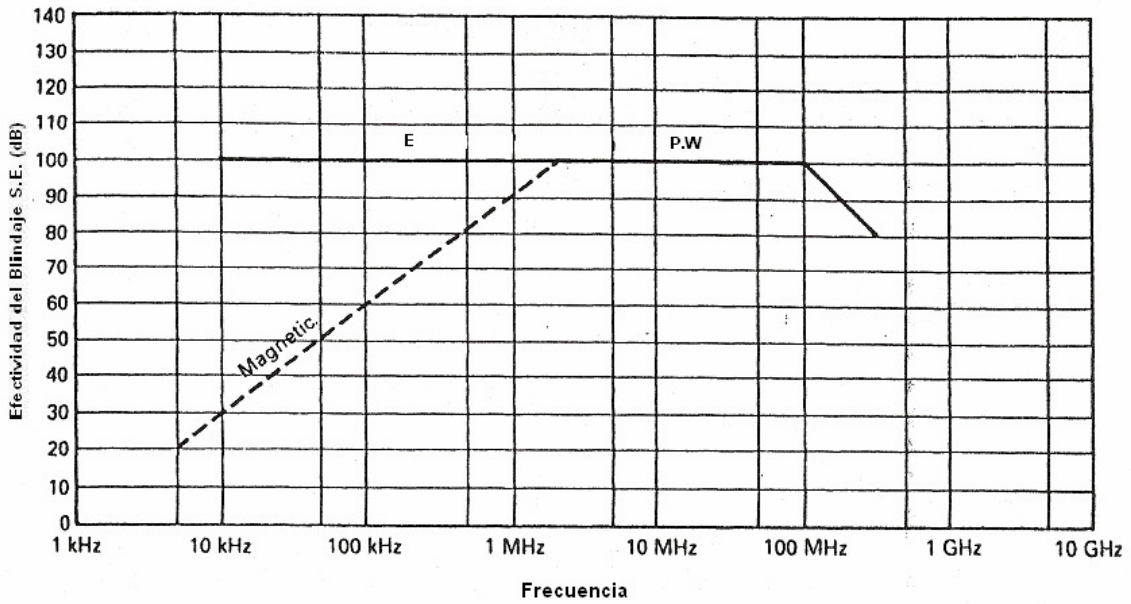


Figura A2.3: Rendimiento característico de un blindaje modular con materiales no ferrosos para instalaciones NMR [2].

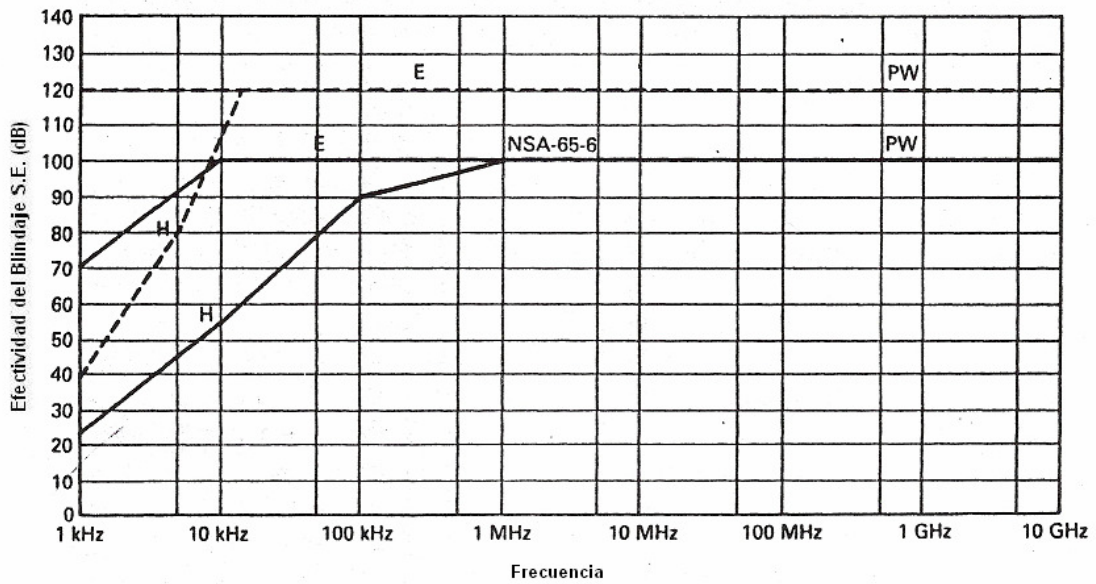


Figura A2.4: Rendimiento característico de un blindaje con láminas soldadas [2].

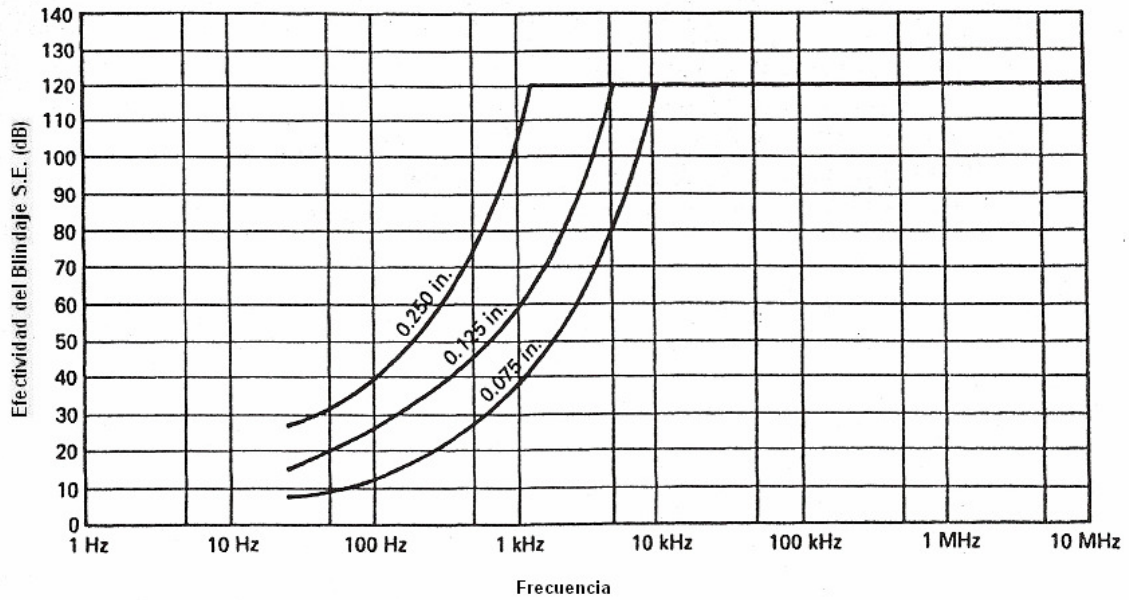


Figura A2.5: Efectividad magnética de blindajes con sistema de láminas soldadas en función de la frecuencia y el espesor de las láminas [2].

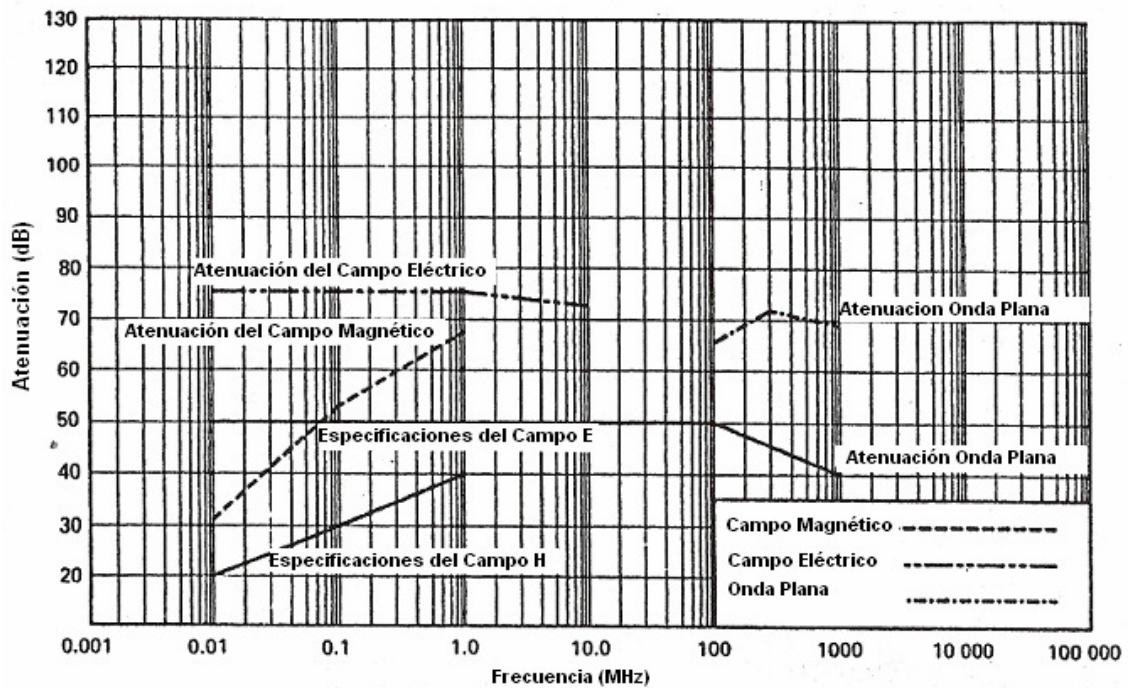


Figura A2.6: Rendimiento alcanzado por un blindaje de tipo "Arquitectónico" realizado con láminas delgadas de aluminio [2].

Anexo A-3 Espectro electromagnético completo.

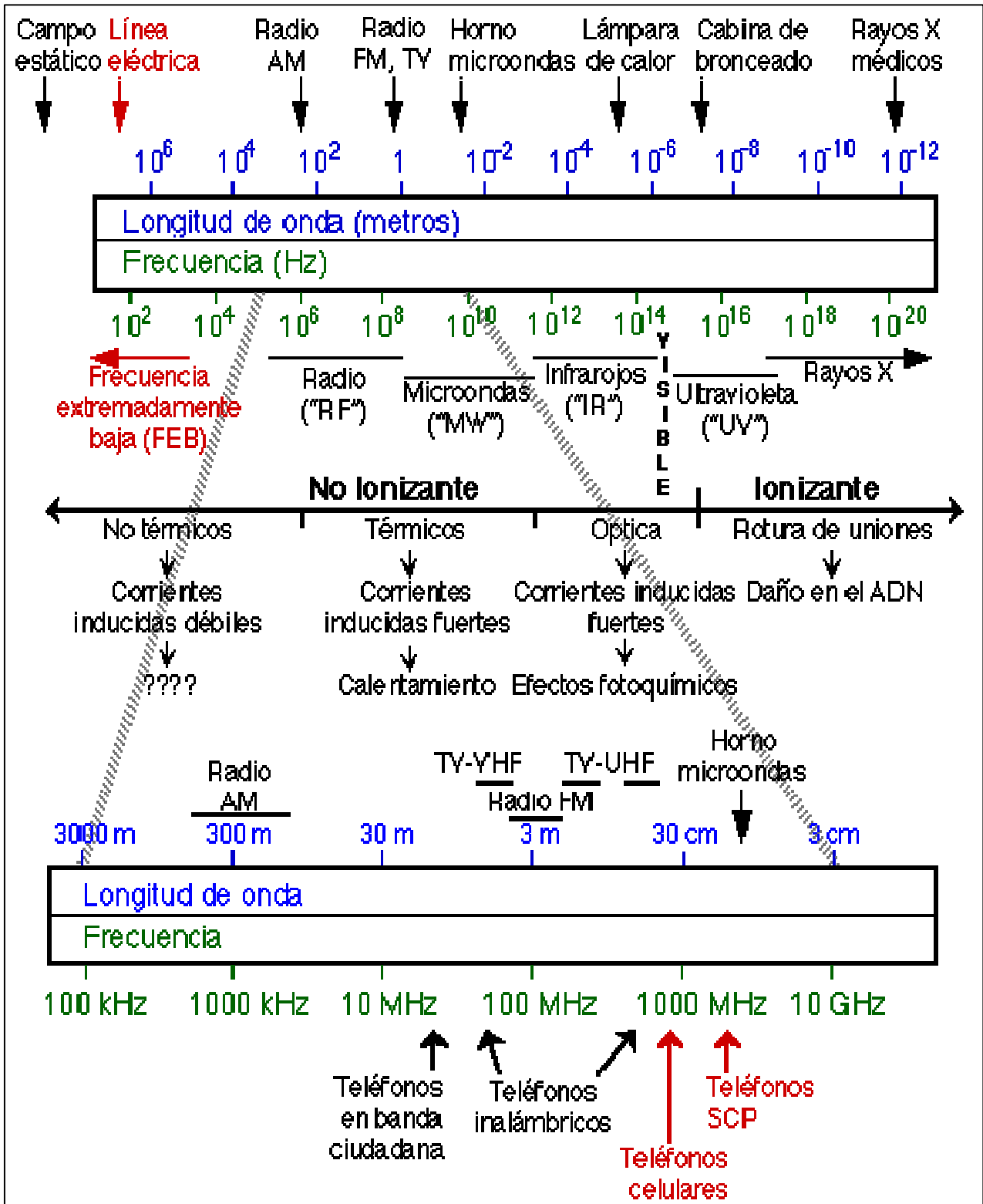


Figura A.3.1: Espectro electromagnético completo. Fuente de la cual se obtuvo la información:

<http://www.arp-sapc.org/articulos/antenas2.html>.

ANEXO B

Anexo B-1 Conductividad y Permeabilidad relativa de materiales.

Material	σ (S/m)	μ_r
Selenium	83×10^6	1
Silver	62×10^6	1
Copper	58×10^6	1
Gold	41×10^6	1
Aluminum	38×10^6	1
Chromium	38×10^6	1
Brass ^a	26×10^6	1
Tungsten	18×10^6	1
Zinc	17×10^6	1
Nickel	14×10^6	max 600
Cobalt	10×10^6	max 250
Iron ^b	10×10^6	max 4000–8000
Platinum	9.5×10^6	1
Tin	8.8×10^6	1
Lead	4.6×10^6	1
Lead dioxide (PbO ₂)	1.1×10^6	1
Mu-metal ^c	$2 \times 10^6 - 4 \times 10^6$	max 100,000
Supermalloy ^d	1.7×10^6	max 1,000,000
Stainless steel ^e	1.1×10^6	1
Mercury	1.0×10^6	1
Graphite	71×10^3	1
Seawater	3	1

^a 66% Cu, 34% Zn.

^b The figures in the table refer to technically pure iron. Iron of the highest possible purity can have $\mu_r = 25,000-350,000$. The conductivity of steel is somewhat lower than that of pure iron. In the case of hard steel it is significantly lower: $\approx 1-6$ MS/m. It is meaningless to give permeability values for different types of steel here, as they vary within wide limits and with the field strength. When performing a shielding calculation, you should therefore try to find out what the magnetization curve is for the type of iron or steel concerned. A value often used for “unknown” iron is $\mu_r = 400$, which should provide a fairly accurate result. ($B_{max} \approx 2$ T.)

^c 71–78% Ni, 4.3–6% Cu, 0–2%; $B_{max} = 0.72$ T.

^d 79% Ni, 5% Mo; $B_{max} = 0.8$ T.

^e 0.1% C, 18% Cr, 8% Ni.

Tabla B1.1: Listado de Conductividades y Permeabilidades Relativas de un grupo selecto de materiales [5].

Anexo B-2 Tablas de constantes físicas.

Constante	Magnitud
μ_0 Permeabilidad del espacio libre	$4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m} \approx 1.257 \times 10^{-6} \text{ H/m}$
ϵ_0 Permitividad en el espacio libre	$8.85415 \times 10^{-12} \text{ F/m} \approx 1/(36\pi) \times 10^{-9} \text{ F/m}$
c Velocidad de la Luz en el vacío	$1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0} = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$
Z_0 Impedancia del espacio libre	$\sqrt{\mu_0/\epsilon_0} \approx 120\pi \Omega \approx 377 \Omega$

Tabla B2.1: Resumen con las constantes básicas en el estudio del electromagnetismo & EMC [5].

Material	Class	Relative Permeability (μ_r)
Bismuth	Diamagnetic	0.999834
Silver	Diamagnetic	0.99998
Lead	Diamagnetic	0.999983
Copper	Diamagnetic	0.999991
Water	Diamagnetic	0.999991
Vacuum	Nonmagnetic	1.0
Air	Paramagnetic	1.000004
Aluminum	Paramagnetic	1.00002
Nickel chloride	Paramagnetic	1.00004
Palladium	Paramagnetic	1.0008
Cobalt	Ferromagnetic	250
Nickel	Ferromagnetic	600
Mild steel	Ferromagnetic	2,000
Iron	Ferromagnetic	5,000
Silicon iron	Ferromagnetic	7,000
Mu-metal	Ferromagnetic	100,000
Purified iron	Ferromagnetic	200,000
Supermalloy	Ferromagnetic	1,000,000

Source: C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, Wiley, New York, 1989. (Copyright © 1989 John Wiley & Sons, Inc. Reprinted by permission from the publisher.)

Tabla B2.2: Aproximación estática de las “Permeabilidades Relativas” de materiales magnéticos [5].

<i>Material</i>	<i>Static Dielectric Constant (ϵ_r)</i>
Air	1.0006
Styrofoam	1.03
Paraffin	2.1
Teflon	2.1
Plywood	2.1
RT/duroid 5880	2.20
Polyethylene	2.26
RT/duroid 5870	2.35
Glass-reinforced Teflon (microfiber)	2.32–2.40
Teflon quartz (woven)	2.47
Glass-reinforced Teflon (woven)	2.40–2.62
Cross-linked polystyrene (unreinforced)	2.56
Polyphenylene oxide (PPO)	2.55
Glass-reinforced polystyrene	2.62
Amber	3.0
Soil (dry)	3.0
Rubber	3.0
Plexiglas	3.4
Lucite	3.6
Fused silica	3.78
Nylon (solid)	3.8
Quartz	3.8
Sulfur	4.0
Bakelite	4.8
Formica	5.0
Lead glass	6.0
Mica	6.0
Beryllium oxide (BeO)	6.8–7.0
Marble	8.0
Sapphire	$\epsilon_x = \epsilon_y = 9.4, \epsilon_z = 11.6$
Flint glass	10.0
Ferrite (Fe_2O_3)	12.0–16.0
Silicon (Si)	12.0
Gallium arsenide (GaAs)	13.0
Ammonia (liquid)	22.0
Glycerin	50.0
Water	81.0
Rutile (TiO_2)	$\epsilon_x = \epsilon_y = 8.09, \epsilon_z = 173$

Source: C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, Wiley, New York, 1989. (Copyright © 1989 John Wiley & Sons, Inc. Reprinted by permission from the publisher.)

Tabla B2.3: Aproximación estática de las “Permitividades Relativas” (o también llamadas “constantes dieléctricas”) de materiales dieléctricos [5].

Material	Class	Conductivity σ (S/m)
Fused quartz	Insulator	$\sim 10^{-17}$
Sulfur	Insulator	$\sim 10^{-15}$
Mica	Insulator	$\sim 10^{-15}$
Porcelain	Insulator	$\sim 10^{-14}$
Glass	Insulator	$\sim 10^{-12}$
Bakelite	Insulator	$\sim 10^{-9}$
Distilled water	Insulator	$\sim 10^{-4}$
Fused silica	Semiconductor	$\sim 2.1 \times 10^{-4}$
Cross-linked polystyrene (unreinforced)	Semiconductor	$\sim 3.7 \times 10^{-4}$
Beryllium oxide (BeO) ^a	Semiconductor	$\sim 3.9 \times 10^{-4}$
Intrinsic silicon	Semiconductor	$\sim 4.39 \times 10^{-4}$
Sapphire ^a	Semiconductor	$\sim 5.5 \times 10^{-4}$
Glass-reinforced Teflon (microfiber) ^a	Semiconductor	$\sim 7.8 \times 10^{-4}$
Dry soil	Semiconductor	$\sim 10^{-4} - 10^{-3}$
Ferrite (Fe ₂ O ₃) ^a	Semiconductor	$\sim 1.3 \times 10^{-3}$
Glass-reinforced polystyrene ^a	Semiconductor	$\sim 1.45 \times 10^{-3}$
Glass-reinforced Teflon (woven) ^a	Semiconductor	$\sim 2.43 \times 10^{-3}$
Plexiglas ^a	Semiconductor	$\sim 5.1 \times 10^{-3}$
Gallium arsenide (GaAs) ^a	Semiconductor	$\sim 8 \times 10^{-3}$
Wet Soil	Semiconductor	$\sim 10^{-3} - 10^{-2}$
Freshwater	Semiconductor	$\sim 10^{-2}$
Human and animal tissue	Semiconductor	$\sim 0.2 - 0.7$
Intrinsic germanium	Semiconductor	~ 2.227
Seawater	Semiconductor	~ 4.0
Tellurium	Conductor	$\sim 5.0 \times 10^3$
Carbon	Conductor	$\sim 3.0 \times 10^4$
Graphite	Conductor	$\sim 3.0 \times 10^4$
Cast iron	Conductor	$\sim 10^5$
Mercury	Conductor	10^6
Nichrome	Conductor	10^6
Silicon steel	Conductor	$\sim 2.0 \times 10^6$
German silver	Conductor	2.0×10^6
Lead	Conductor	5.0×10^6
Tin	Conductor	9.0×10^6
Iron	Conductor	1.03×10^7
Nickel	Conductor	1.45×10^7
Zinc	Conductor	1.7×10^7
Tungsten	Conductor	1.83×10^7
Brass	Conductor	2.56×10^7
Aluminum	Conductor	3.96×10^7
Gold	Conductor	4.1×10^7
Copper	Conductor	5.76×10^7
Silver	Conductor	6.1×10^7

Source: C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, Wiley, New York, 1989. (Copyright © John Wiley & Sons, Inc. Reprinted by permission from the publisher.)

^a For most semiconductors the conductivities are representative for a frequency of about 10 GHz.

Tabla B2.4: Conductividades “Típicas” de materiales: aislantes, semiconductores y conductores [5].

ANEXO C

Anexo C-1 Cálculo de algunas transformadas de Fourier y expresiones reducidas.

A. Cálculo de las Transformadas de Fourier Φ_{rpqy} y Ψ_{rpqx} .

En el presente anexo, se pretende calcular las Transformadas de Fourier: Φ_{rpqy} y Ψ_{rpqx} , de las funciones Φ_{rpqy} y Ψ_{rpqx} respectivamente. Por lo tanto, utilizando la definición de la función:

$$\Psi_{rpqx}(k_x, k_y) = \iint_r \Psi_{rpqy} \cdot e^{-jk_x x - jk_y y} dx dy \tag{C1.A.1}$$

La Transformada de Fourier Ψ_{rpqx} puede ser escrita como [11]:

$$\Psi_{rpqx} = \frac{L_r W_r}{4j} \cdot e^{-jk_x x_r - jk_y y_r} \left[e^{j\frac{p\pi}{2}} \cdot \frac{\text{sen}\left(\frac{p\pi}{2} - \frac{k_x L_r}{2}\right)}{\frac{p\pi}{2} - \frac{k_x L_r}{2}} - e^{-j\frac{p\pi}{2}} \cdot \frac{\text{sen}\left(\frac{p\pi}{2} + \frac{k_x L_r}{2}\right)}{\frac{p\pi}{2} + \frac{k_x L_r}{2}} \right] \tag{C1.A.2}$$

$$\cdot \left[e^{j\frac{q\pi}{2}} \cdot \frac{\text{sen}\left(\frac{q\pi}{2} - \frac{k_y W_r}{2}\right)}{\frac{q\pi}{2} - \frac{k_y W_r}{2}} + e^{-j\frac{q\pi}{2}} \cdot \frac{\text{sen}\left(\frac{q\pi}{2} + \frac{k_y W_r}{2}\right)}{\frac{q\pi}{2} + \frac{k_y W_r}{2}} \right]$$

Si siguiendo el mismo procedimiento anterior pero para Φ_{rpqy} , se tiene entonces que:

$$\Phi_{rpqy} = \frac{L_r W_r}{4j} \cdot e^{-jk_x x_r - jk_y y_r} \left[e^{j\frac{p\pi}{2}} \cdot \frac{\text{sen}\left(\frac{p\pi}{2} - \frac{k_x L_r}{2}\right)}{\frac{p\pi}{2} - \frac{k_x L_r}{2}} + e^{-j\frac{p\pi}{2}} \cdot \frac{\text{sen}\left(\frac{p\pi}{2} + \frac{k_x L_r}{2}\right)}{\frac{p\pi}{2} + \frac{k_x L_r}{2}} \right] \tag{C1.A.3}$$

$$\cdot \left[e^{j\frac{q\pi}{2}} \cdot \frac{\text{sen}\left(\frac{q\pi}{2} - \frac{k_y W_r}{2}\right)}{\frac{q\pi}{2} - \frac{k_y W_r}{2}} - e^{-j\frac{q\pi}{2}} \cdot \frac{\text{sen}\left(\frac{q\pi}{2} + \frac{k_y W_r}{2}\right)}{\frac{q\pi}{2} + \frac{k_y W_r}{2}} \right]$$

Los conjugados se obtienen reemplazando k_x, k_y por $-k_x, -k_y$, respectivamente.

B. Cálculo de la expresión reducida I_{rpqmnx} .

Para comenzar, se tiene la siguiente integral:

$$\iint_r \Psi_{rpqx}(x', y') \operatorname{sen}\left(\frac{m\pi x'}{a}\right) \cdot \cos\left(\frac{n\pi y'}{b}\right) dx' dy' \quad (\text{C1.B.1})$$

Evaluando en forma cerrada y sustituyendo $\Psi_{rpqx}(x', y')$, la expresión para I_{rpqmnx} puede ser escrita como:

$$\int_{-\frac{W_r}{2}}^{\frac{W_r}{2}} \int_{-\frac{L_r}{2}}^{\frac{L_r}{2}} \operatorname{sen}\left(\frac{p\pi}{L_r} \cdot \left(\frac{L_r}{2} + x'\right)\right) \cdot \cos\left(\frac{q\pi}{W_r} \cdot \left(\frac{W_r}{2} + y'\right)\right) \cdot \operatorname{sen}\left(\frac{m\pi(x'+x_r)}{a}\right) \cdot \cos\left(\frac{n\pi(y'+y_r)}{b}\right) dx' dy' \quad (\text{C1.B.2})$$

En la ecuación anterior x_r, y_r son las coordenadas del centro de la apertura r -ésima. Desarrollando dicha integral, la expresión para I_{rpqmnx} puede ser escrita como [11]:

$$I_{rpqmnx} = -\frac{p\pi L_r}{(p\pi)^2 - \left(\frac{m\pi L_r}{a}\right)^2} \cdot \left[\cos(p\pi) \cdot \operatorname{sen}\left(\frac{m\pi}{a} \left(\frac{L_r}{2} + x_r\right)\right) + \operatorname{sen}\left(\frac{m\pi}{a} \left(\frac{L_r}{2} - x_r\right)\right) \right] \\ - \frac{\frac{n\pi}{b}}{\left(\frac{q\pi}{W_r}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \cdot \left[\cos(q\pi) \cdot \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi}{b} \left(\frac{W_r}{2} + y_r\right)\right) + \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi}{b} \left(\frac{W_r}{2} - y_r\right)\right) \right] \quad (\text{C1.B.3})$$

C. Cálculo de la expresión reducida I_{rpqmy} .

Para comenzar, se tiene la siguiente integral:

$$\iint_r \Phi_{rpqy}(x', y') \cos\left(\frac{m\pi x'}{a}\right) \cdot \text{sen}\left(\frac{n\pi y'}{b}\right) dx' dy' \quad (\text{C1.C.1})$$

Evaluando en forma cerrada y sustituyendo $\Phi_{rpqy}(x', y')$, la expresión para I_{rpqmy} puede ser escrita como:

$$\int_{-\frac{W_r}{2}}^{\frac{W_r}{2}} \int_{-\frac{L_r}{2}}^{\frac{L_r}{2}} \cos\left(\frac{p\pi}{L_r} \cdot \left(\frac{L_r}{2} + x'\right)\right) \cdot \text{sen}\left(\frac{q\pi}{W_r} \cdot \left(\frac{W_r}{2} + y'\right)\right) \cdot \cos\left(\frac{m\pi(x'+x_r)}{a}\right) \cdot \cos\left(\frac{n\pi(y'+y_r)}{b}\right) dx' dy' \quad (\text{C1.C.2})$$

En la ecuación anterior x_r, y_r son las coordenadas del centro de la apertura r -ésima. Desarrollando dicha integral, la expresión para I_{rpqmy} puede ser escrita como [11]:

$$I_{rpqmy} = -\frac{q\pi W_r}{(q\pi)^2 - \left(\frac{n\pi W_r}{b}\right)^2} \cdot \left[\cos(p\pi) \cdot \text{sen}\left(\frac{n\pi}{b} \left(\frac{W_r}{2} + y_r\right)\right) + \text{sen}\left(\frac{n\pi}{b} \left(\frac{W_r}{2} - y_r\right)\right) \right] \\ - \frac{\frac{m\pi}{b}}{\left(\frac{p\pi}{L_r}\right)^2 - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2} \cdot \left[\cos(p\pi) \cdot \text{sen}\left(\frac{m\pi}{a} \left(\frac{L_r}{2} + x_r\right)\right) + \text{sen}\left(\frac{m\pi}{a} \left(\frac{L_r}{2} - x_r\right)\right) \right] \quad (\text{C1.C.3})$$

Anexo C-2 Detalle de los parámetros del sistema $[A][X]=[B]$.

Detalle de los parámetros del sistema $[A][X]=[B]$ ecuación (3.109).

A continuación se detallará, uno a uno, los términos incorporados en el sistema de ecuaciones fundamental [11]:

$$\begin{bmatrix} Y_{rpqr'p'q'}^{x1x1} & Y_{rpqr'p'q'}^{x1y1} & Y_{rpqr'p'q'}^{x1y2} & Y_{rpqr'p'q'}^{x1x2} \\ Y_{rpqr'p'q'}^{y1x1} & Y_{rpqr'p'q'}^{y1y1} & Y_{rpqr'p'q'}^{y1y2} & Y_{rpqr'p'q'}^{y1x2} \\ Y_{rpqr'p'q'}^{x2x1} & Y_{rpqr'p'q'}^{x2y1} & Y_{rpqr'p'q'}^{x2y2} & Y_{rpqr'p'q'}^{x2x2} \\ Y_{rpqr'p'q'}^{y2x1} & Y_{rpqr'p'q'}^{y2y1} & Y_{rpqr'p'q'}^{y2y2} & Y_{rpqr'p'q'}^{y2x2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{rpq} \\ V_{rpq} \\ A_{rpq} \\ B_{rpq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{r'p'q'xi} \\ I_{r'p'q'yi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (C2.1)$$

$$Y_{rpqr'p'q'}^{x1x1} = \frac{-j\omega}{k_0^2} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-\epsilon_0 \cdot \epsilon_{om} \cdot \epsilon_{on}}{k_1 \cdot a \cdot b \cdot \text{sen}(k_1 c)} \cdot \left(k_0^2 - \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 \right) \cdot \cos(k_1 c) \cdot I_{rpqmnx} \cdot I_{r'p'q'mnx}$$

$$- \frac{\omega \epsilon_0}{4\pi^2 k_0^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \psi_{rpqx} \cdot \psi_{r'p'q'x}^* \cdot \frac{(k_0^2 - k_x^2)}{k_z} dk_x dk_y \quad (C2.2)$$

$$Y_{rpqr'p'q'}^{x1y1} = \frac{j\omega}{k_0^2} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-\epsilon_0 \cdot \epsilon_{om} \cdot \epsilon_{on}}{k_1 \cdot a \cdot b \cdot \text{sen}(k_1 c)} \cdot \left(\frac{m\pi}{a} \right) \cdot \left(\frac{n\pi}{b} \right) \cdot \cos(k_1 c) \cdot I_{rpqmny} \cdot I_{r'p'q'mnx}$$

$$+ \frac{\omega \epsilon_0}{4\pi^2 k_0^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \phi_{rpy} \cdot \psi_{r'p'q'x}^* \cdot \frac{(-k_x k_y)}{k_z} dk_x dk_y \quad (C2.3)$$

$$Y_{rpqr'p'q'}^{x1y2} = \frac{-j\omega}{k_0^2} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-\epsilon_0 \cdot \epsilon_{om} \cdot \epsilon_{on}}{k_1 \cdot a \cdot b \cdot \text{sen}(k_1 c)} \cdot \left(\frac{m\pi}{a} \right) \cdot \left(\frac{n\pi}{b} \right) \cdot I_{rpqmny} \cdot I_{r'p'q'mnx} \quad (C2.4)$$

$$Y_{rpqr'p'q'}^{x1x2} = \frac{j\omega}{k_0^2} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-\epsilon_0 \cdot \epsilon_{om} \cdot \epsilon_{on}}{k_1 \cdot a \cdot b \cdot \text{sen}(k_1 c)} \cdot \left(k_0^2 - \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 \right) \cdot I_{rpqmnx} \cdot I_{r'p'q'mnx} \quad (C2.5)$$

$$I_{r'p'q'xi} = \sum_{r=1}^R \sum_{p,q} (U_{rpq} Y_{rpqr'p'q'}^{x1x1} + V_{rpq} Y_{rpqr'p'q'}^{x1y1} + A_{rpq} Y_{rpqr'p'q'}^{x1y2} + B_{rpq} Y_{rpqr'p'q'}^{x1x2}) \quad (C2.6)$$

$$I_{r'p'q'xi} = \iint_{r'p'q'} H_{xi} \Psi_{r'p'q'x} dx dy$$

$$Y_{rpqr'p'q'}^{y1x1} = \frac{j\omega}{k_0^2} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-\epsilon_0 \cdot \epsilon_{om} \cdot \epsilon_{on}}{k_1 \cdot a \cdot b \cdot \text{sen}(k_1 c)} \cdot \left(\frac{m\pi}{a}\right) \cdot \left(\frac{-n\pi}{b}\right) \cdot \cos(k_1 c) \cdot I_{rpqmnx} \cdot I_{r'p'q'mny} \\ + \frac{\omega\epsilon_0}{4\pi^2 k_0^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \psi_{rpqx} \cdot \phi_{r'p'q'y}^* \cdot \frac{(-k_x k_y)}{k_z} dk_x dk_y \quad (C2.7)$$

$$Y_{rpqr'p'q'}^{y1y1} = -\frac{j\omega}{k_0^2} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-\epsilon_0 \cdot \epsilon_{om} \cdot \epsilon_{on}}{k_1 \cdot a \cdot b \cdot \text{sen}(k_1 c)} \cdot \left(k_0^2 - \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2\right) \cdot \cos(k_1 c) \cdot I_{rpqmy} \cdot I_{r'p'q'mny} \\ - \frac{\omega\epsilon_0}{4\pi^2 k_0^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \phi_{rpqy} \cdot \phi_{r'p'q'y}^* \cdot \frac{(k_0^2 - k_y^2)}{k_z} dk_x dk_y \quad (C2.8)$$

$$Y_{rpqr'p'q'}^{y1y2} = \frac{j\omega}{k_0^2} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-\epsilon_0 \cdot \epsilon_{om} \cdot \epsilon_{on}}{k_1 \cdot a \cdot b \cdot \text{sen}(k_1 c)} \cdot \left(k_0^2 - \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2\right) \cdot I_{rpqmy} \cdot I_{r'p'q'mny} \quad (C2.9)$$

$$Y_{rpqr'p'q'}^{y1x2} = -\frac{j\omega}{k_0^2} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-\epsilon_0 \cdot \epsilon_{om} \cdot \epsilon_{on}}{k_1 \cdot a \cdot b \cdot \text{sen}(k_1 c)} \cdot \left(\frac{m\pi}{a}\right) \cdot \left(\frac{-n\pi}{b}\right) \cdot I_{rpqmnx} \cdot I_{r'p'q'mny} \quad (C2.10)$$

$$I_{r'p'q'yi} = \sum_{r=1}^R \sum_{p,q} (U_{rpq} Y_{rpqr'p'q'}^{y1x1} + V_{rpq} Y_{rpqr'p'q'}^{y1y1} + A_{rpq} Y_{rpqr'p'q'}^{y1y2} + B_{rpq} Y_{rpqr'p'q'}^{y1x2}) \quad (C2.11)$$

$$I_{r'p'q'yi} = - \iint_{r'p'q'} H_{yi} \Phi_{r'p'q'x} dx dy$$

$$Y_{rpqr'p'q'}^{x2x1} = \frac{-j\omega}{k_0^2} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-\epsilon_0 \cdot \epsilon_{om} \cdot \epsilon_{on}}{k_1 \cdot a \cdot b \cdot \text{sen}(k_1 c)} \cdot \left(k_0^2 - \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 \right) \cdot I_{rpqmnx} \cdot I_{r'p'q'mnx} \quad (C2.12)$$

$$Y_{rpqr'p'q'}^{x2y1} = \frac{-j\omega}{k_0^2} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-\epsilon_0 \cdot \epsilon_{om} \cdot \epsilon_{on}}{k_1 \cdot a \cdot b \cdot \text{sen}(k_1 c)} \cdot \left(\frac{m\pi}{a} \right) \cdot \left(\frac{n\pi}{b} \right) \cdot I_{rpqmny} \cdot I_{r'p'q'mnx} \quad (C2.13)$$

$$Y_{rpqr'p'q'}^{x2y2} = \frac{-j\omega}{k_0^2} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-\epsilon_0 \cdot \epsilon_{om} \cdot \epsilon_{on}}{k_1 \cdot a \cdot b \cdot \text{sen}(k_1 c)} \cdot \left(\frac{m\pi}{a} \right) \cdot \left(\frac{n\pi}{b} \right) \cdot \cos(k_1 c) \cdot I_{rpqmny} \cdot I_{r'p'q'mnx} \quad (C2.14)$$

$$- \frac{\omega \epsilon_0}{4\pi^2 k_0^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \phi_{rpqy} \cdot \psi_{r'p'q'x}^* \cdot \frac{(-k_x k_y)}{k_z} dk_x dk_y$$

$$Y_{rpqr'p'q'}^{x2x2} = \frac{j\omega}{k_0^2} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-\epsilon_0 \cdot \epsilon_{om} \cdot \epsilon_{on}}{k_1 \cdot a \cdot b \cdot \text{sen}(k_1 c)} \cdot \left(k_0^2 - \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 \right) \cdot \cos(k_1 c) \cdot I_{rpqmnx} \cdot I_{r'p'q'mnx} \quad (C2.15)$$

$$+ \frac{\omega \epsilon_0}{4\pi^2 k_0^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \psi_{rpqx} \cdot \psi_{r'p'q'x}^* \cdot \frac{(k_0^2 - k_x^2)}{k_z} dk_x dk_y$$

$$Y_{rpqr'p'q'}^{y2x1} = \frac{j\omega}{k_0^2} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-\epsilon_0 \cdot \epsilon_{om} \cdot \epsilon_{on}}{k_1 \cdot a \cdot b \cdot \text{sen}(k_1 c)} \cdot \left(\frac{m\pi}{a} \right) \cdot \left(-\frac{n\pi}{b} \right) \cdot I_{rpqmnx} \cdot I_{r'p'q'mny} \quad (C2.16)$$

$$Y_{rpqr'p'q'}^{y2y1} = \frac{-j\omega}{k_0^2} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-\epsilon_0 \cdot \epsilon_{om} \cdot \epsilon_{on}}{k_1 \cdot a \cdot b \cdot \text{sen}(k_1 c)} \cdot \left(k_0^2 - \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 \right) \cdot I_{rpqmn_y} \cdot I_{r'p'q'mny} \quad (\text{C2.17})$$

$$Y_{rpqr'p'q'}^{y2y2} = \frac{j\omega}{k_0^2} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-\epsilon_0 \cdot \epsilon_{om} \cdot \epsilon_{on}}{k_1 \cdot a \cdot b \cdot \text{sen}(k_1 c)} \cdot \left(k_0^2 - \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 \right) \cdot \cos(k_1 c) \cdot I_{rpqmn_y} \cdot I_{r'p'q'mny} \quad (\text{C2.18})$$

$$+ \frac{\omega\epsilon_0}{4\pi^2 k_0^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \phi_{rpqy} \cdot \phi_{r'p'q'y}^* \cdot \frac{(k_0^2 - k_y^2)}{k_z} dk_x dk_y$$

$$Y_{rpqr'p'q'}^{y2x2} = \frac{-j\omega}{k_0^2} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-\epsilon_0 \cdot \epsilon_{om} \cdot \epsilon_{on}}{k_1 \cdot a \cdot b \cdot \text{sen}(k_1 c)} \cdot \left(\frac{m\pi}{a} \right) \cdot \left(-\frac{n\pi}{b} \right) \cdot \cos(k_1 c) \cdot I_{rpqmn_x} \cdot I_{r'p'q'mny} \quad (\text{C2.19})$$

$$- \frac{\omega\epsilon_0}{4\pi^2 k_0^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \psi_{rpqx} \cdot \phi_{r'p'q'y}^* \cdot \frac{(-k_x k_y)}{k_z} dk_x dk_y$$

Anexo C-3 Experimentación con pintura de galvanizado en frío.

Antecedentes.

A unos meses de haberse comenzado con el estudio de los blindajes electromagnéticos para poder enfrentar la problemática surgida a causa de los elevados niveles de campo magnético existentes en la Sala TEM, se empezó a buscar un mecanismo innovador de blindaje. Fue así como en un principio nació la idea de poder blindar la Sala TEM, con una especie de “Shielding Paint”, la cual contaría en su composición con partículas ferromagnéticas las cuales brindarían un blindaje magnético leve (ya que al poseer dicha pintura solo “partículas”, quedan bastantes espacios intermedios), pero además le daría una cualidad conductora especial que sería bastante útil para proteger de los campos eléctricos.

Es así como se comenzó a indagar en dicho tema, pues resultaba poco lógico que tal idea no estuviese ya patentada. Fue así como se logró encontrar que la pintura con tales propiedades de blindaje, fue resultado de un experimento realizado por personas de la armada en la década de los 80's. En tal ocasión, Don Gerardo Paetz (Ingeniero de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile), colaboró pintando con tal producto un buque de guerra y un tanque, observando resultados medianamente satisfactorios. Sin embargo hoy, la patente de dicho invento la posee la empresa “Sherwin – Williams”, quienes no han sacado su producto al mercado todavía.

Es así como observando todo el trasfondo que existía, se concluye que, en realidad no era una opción viable empezar a experimentar al respecto, sobre todo si se carecía de recursos económicos para ello. Fue así como se optó por experimentar con la tan famosa “Pintura de Galvanizado en Frío” y observar si realmente se cumplía lo que todo el mundo comenta sobre ella, es decir: “Que es una pintura conductora”.

Experimentación.

Gracias a la donación de Don Gerardo Paetz (Gerente General de Ingepint), de medio galón de pintura de galvanizado en frío, se procedió a pintar completamente el interior de una caja de madera. El fin de ello, era poder testear si existía continuidad entre los muros de dicha caja luego de pintados y además realizar las medidas del campo magnético al interior de la caja pintada, para observar si es que existía atenuación del campo.

Para ello se montó un circuito en el cual, un conductor eléctrico en serie con un reóstato se alimentaron a través de una fuente de 220V y 50Hz, recorriendo un camino rectangular que iba a una distancia de un metro de la caja de madera (situada en el centro de dicho circuito). Por otro lado, cabe señalar también que el conductor se ubicó a una distancia de alrededor de un metro del piso. Todo lo anteriormente descrito se puede observar en la Figura C.3.1.A/B/C/D indicada a continuación:



A



B



C



D

Figura C.3.1: A) Montaje general del experimento. B) Aislador soportando al conductor a 1m del suelo. C) Medida de la distancia de la caja al conductor (1m). D) Alimentación y reóstato.

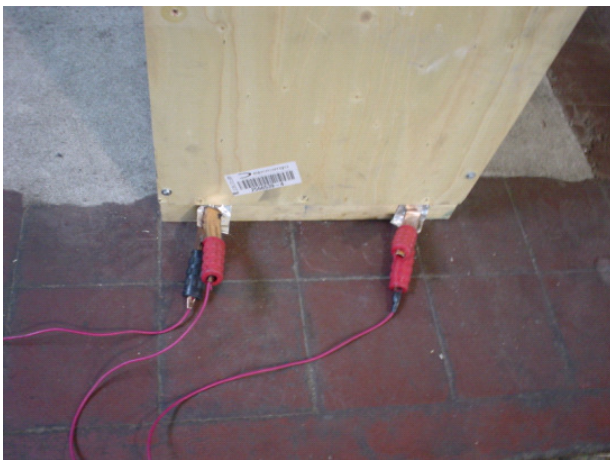
Por otra parte, para ayudar a que el circuito compuesto por cada pared de la caja se “cerrara” en forma adecuada, se unieron dichas paredes con cinta conductora de aluminio. Con ello se buscaba que la caja en su conjunto tuviese una unidad, la cual permitiera que alguna corriente inducida pudiese circular libremente entre la caja y tierra, ya que se dejaron también en las cuatro esquinas inferiores de la caja, cuatro puntos de puesta a tierra (Suponiendo que la pintura sería conductora). Ver figura C.3.2.A/B/C/D



A



B



C



D

Figura C.3.2: A) Conexión entre pared inferior y lateral de la caja, mediante cinta adhesiva de aluminio. B – C y D) Puestas a tierra de la caja.

Resultados.

Los resultados que se obtuvieron de haber realizado dos medidas: una con el EMDEX ubicado fuera de la caja pintada (i.e. sometiéndolo directamente al campo magnético del sistema), y otra medida ubicando al EMDEX en el interior de la caja pintada con pintura de galvanizado en frío, se describen a continuación en los gráficos de las figuras C.3.3, C.3.4 y C.3.5.

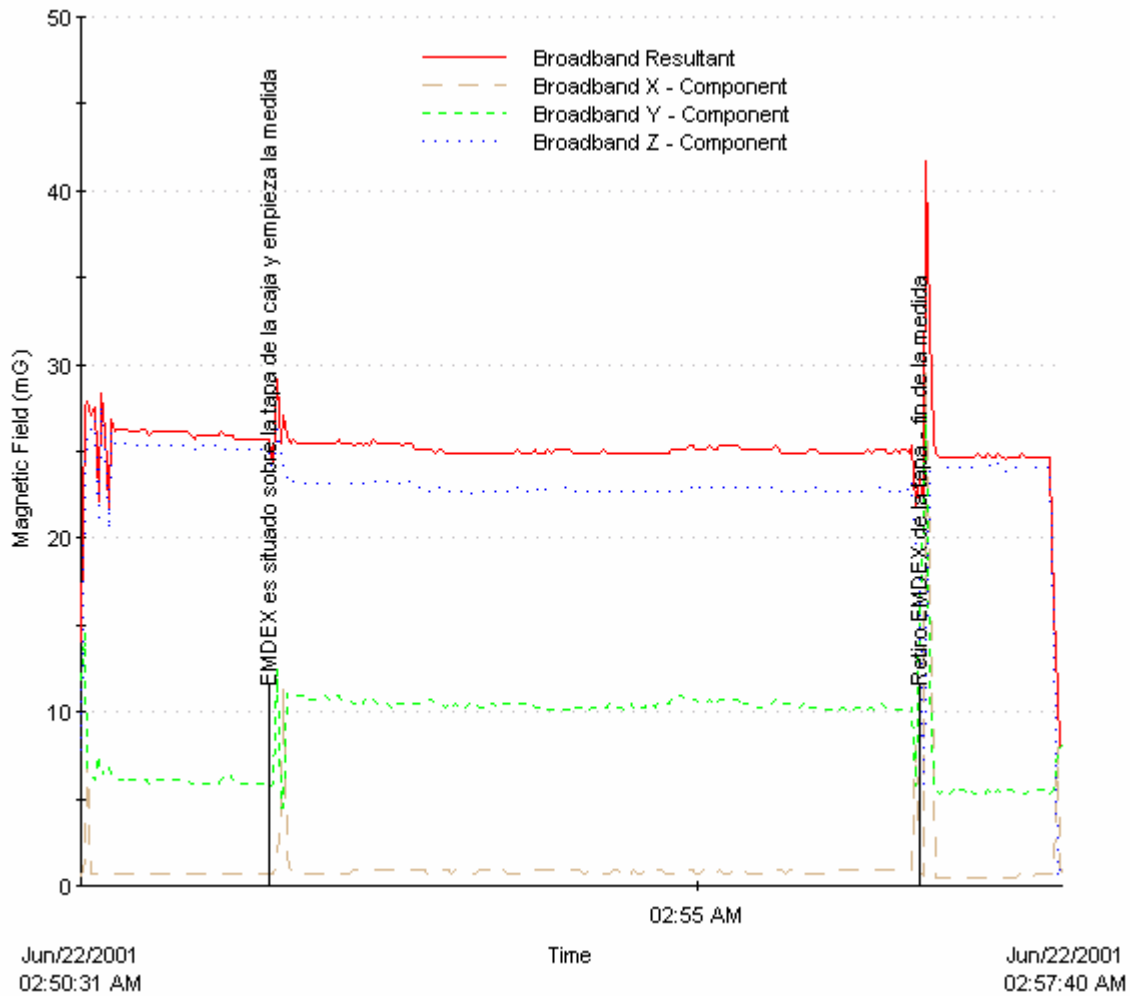


Figura C.3.3: Resultado de medida del campo magnético al interior del circuito. Medida con el EMDEX ubicado en la tapa de la caja pintada con pintura de galvanizado en frío.

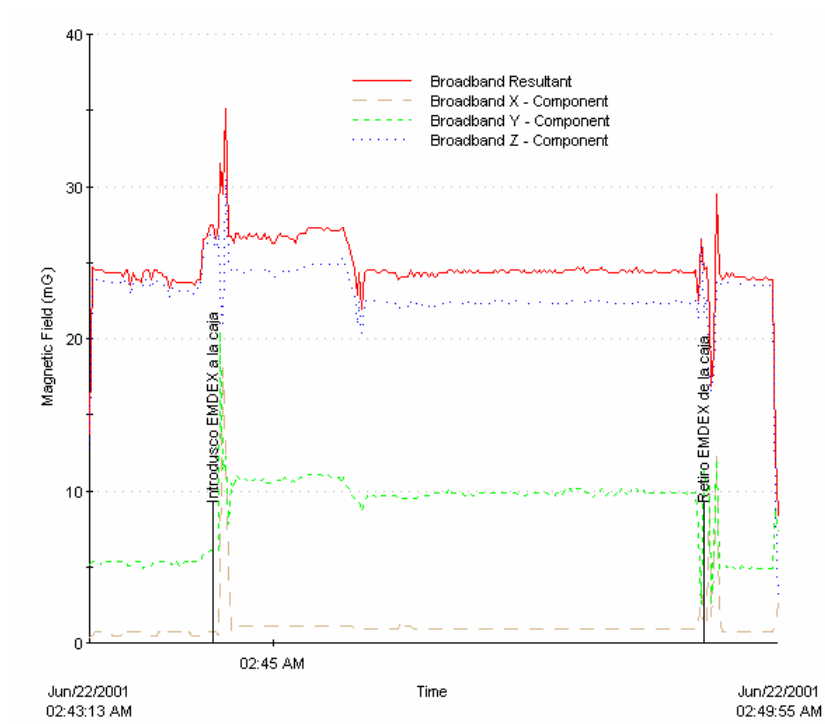


Figura C.3.4: Resultado de medida de campo magnético al interior de la caja pintada con pintura de galvanizado en frío.

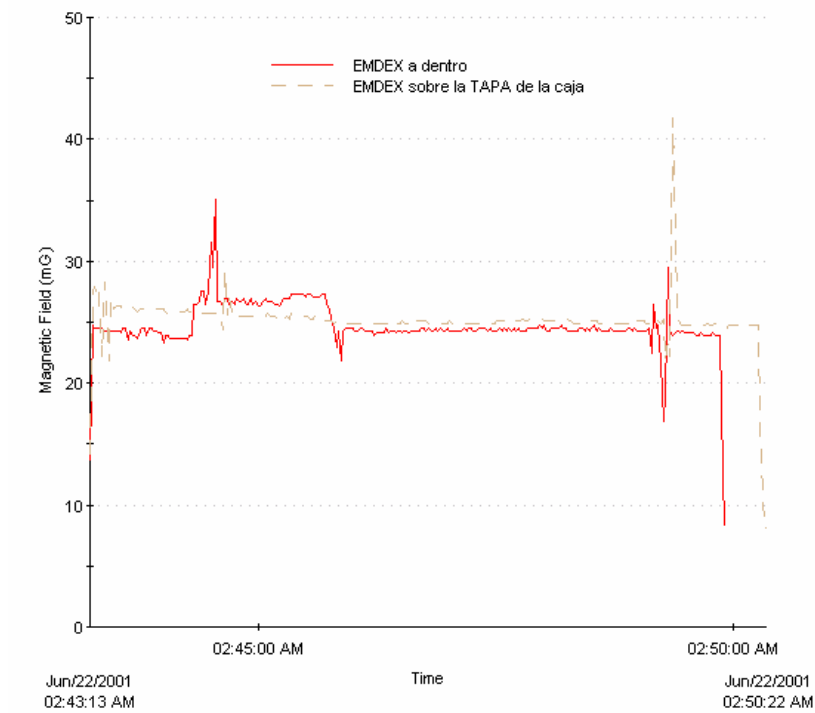


Figura C.3.5: Resultado comparativo de ambas medidas (C.3.3 y C.3.4).

Conclusiones.

En conclusiones, se desprende claramente del gráfico comparativo entregado en la Figura C.3.5, que la pintura de “Galvanizado en Frío”... pese a ser ampliamente utilizada como “Protección Catódica” y actuar como ánodo de sacrificio en cientos de aplicaciones en las cuales se quiere evitar la oxidación de otro material, no es una pintura conductora eléctrica y mucho menos una “Shielding Paint”.

Según las medidas de campo magnético indicadas en la Figuras C.3.3, el campo que genera el circuito experimental descrito en la Figura C.3.1, es de alrededor de 26mG. Luego, la lógica es que si la caja pintada efectivamente logra blindar dicho campo, la medida de campo magnético que se debería obtener, debiese ser mucho menor a los 27mG. Sin embargo, de acuerdo con la Figura C.3.4, el campo magnético obtenido al interior de la caja pintada es de aproximadamente 25mG. Es decir que solo atenuó en 1mG al campo magnético del circuito experimental (más claramente se observa dicho “delta” de 1mG en la Figura C.3.5), lo cual nos indica sin duda que la cantidad de compuestos de Zinc no son lo suficiente para poder darle el carácter conductor necesario a dicha pintura. La cual se podría mejorar, incluyendo en ella mezclas de fibrillas de acero, aluminio, cobre u otro material conductor, en una proporción importante.

Anexo C- 4 Curvas de efectividad del blindaje de diversos materiales.

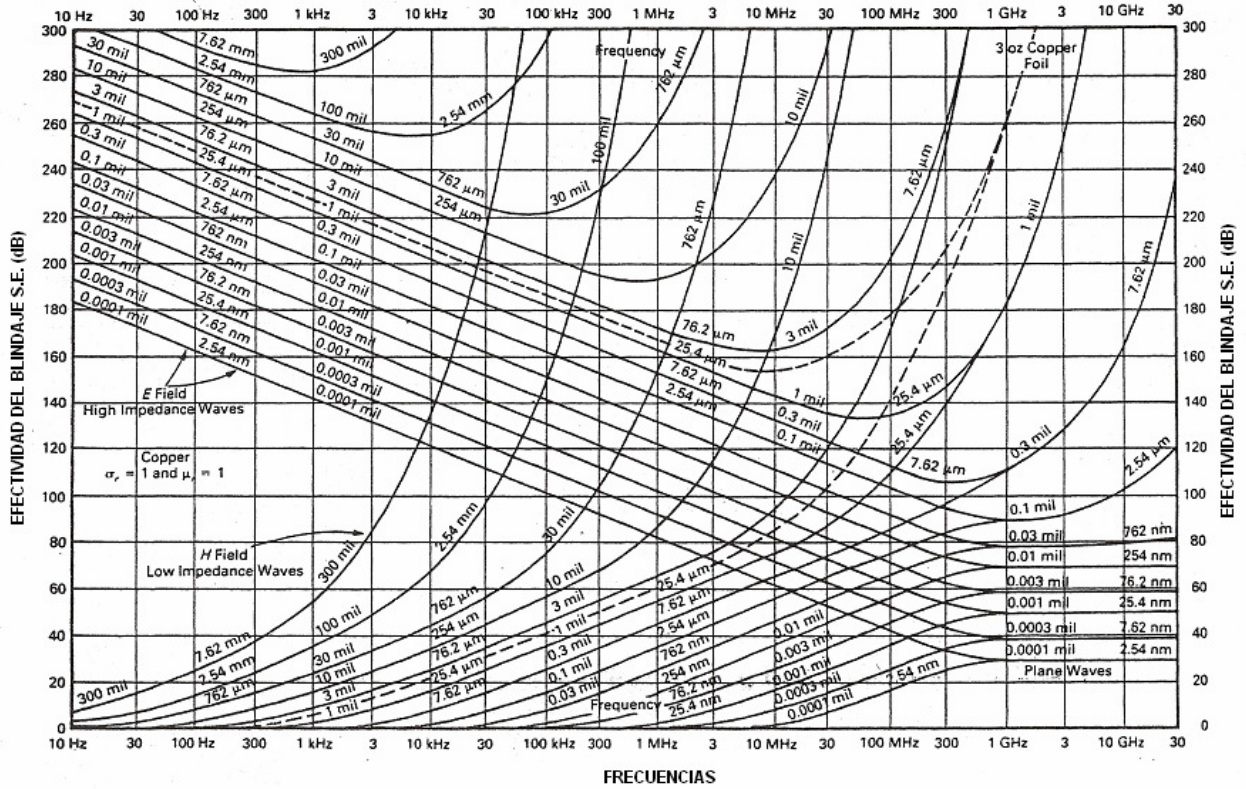


Figura C-4.1: Efectividad del Blindaje del Cobre, estimada bajo el estándar “MIL-STD-285” [2].

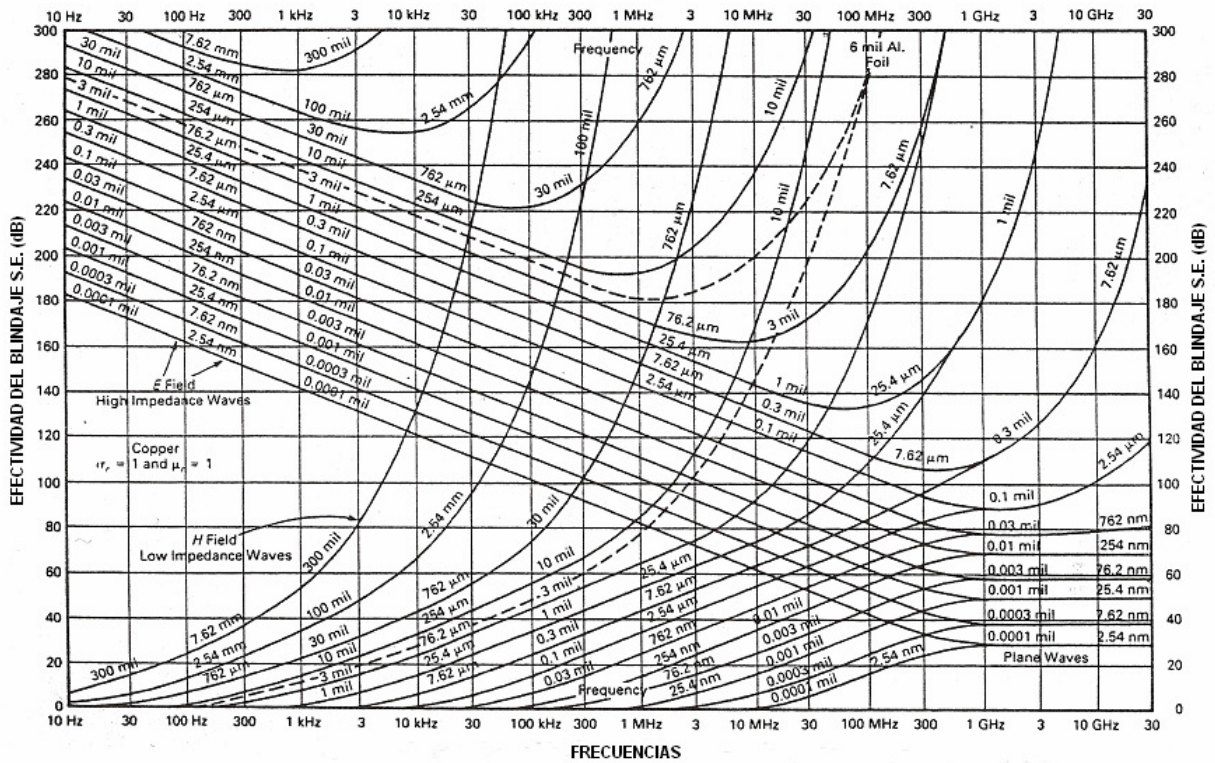


Figura C-4.2: S.E. del Aluminio, estimada bajo el estándar “MIL-STD-285” [2].

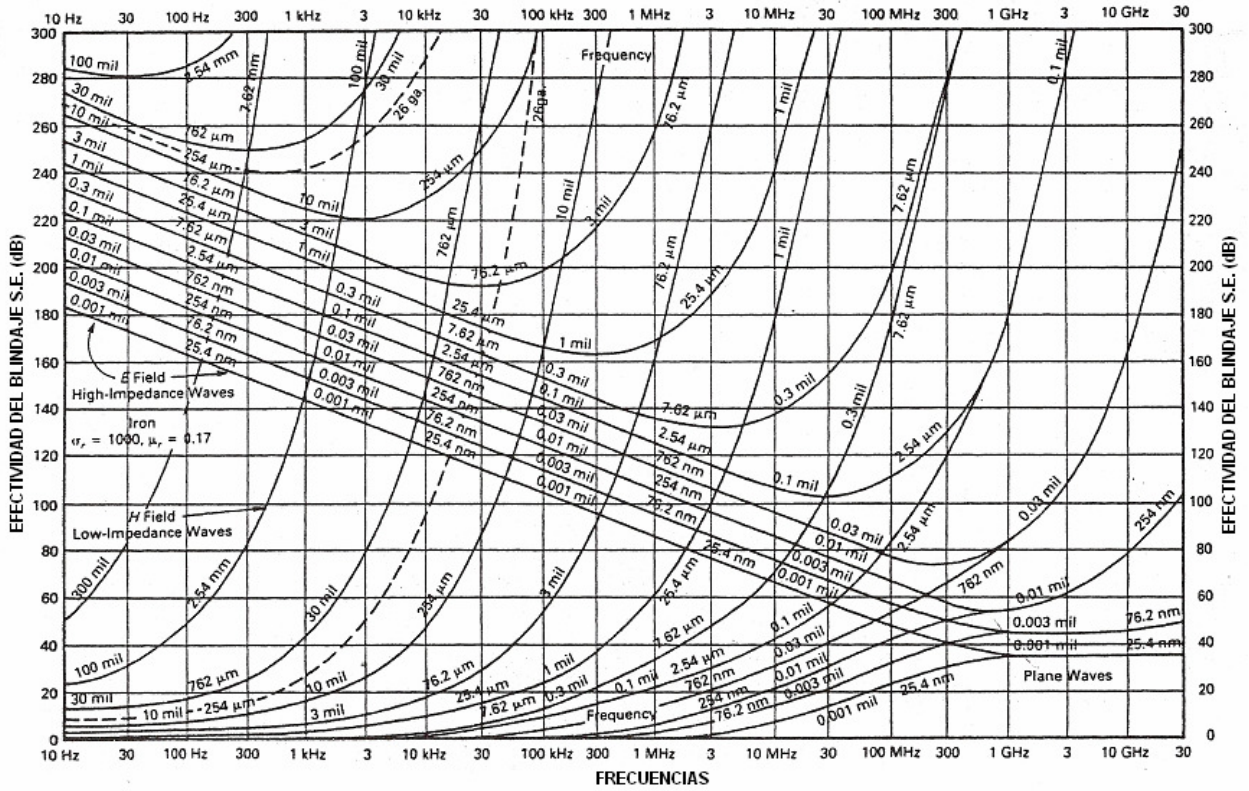


Figura C-4.3: S.E. del Hierro, estimada bajo el estándar “MIL-STD-285” [2].

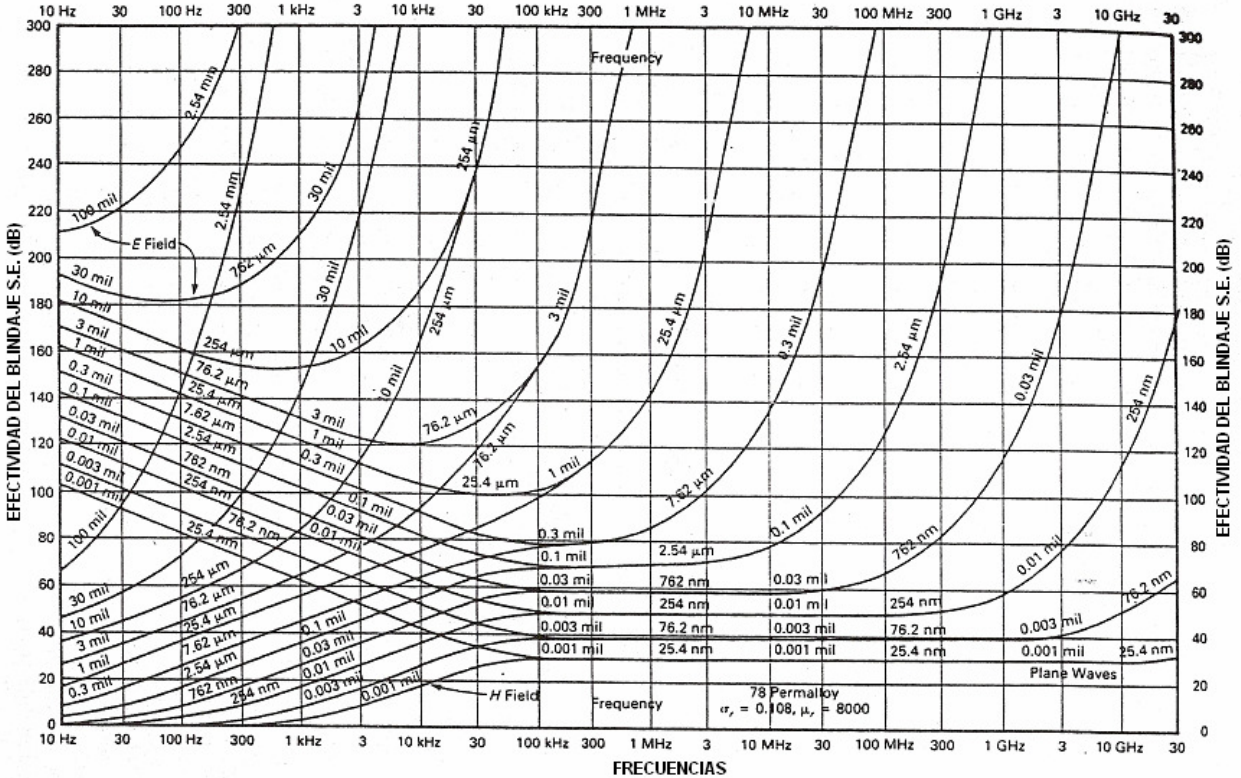


Figura C-4.4: S.E. del Permalloy, estimada bajo el estándar “MIL-STD-285” [2].

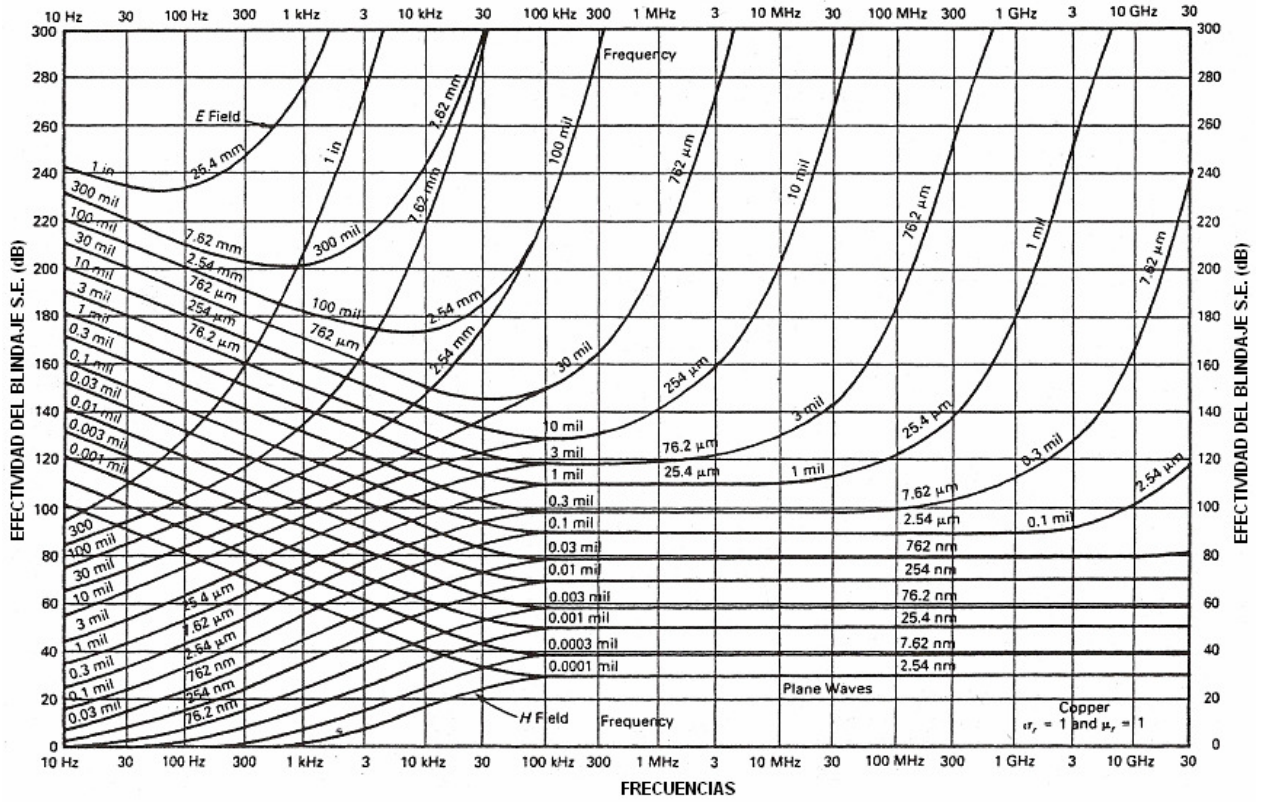


Figura C-4.5: S.E. del Cobre. Distancia “fuente – metal” de 1km [2].

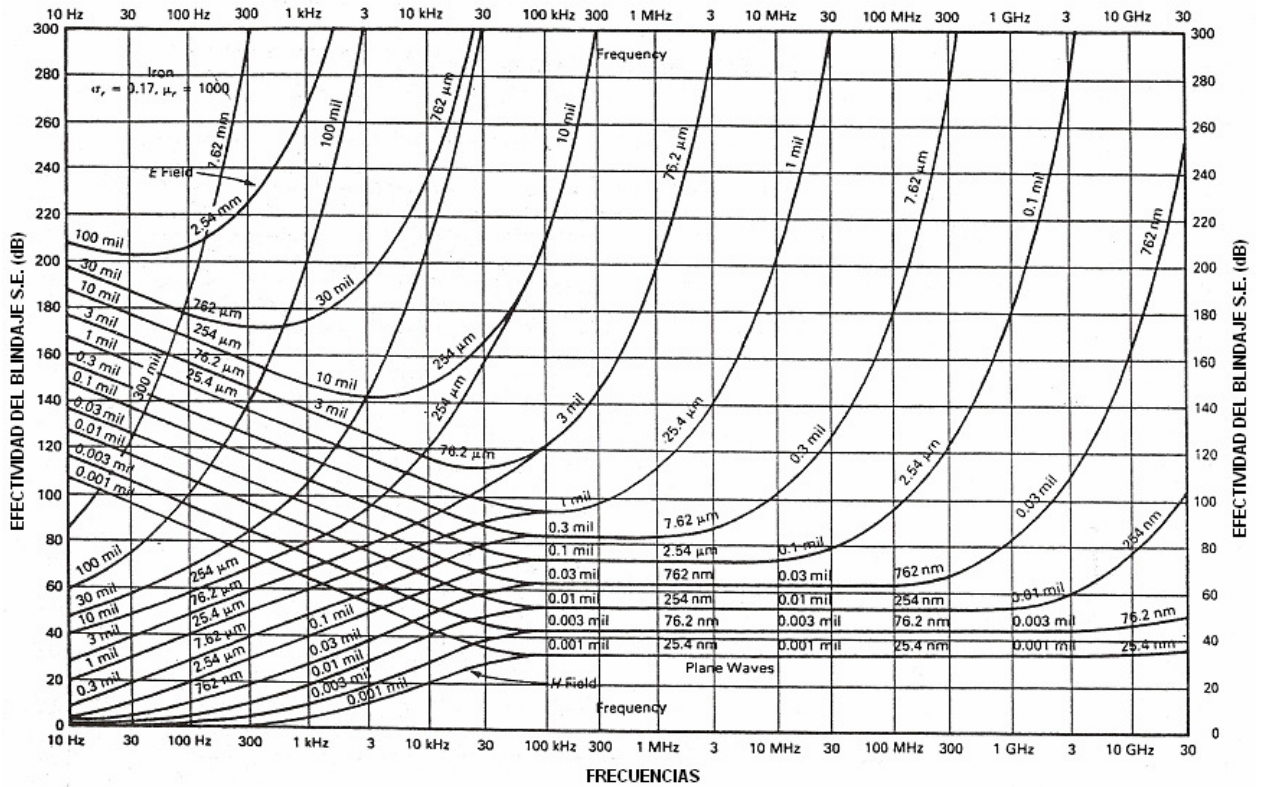


Figura C-4.6: S.E. del Hierro. Distancia “fuente – metal” de 1km [2].

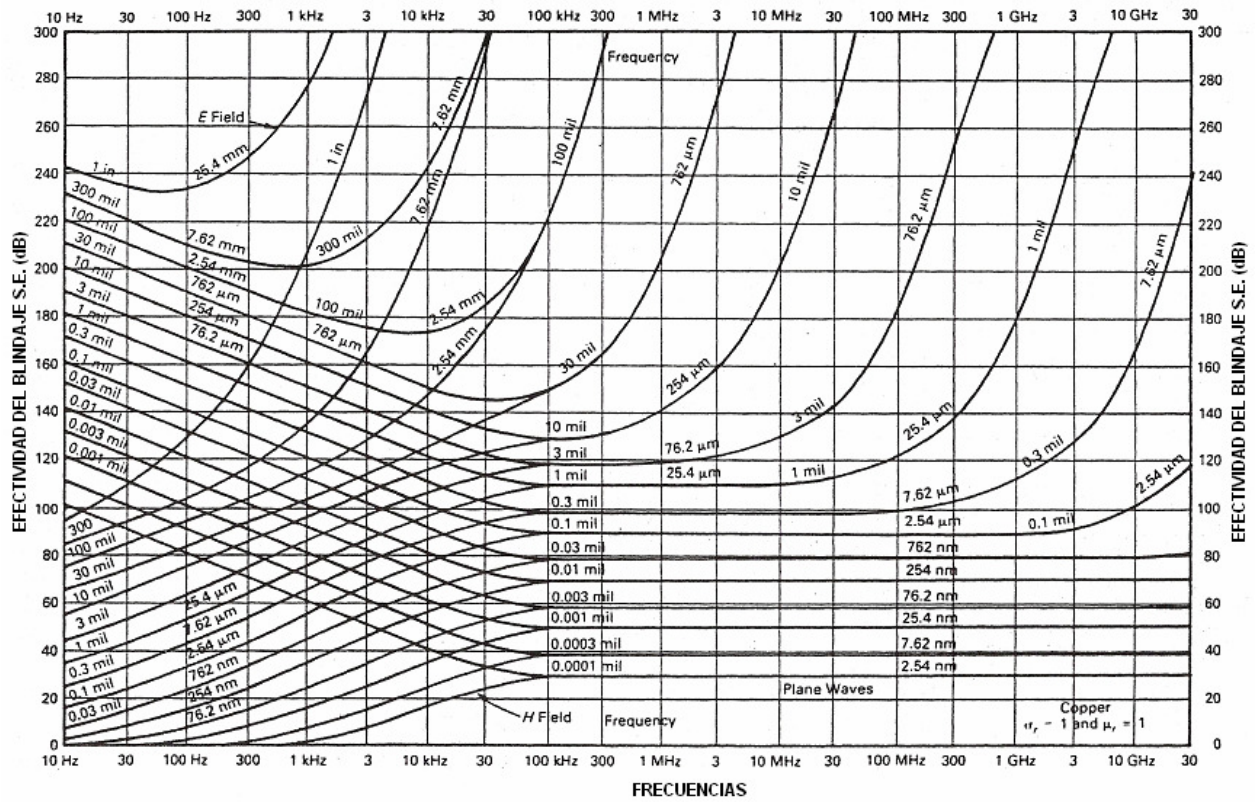
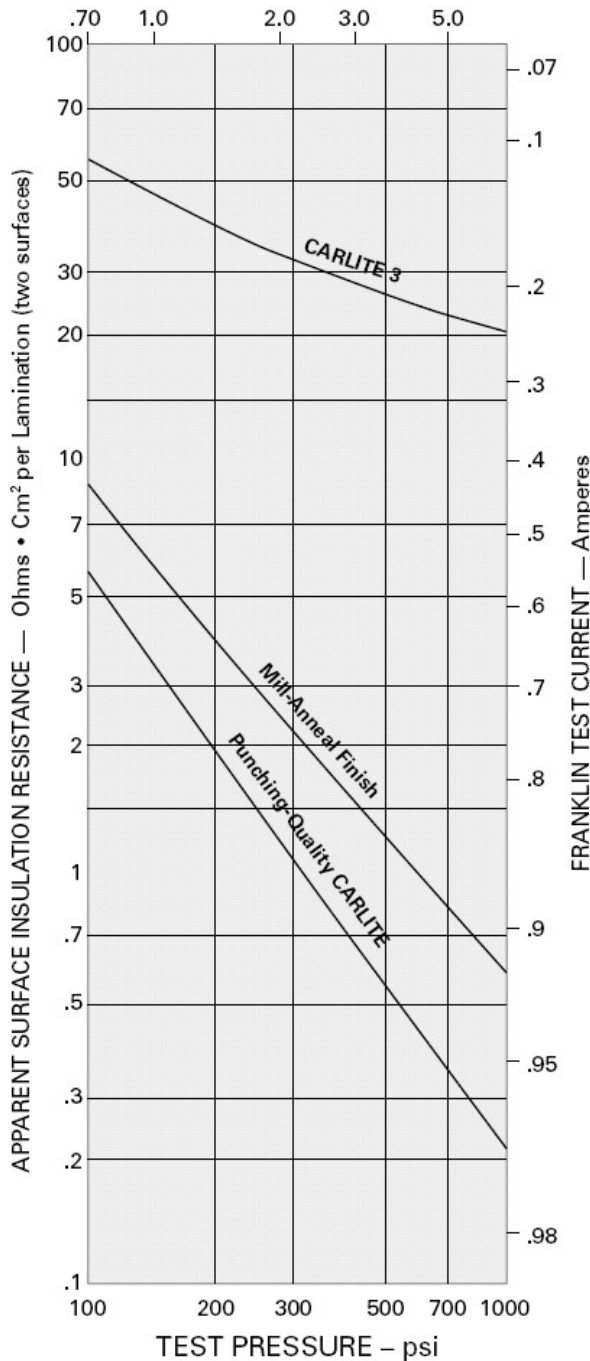


Figura C-4.7: S.E. del Aluminio. Distancia “fuente – metal” de 1km [2].

Anexo C- 5 Extracto de la ficha técnica del Fierro Silicoso de Grano Orientado M-4.

Figure 1

Typical surface insulation characteristics of AK Steel Oriented Electrical Steels at various pressures as determined by the Franklin Test.



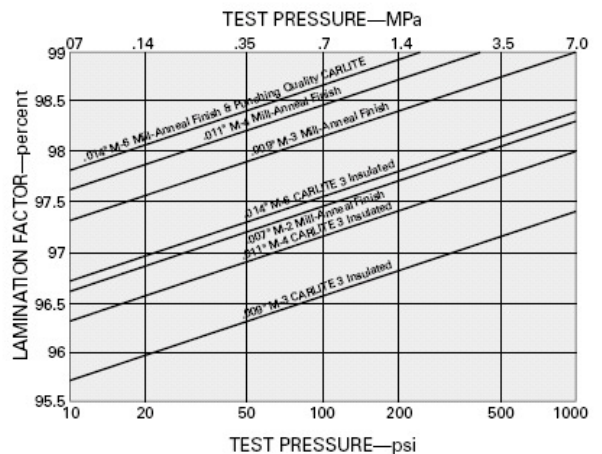
Lamination Factor

Lamination factor is the measure of compactness of an electrical steel core. This is also referred to as “stacking factor” and “space factor.” Lamination factor is the ratio of the equivalent “solid” volume, calculated from weight and density of the steel, to the actual volume of the compressed pack, determined from its dimensions.

Special processing gives AK Steel Oriented Electrical Steels (either with Mill-Anneal finish or CARLITE types of insulation) exceptionally and consistently high lamination factors.

Test Method. The lamination factor of electrical steels is determined from measurements of a stack of Epstein strips under known pressure in accordance with ASTM A 719. Figure 2 illustrates how the ASTM lamination factor varies as a function of pressure for the most widely used forms of AK Steel Oriented Electrical Steels. The values shown are representative of the lamination factor determined by this test.

Figure 2



Mechanical and Physical Properties

Representative Mechanical Properties	Oriented	TRAN-COR H
Ultimate Tensile Strength, psi (MPa) in rolling direction	51,000 (352)	52,000 (359)
Yield Strength, psi (MPa) in rolling direction	48,000 (331)	50,000 (345)
Percent Elongation in 2 inches (50.8 mm) in rolling direction	9	11
Microhardness (Knoop Hardness Number, HK)	167	173
Equivalent Rockwell B Scale Hardness	81	83
Modulus of Elasticity, psi (MPa)* in rolling direction	17,700,000 (122,000)	16,500,000 (113,800)
at 20 degrees to rolling direction	20,800,000 (143,000)	20,000,000 (138,000)
at 45 degrees to rolling direction	34,300,000 (236,000)	35,000,000 (241,000)
at 55 degrees to rolling direction	37,500,000 (258,000)	40,000,000 (276,000)
at right angles to rolling direction	29,000,000 (219,500)	29,500,000 (203,000)

*Values may vary as much as plus or minus 5%

Physical Properties	Oriented	TRAN-COR H
Density, grams per cubic centimeter	7.65	7.65
Electrical Resistivity, microhm-centimeters	51	50
Saturation Value of Ferric Induction* (B-H) in kilogausses	20.0	19.9
Curie Temperature, °F (°C)	1375 (746)	1380 (749)

*Effective value for coated specimen.

Available Forms

Grade and Thickness

AK Steel Oriented and TRAN-COR H Electrical Steels are produced in the following grades and nominal thicknesses:

- AK Steel Oriented M-2: 7 mils (0.007")
- AK Steel Oriented M-3: 9 mils (0.009")
- AK Steel Oriented M-4: 11 mils (0.011")
- AK Steel Oriented M-6: 14 mils (0.014")
- AK Steel TRAN-COR H-0: 9 mils (0.009")
- AK Steel TRAN-COR H-1: 11 mils (0.011")

Grades and thicknesses listed are available in the form of coils subject to the following limits:

Widths from 3/4" to 34". (Above 34" up to 36", please inquire.)

Average coils weigh approximately 260–350 pounds per inch of width.

Maximum Core Loss Limits

For grading purposes, core loss tests on AK Steel Oriented and TRAN-COR H Electrical Steels are made at inductions of 15 and 17 kilogausses. This testing procedure approximates the operating conditions in

transformers designed for these types of materials. Test results agree closely with those made on single-phase transformers with stress-free cores having no joints.

AK Steel Grade	Test Specimen	Thickness inches	Maximum Core Loss*							
			60 Hertz				50 Hertz			
			Watts per lb		Watts per kg		Watts per lb		Watts per kg	
15 kG	17 kG	15 kG	17 kG	15 kG	17 kG	15 kG	17 kG			
Oriented M-2	(1)	.007	.405	—	.89	—	.31	—	.68	—
Oriented M-3	(1)	.009	.445	.70	.98	1.54	.34	.53	.75	1.17
Oriented M-4	(1)	.011	.51	.74	1.12	1.63	.39	.56	.85	1.24
Oriented M-6/PQ	(1)	.014	.66	.94	1.46	2.07	.50	.71	1.11	1.57
TRAN-COR H-0	(1)	.009	—	.60	—	1.32	—	.46	—	1.01
TRAN-COR H-1	(1)	.011	—	.66	—	1.46	—	.50	—	1.11
TRAN-COR H-0 DR†	(2)	.009	.39	.535	.86	1.18	.30	.41	.65	.90
TRAN-COR H-1 DR†	(2)	.011	.425	.57	.94	1.26	.32	.43	.71	.96

(1) Annealed Condition, Epstein type test specimen

(2) As-sheared single sheet test specimen.

*Customer has option of specifying either 15 or 17 kG inductions for 9-mil M-3, 11-mil M-4, 14-mil M-6, 9-mil H-0 DR, and 11-mil H-1 DR.

†DR designates domain refinement by laser scribing.

Typical core losses of AK Steel Oriented and TRAN-COR H Electrical Steels are significantly lower than the maximum limits. Contact AK Steel for computer spread sheet for typical core loss and exciting power.

The core loss and exciting power of the AK Steel Oriented and TRAN-COR H grades are determined by magnetic tests performed in accordance with general procedures approved by the American Society for Testing and Materials.

The following conditions apply:

1. Epstein Specimens
 - a. Sheared parallel to the rolling direction of the steel from fully processed coils.
 - b. Annealed again after shearing to relieve stresses per ASTM A 876.
 - c. Tested after stress-relief anneal per ASTM A 343.
2. Single Sheet Specimens
 - a. Sheared parallel to the rolling direction of the steel from fully processed coils.
 - b. Tested as-sheared per ASTM A 804.
3. Density of all grades — 7.65 grams/cm³ per ASTM A 34.

ASTM A 664 is a grade identification system for electrical steels. While this system has not been widely adopted by the manufacturers and consumers of electrical steels, it is used in ASTM A 876 to designate various grades of grain oriented electrical steel. The following is a listing of the corresponding AK Steel and ASTM grades of grain oriented electrical steels.

AK Steel grade 7-mil M-2 is approximately equivalent to ASTM Core Loss Type 18G041.

AK Steel grade 9-mil M-3 is approximately equivalent to ASTM Core Loss Types 23G045 and 23H070.

AK Steel grade 11-mil M-4 is approximately equivalent to ASTM Core Loss Types 27G051 and 27H074.

AK Steel grade 14-mil M-6 is approximately equivalent to ASTM Core Loss Types 35G066 and 35H094.

AK Steel grade 9-mil H-0 is approximately equivalent to ASTM Core Loss Type 23P060.

AK Steel grade 11-mil H-1 is approximately equivalent to ASTM Core Loss Type 27P066.

AK Steel grade 9-mil H-0 DR is approximately equivalent to ASTM Core Loss Type 23Q054.

AK Steel grade 11-mil H-1 DR is approximately equivalent to ASTM Core Loss Type 27Q057.

Summary of Recommended Annealing Procedures

The principal requirements for stress-relieving of AK Steel Oriented and TRAN-COR H Electrical Steels according to the type of material are shown in the following procedures chart:

Annealing Procedures

	Mill-Anneal Insulation (for wound cores)	CARLITE Type Insulation (for flat laminations) Punching Quality only	CARLITE 3
Maximum Charge Temperature	1550°F (845°C)	1450°F (790°C)	1500°F (820°C)
Minimum Charge Temperature	1450°F (790°C)	1400°F (760°C)	
Atmosphere	Dry nitrogen with 0 to 10% H ₂	Dry nitrogen with 0 to 2% H ₂	Dry nitrogen with 0 to 5% H ₂
Time	Minimum necessary to reach temperature in coldest part of charge without imposing thermal strain from excessive heating and cooling gradients.		
Special Precautions	Meticulously avoid oxidation as well as carburization. Always use inner covers in furnaces.	Keep piling plates flat and give strict attention to avoiding excessive temperature gradients in 1300-1450°F (704-790°C) range. Avoid exposure to hydrogen over 2% (5% for CARLITE 3)	

For advice on annealing specific sizes of laminations or cores with specified piling arrangements, ask our AK Steel specialists for technical assistance.

Core Design

AK Steel Oriented and TRAN-COR H Electrical Steels offer outstanding magnetic properties when the flux path is parallel to the direction in which the steel was rolled. This is due primarily to their highly perfected "grain orientation."

However, this same orientation that improves magnetic characteristics in the rolling direction impairs magnetic properties when the flux path is not parallel to the rolling direction. This is illustrated in Fig. 3.

Figure 3

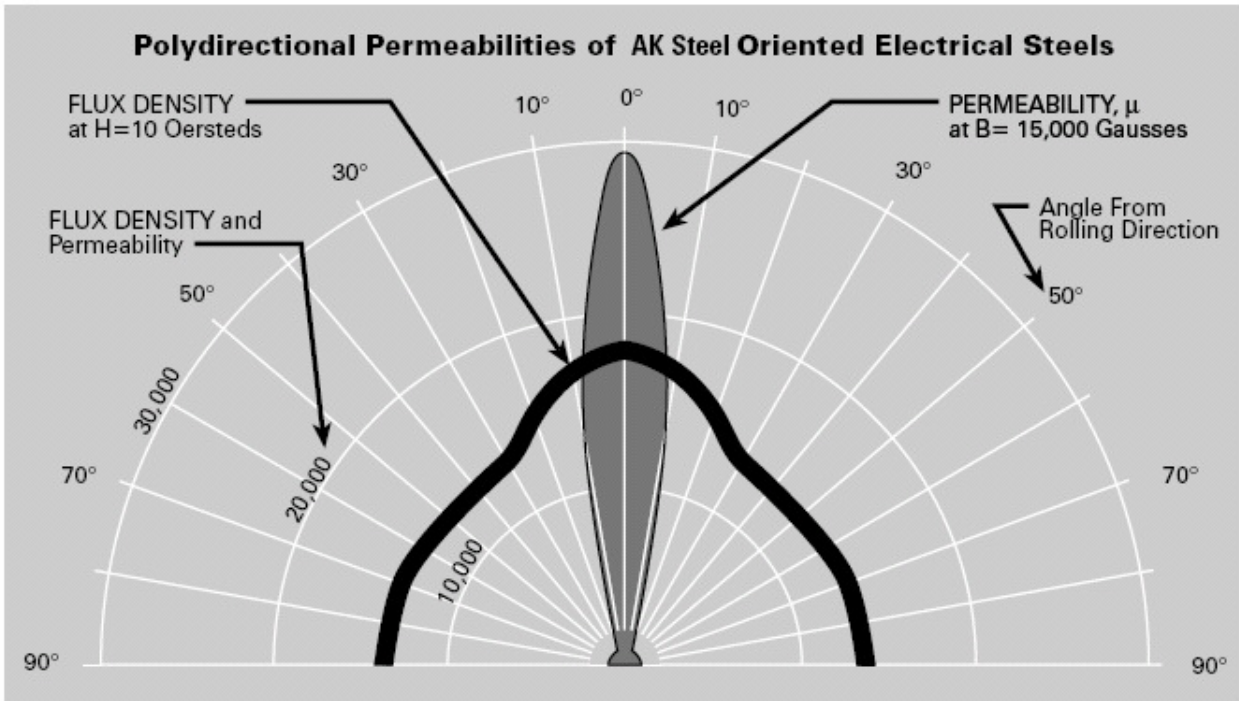


Figure 3. Tests made on Epstein samples cut at various angles to rolling direction, stress annealed after shearing. Negligible joint effects. Assumed density 7.65 grams per cubic centimeters.

Anexo C- 6 Análisis del blindaje electromagnético de la Sala TEM mediante PoOP.

Efectividad del Blindaje de Fierro Silicoso M-4 mediante PoOP.

A continuación, y haciendo uso de los conceptos entregados en el “Capítulo 2”, se determinará la efectividad teórica del blindaje brindado por una lámina de Fierro Silicoso de grano orientado M-4 instalada al interior de una habitación de concreto, mediante el “Método de Propagación de Onda Plana”. Para ello se resolverá el caso hipotético dado por la “Figura C- 6.1” siguiente:

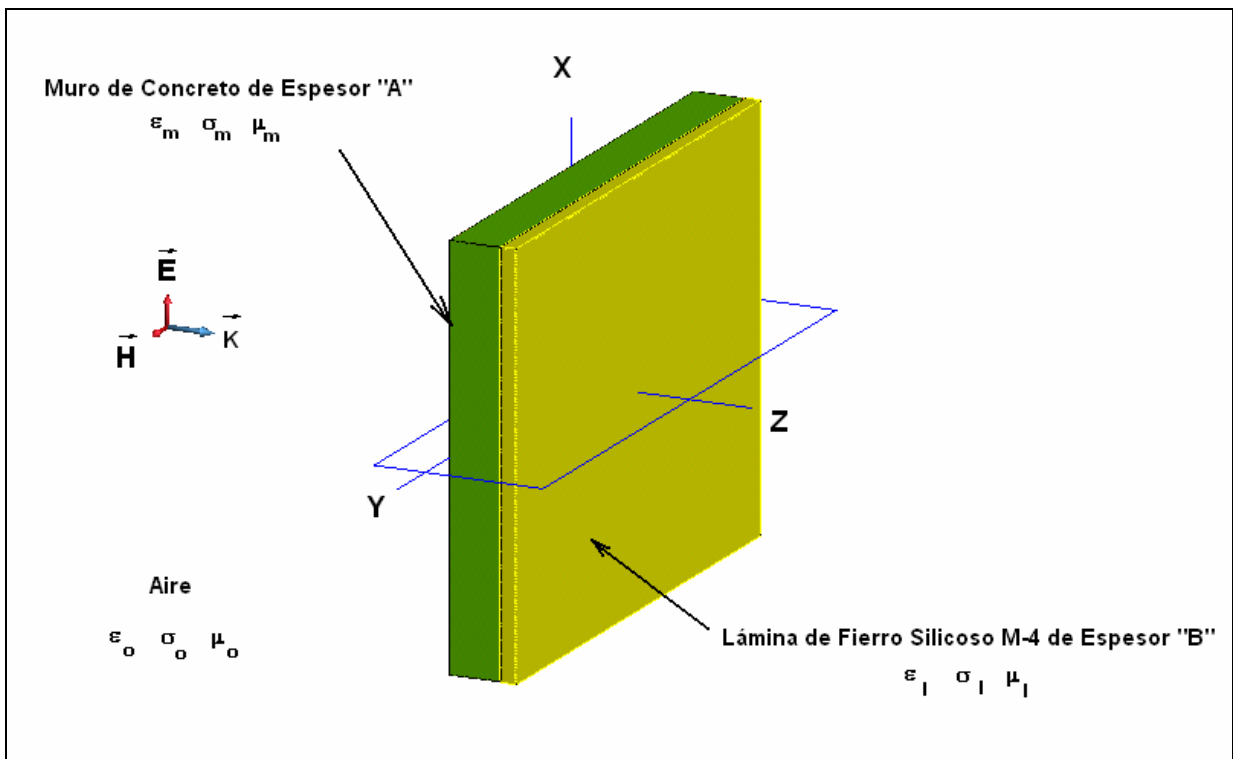


Figura C- 6.1: Esquema de Propagación de Onda Plana a través de un muro de Concreto seco y una lámina de Fierro Silicoso de grano orientado tipo M-4.

Como se puede observar en la figura anterior, la onda plana de frecuencia “f” dada, incide desde el aire sobre el muro de concreto en forma normal a éste. Luego, se propagará a través de la muralla con magnitud inicial:

$$E_{incidente} = E_0 \quad \text{y} \quad H_{incidente} = H_0 \quad (C.6.1)$$

Cumpléndose entonces la relación:

$$\frac{E_0}{H_0} = Z_0 \tag{C.6.2}$$

Relación de mucha importancia, puesto que “ Z_0 ” se conoce como la impedancia intrínseca del aire, y gracias al vínculo que establece entre el campo eléctrico y magnético **en el caso especial de una onda plana**, la efectividad del blindaje calculada para el campo eléctrico es igual a la calculada para el campo magnético, i.e. **$S_E = S_H$** .

Continuando con el problema, el campo transmitido al interior del muro será:

$$E_{muro}(z = 0^+) = T_{a-m} \cdot E_0 \tag{C.6.3}$$

$$H_{muro}(z = 0^+) = Y_m \cdot T_{a-m} \cdot E_0 \tag{C.6.4}$$

En donde:

$$T_{a-m} = \frac{2 \cdot Z_m}{Z_m + Z_0} \quad : \quad \text{Factor de transmisión de la frontera “aire- muro”}.$$

$$Z_m = \frac{1 + j}{\sigma_m \cdot \delta_m} \quad : \quad \text{Impedancia Intrínseca del muro}.$$

$$Y_m = \frac{1}{Z_m} \quad : \quad \text{Admitancia del muro}.$$

Por lo tanto, para el campo magnético inmediatamente al interior del muro se tendrá lo siguiente:

$$H_{muralla}(z = 0^+) = Y_m \cdot \frac{2 \cdot Z_m}{Z_m + Z_0} \cdot E_0 = 2 \cdot \frac{Z_0 \cdot H_0}{Z_m + Z_0} \tag{C.6.5}$$

Y en el otro extremo del muro, justo un instante antes de salir de éste, la magnitud del campo estará dada por:

$$E_{muro}(z = A^-) = 2 \cdot \frac{Z_m \cdot E_0}{Z_m + Z_0} \cdot e^{-\alpha \cdot A} \tag{C.6.6}$$

$$H_{muro}(z = A^-) = 2 \cdot \frac{Z_0 \cdot H_0}{Z_m + Z_0} \cdot e^{-\alpha \cdot A} \tag{C.6.7}$$

En donde:

$$\alpha = \frac{1}{\delta_m} \quad : \text{Factor de atenuación del muro.}$$

$$\delta_m = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu_m \cdot \sigma_m}} \quad : \text{Profundidad pelicular del muro}$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad : \text{Frecuencia angular.}$$

$$\mu_m, \sigma_m \quad : \text{Permeabilidad y Conductividad del muro.}$$

Una vez analizada la propagación de la onda al interior del muro, es conveniente desarrollar a continuación dos casos particulares, pues a partir de éstos se deducirá mas tarde la efectividad del blindaje entregado por la lámina de Fierro Silicoso M-4.

- Primer caso: Si no existiese una lámina magnética y el campo saliera del muro directamente al aire, la onda propagada de manera análoga al análisis previo tendría la forma siguiente:

$$E_{aire}(z = A^+) = T_{m-a} \cdot E_{muro}(z = A^-) \quad (C.6.8)$$

$$H_{aire}(z = A^+) = Y_0 \cdot T_{m-a} \cdot E_{muro}(z = A^-) \quad (C.6.9)$$

Reemplazando el factor de transmisión “muro- aire”, dado por la ecuación general (2.56), y el campo eléctrico en el muro dado por la ecuación (C.6.6), se tiene entonces que:

$$E_{aire}(z = A^+) = \frac{2 \cdot Z_0}{Z_0 + Z_m} \cdot \frac{2 \cdot Z_m \cdot E_0}{Z_m + Z_0} \cdot e^{-\alpha \cdot A} \quad (C.6.10)$$

$$H_{aire}(z = A^+) = Y_0 \cdot \frac{2 \cdot Z_0}{Z_0 + Z_m} \cdot \frac{2 \cdot Z_m \cdot E_0}{Z_m + Z_0} \cdot e^{-\alpha \cdot A} \quad (C.6.11)$$

- Segundo Caso: Si existiese una lámina magnética entre el muro y el aire, la onda propagada tendría la forma siguiente:

$$E_{lámina}(z = A^+) = T_{m-l} \cdot E_{muro}(z = A^-) \quad (C.6.12)$$

$$H_{\text{lámina}}(z = A^+) = Y_l \cdot T_{m-l} \cdot E_{\text{muro}}(z = A^-) \quad (\text{C.6.13})$$

Reemplazando el factor de transmisión en la frontera “muro- lámina”, y el campo eléctrico en el muro dado por la ecuación (C.6.6), se tiene entonces que:

$$E_{\text{lámina}}(z = A^+) = \frac{2 \cdot Z_l}{Z_l + Z_m} \cdot \frac{2 \cdot Z_m \cdot E_0}{Z_m + Z_0} \cdot e^{-\alpha \cdot A} \quad (\text{C.6.14})$$

$$H_{\text{lámina}}(z = A^+) = Y_{\text{lámina}} \cdot \frac{2 \cdot Z_l}{Z_l + Z_m} \cdot \frac{2 \cdot Z_m \cdot E_0}{Z_m + Z_0} \cdot e^{-\alpha \cdot A} \quad (\text{C.6.15})$$

Luego, la magnitud del campo eléctrico y magnético propagado al interior de la lámina magnética de espesor “B” será:

$$E_{\text{lámina}}(z = A + B) = E_{\text{lámina}}(z = A^+) \cdot e^{-\frac{B}{\delta_i}} \quad (\text{C.6.16})$$

$$E_{\text{lámina}}(z = A + B) = \frac{4 \cdot Z_l \cdot Z_m \cdot E_0 \cdot e^{-\alpha \cdot A}}{(Z_l + Z_m) \cdot (Z_m + Z_0)} \cdot e^{-\frac{B}{\delta_i}} \quad (\text{C.6.17})$$

$$H_{\text{lámina}}(z = A + B) = Y_l \cdot T_{m-l} \cdot E_{\text{muro}}(z = A^-) \cdot e^{-\frac{B}{\delta_i}} \quad (\text{C.6.18})$$

$$H_{\text{lámina}}(z = A + B) = \frac{4 \cdot Z_m \cdot Z_0 \cdot H_0 \cdot e^{-\alpha \cdot A}}{(Z_l + Z_m) \cdot (Z_m + Z_0)} \cdot e^{-\frac{B}{\delta_i}} \quad (\text{C.6.19})$$

Por lo tanto, el campo que sale al aire es:

$$E_{\text{aire}} = T_{l-a} \cdot E_{\text{lámina}}(z = A + B) \quad (\text{C.6.20})$$

$$H_{\text{aire}} = Y_0 \cdot T_{l-a} \cdot E_{\text{lámina}}(z = A + B) \quad (\text{C.6.21})$$

Reemplazando en la ecuación (C.6.21) el factor de transmisión en la frontera “lámina - aire”, y el campo eléctrico en la lámina dado por la ecuación (C.6.17), se obtienen entonces las ecuaciones (C.6.22) y (C.6.23) siguientes:

$$E_{\text{aire}} = \frac{2 \cdot Z_0}{(Z_0 + Z_l)} \cdot \frac{4 \cdot Z_l \cdot Z_m \cdot E_0 \cdot e^{-\alpha \cdot A}}{(Z_l + Z_m) \cdot (Z_m + Z_0)} \cdot e^{-\frac{B}{\delta_i}} \quad (\text{C.6.22})$$

$$H_{\text{aire}} = Y_0 \cdot \frac{2 \cdot Z_0}{(Z_0 + Z_l)} \cdot \frac{4 \cdot Z_l \cdot Z_m \cdot E_0 \cdot e^{-\alpha \cdot A}}{(Z_l + Z_m) \cdot (Z_m + Z_0)} \cdot e^{-\frac{B}{\delta_i}} \quad (\text{C.6.23})$$

Es decir:

$$H_{\text{aire}} = \frac{8 \cdot Z_l \cdot Z_m \cdot E_0 \cdot e^{-\alpha \cdot A}}{(Z_0 + Z_l) \cdot (Z_l + Z_m) \cdot (Z_m + Z_0)} \cdot e^{-\frac{B}{\delta_i}} \quad (\text{C.6.24})$$

En consecuencia, la relación existente entre las magnitudes de los campos que salen al aire libre en el segundo caso (con lámina magnética, ecuación (C.6.24)), respecto del primer caso (sin lámina magnética, ecuación (C.6.11)), resulta ser la “Función de Transferencia” (según la ecuación (2.17)) del Fierro Silicoso M-4. Dicho resultado, se resume en la ecuación siguiente:

$$T_{\text{M-4}} = \frac{\frac{8 \cdot Z_l \cdot Z_m \cdot E_0}{(Z_0 + Z_l) \cdot (Z_l + Z_m) \cdot (Z_m + Z_0)} \cdot e^{-\alpha \cdot A} \cdot e^{-\frac{B}{\delta_i}}}{\frac{4 \cdot Z_m \cdot E_0}{(Z_0 + Z_m) \cdot (Z_m + Z_0)} \cdot e^{-\alpha \cdot A}} \quad (\text{C.6.25})$$

$$T_{\text{M-4}} = \frac{2 \cdot Z_l \cdot (Z_0 + Z_m)}{(Z_0 + Z_l) \cdot (Z_l + Z_m)} \cdot e^{-\frac{B}{\delta_i}} \quad (\text{C.6.26})$$

Por lo tanto, solo faltaría reemplazar las incógnitas en la ecuación (C.6.26) para poder obtener un resultado numérico de la Función de Transferencia de la lámina. Dicho valor numérico luego es reemplazado en la ecuación (2.19), para finalmente obtener la efectividad del blindaje en términos de decibeles (dB).

Por consiguiente, es necesario tener claro cual es el valor de las impedancias intrínsecas de los materiales. Por lo tanto:

- Para el caso del Aire:

$$Z_0 = 120 \cdot \pi \cdot \Omega = 377 \ \Omega \quad (\text{C.6.27})$$

- Para el caso del muro:

$$Z_m = \sqrt{\frac{\pi \cdot f \cdot \mu_m}{\sigma_m}} \cdot (1 + j) \Omega \quad (\text{C.6.28})$$

Reemplazando las variables:

$$Z_m = \sqrt{\frac{\pi \cdot 50\text{Hz} \cdot 4 \cdot \pi \times 10^{-7} [\text{Henry} / \text{m}]}{2 \times 10^{-5} [\text{Siemens} / \text{m}]}} \cdot (1 + j) \Omega \quad (\text{C.6.29})$$

$$Z_m = 3,1415 \cdot (1 + j) \Omega \quad (\text{C.6.30})$$

$$|Z_m| = 4,4429 \Omega \quad (\text{C.6.31})$$

- Para el caso de la lámina:

$$Z_l = \sqrt{\frac{\pi \cdot f \cdot \mu_l}{\sigma_l}} \cdot (1 + j) \Omega \quad (\text{C.6.32})$$

Reemplazando las variables:

$$Z_l = \sqrt{\frac{\pi \cdot 50\text{Hz} \cdot 50000 \cdot 4 \cdot \pi \times 10^{-7} [\text{Henry} / \text{m}]}{2 \times 10^6 [\text{Siemens} / \text{m}]}} \cdot (1 + j) \Omega \quad (\text{C.6.33})$$

$$Z_l = 0,0022 \cdot (1 + j) \Omega \quad (\text{C.6.34})$$

$$|Z_l| = 3,1416 \times 10^{-3} \Omega \quad (\text{C.6.35})$$

Y su profundidad pelicular es igual a:

$$\delta_l = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot 50\text{Hz} \cdot 50000 \cdot 4 \cdot \pi \times 10^{-7} [\text{Henry} / \text{m}] \cdot 2 \times 10^6 [\text{Siemens} / \text{m}]}} \quad (\text{C.6.36})$$

$$\delta_l = 0,22508 \times 10^{-3} \text{ m} \quad (\text{C.6.37})$$

Utilizando entonces las variables obtenidas en: (C.6.27), (C.6.31), (C.6.35) y (C.6.37), en conjunto con que el espesor de una lamina de Fierro Silicoso M- 4 es de 0,27mm. Se reemplazan dichos valores en la ecuación (C.6.26), quedando finalmente lo siguiente:

$$T_{M-4} = \frac{2 \cdot 3,1416 \times 10^{-3} \Omega \cdot (377 \Omega + 4,4428 \Omega)}{(377 \Omega + 3,1416 \times 10^{-3} \Omega) \cdot (3,1416 \times 10^{-3} \Omega + 4,4428 \Omega)} \cdot e^{-\frac{2,7 \times 10^{-4} \text{ m}}{2,25 \times 10^{-4} \text{ m}}} \quad (\text{C.6.38})$$

$$T_{M-4} = 0,00143 \cdot 0,28899 \quad (\text{C.6.39})$$

$$T_{M-4} = 0,00041323 \quad (\text{C.6.40})$$

Y haciendo uso de la ecuación (2.19) vista en el “Capítulo 2”, se tiene entonces el siguiente resultado:

$$(S.E.)_{dB} = 20 \cdot \log\left(\frac{1}{T_{M-4}}\right) \quad (\text{C.6.41})$$

$$(S.E.)_{dB} = 67,67 \text{ dB} \quad (\text{C.6.42})$$

La ecuación (C.6.42) es finalmente el resultado deseado, el cual gracias a la relación existente entre el campo eléctrico y el magnético en el caso de una onda plana, a consecuencia de la impedancia intrínseca del aire (Ver (C.6.2)), es válida tanto para S.E._E como para S.E._B.

ANEXO D

**Anexo D-1 Medidas de campo electromagnético en la Sala TEM e inmeditaciones –
Estado inicial.**

Estudio ubicación Microscopio Electrónico de Transmisión (TEM).

- **Medidas de Campo Magnético en el Zócalo del Edificio de Geología.**

Las medidas fueron realizadas en un comienzo, con los medidores de campo magnético PFFM modelo 120 (equipo análogo) y el EMDEX II (equipo digital). Estas medidas resultaron ser coincidentes, por lo que en las tablas de valores que se entregan a continuación, se muestran solo los resultados obtenidos con el medidor EMDEX II. Este medidor dispone de tres sensores de campo magnético, ubicados en tres direcciones ortogonales, de modo que en cualquier posición obtiene el campo magnético resultante total, en valor efectivo. El instrumento entrega directamente la medida en unidades de: Gauss (G) o mili Gauss (mG). Por otra parte, el ancho de banda de medida abarca desde 40 a 800Hz, lo que permite incluir el efecto de corrientes armónicas, hasta del orden 16 para el caso de 50 Hz.

Las medidas indicadas a continuación, fueron realizadas tanto al interior como en las inmediaciones de la Sala TEM, cuando dicha sala se encontraba en la condición inicial en la cual ningún equipo había sido situado en el interior de ella (Figura 4.5), y cuando aun no se le había efectuado el blindaje generalizado a la sala. Es decir, cuando la sala se encontraba sometida a los mayores niveles de interferencias electromagnéticas, los cuales se describen en forma resumida en la Figura 4.15.

1. Medida campo magnético interior Sala TEM, con consumo máximo del momento.

a. Eje 1: Dirección Norte- Sur, desde la pared detrás del tablero eléctrico principal.

Distancia desde Muro Norte (m)	Inducción Magnética - B (mG)	Corriente en Tablero (A).
0	10,9	61,1
1	4,3	70,2
2	3,3	62,5
3	2,3	67,9
4	2,1	71,0
5	2,1	60,6
6	2,5	58,7

Tabla D.1.1: Magnitudes de inducción magnética y corrientes medidas en el Eje 1.

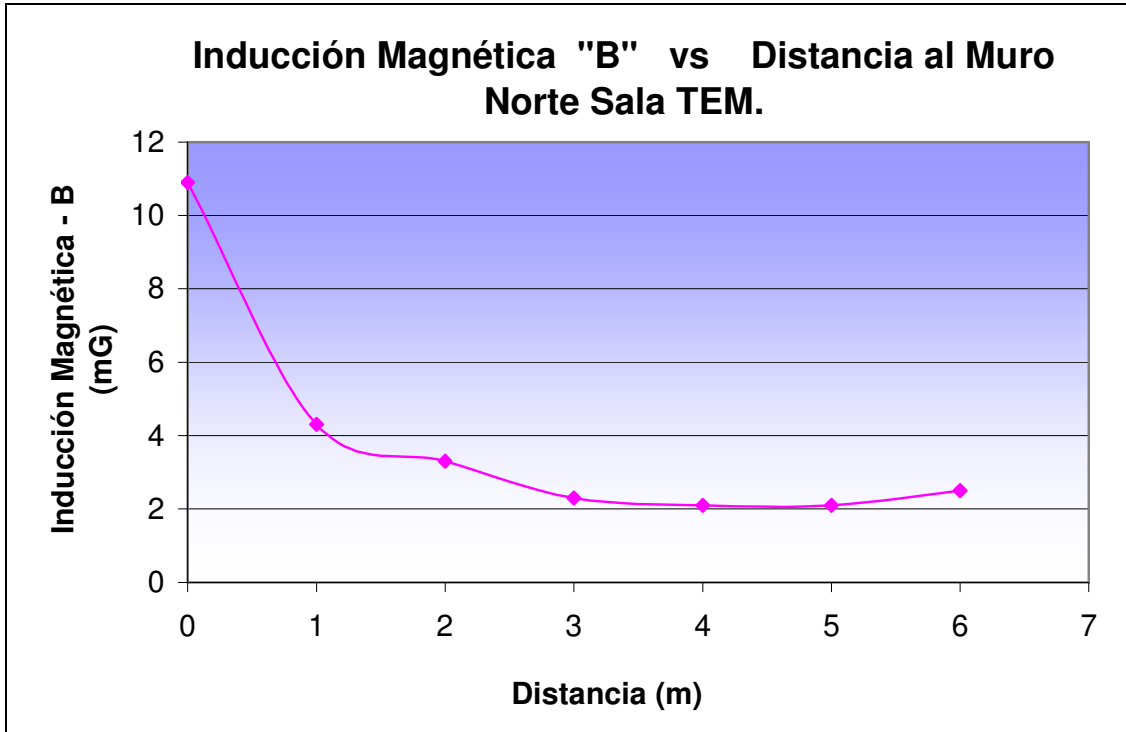


Figura D.1.1: Inducción Magnética vs Distancia al Muro Norte.

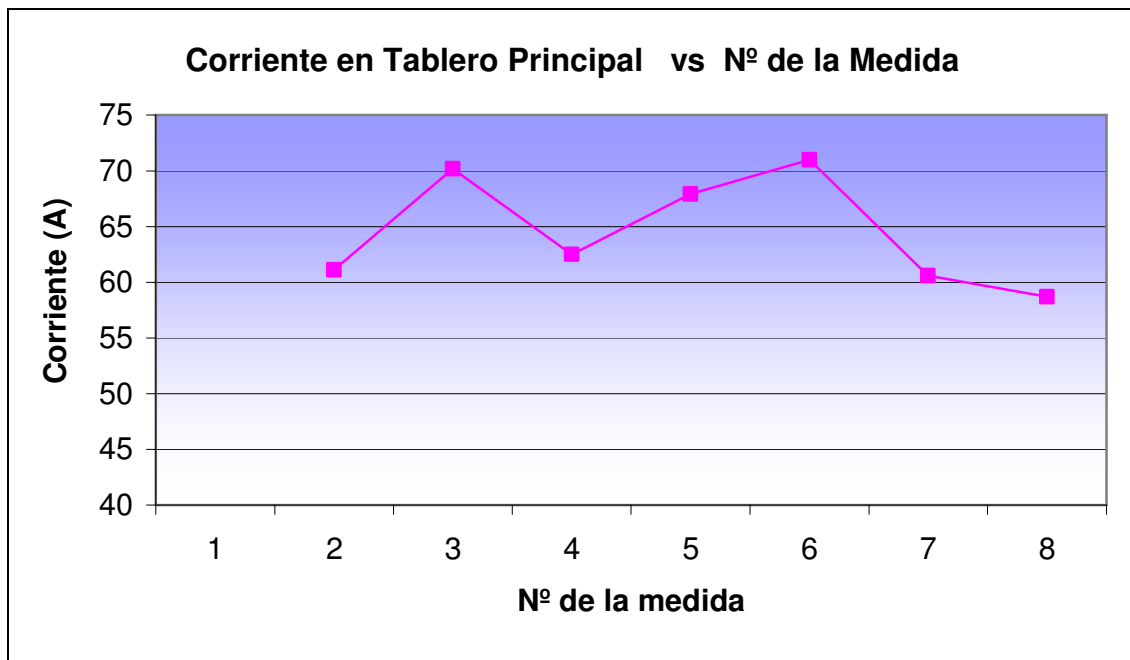


Figura D.1.2: Corrientes medidas en Tablero Principal simultáneamente con las medidas de inducción magnética.

Comentarios:

De la “Figura D.1.1”, se observa el efecto de alejarse del tablero eléctrico, reduciendo la inducción magnética desde un valor de 10,9mG a 2,1mG en el centro de la Sala TEM. Se observa también una tendencia a valores crecientes en el lado Sur de la sala, a causa de la existencia de numerosos equipos de condensación de los sistemas de aire acondicionado del Zócalo del Edificio de Geología. Por otra parte, también existe un equipo de aire acondicionado situado en la esquina superior sur- poniente de la sala, el cual también influye notablemente al comportamiento electromagnético al interior de la Sala TEM.

Además gracias a la “Figura D.1.2”, es posible añadir que se aprecia un valor de corrientes relativamente uniforme, dentro de los 60 y 70 Amperes, para un consumo a plena carga.

b. Eje 2: Dirección Norte- Sur, desde la pared detrás del tablero eléctrico menor.

Distancia desde Muro Norte (m)	Inducción Magnética - B (mG)	Corriente en Tablero (A).
0	2,8	69,5
1	1,9	68,7
2	2,1	62,2
3	2,8	63,0
4	2,5	62,7
5	2,2	56,7
6	2,2	64,7

Tabla D.1.2: Magnitudes de inducción magnética y corrientes medidas en el Eje 2.

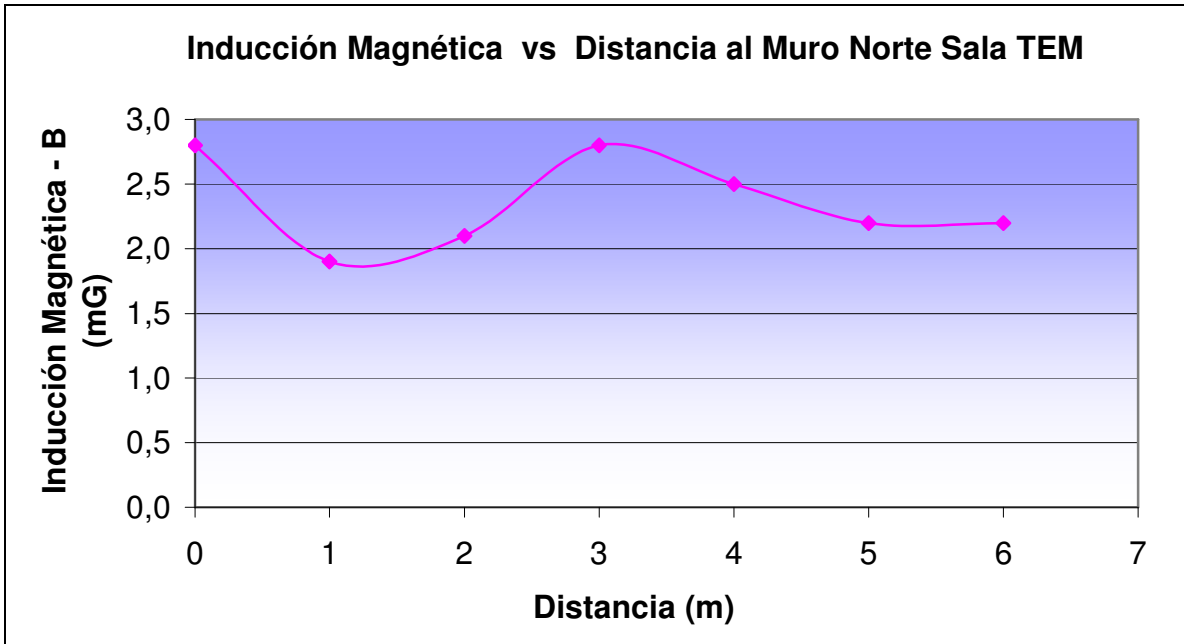


Figura D.1.3: Inducción Magnética vs Distancia al Muro Norte.

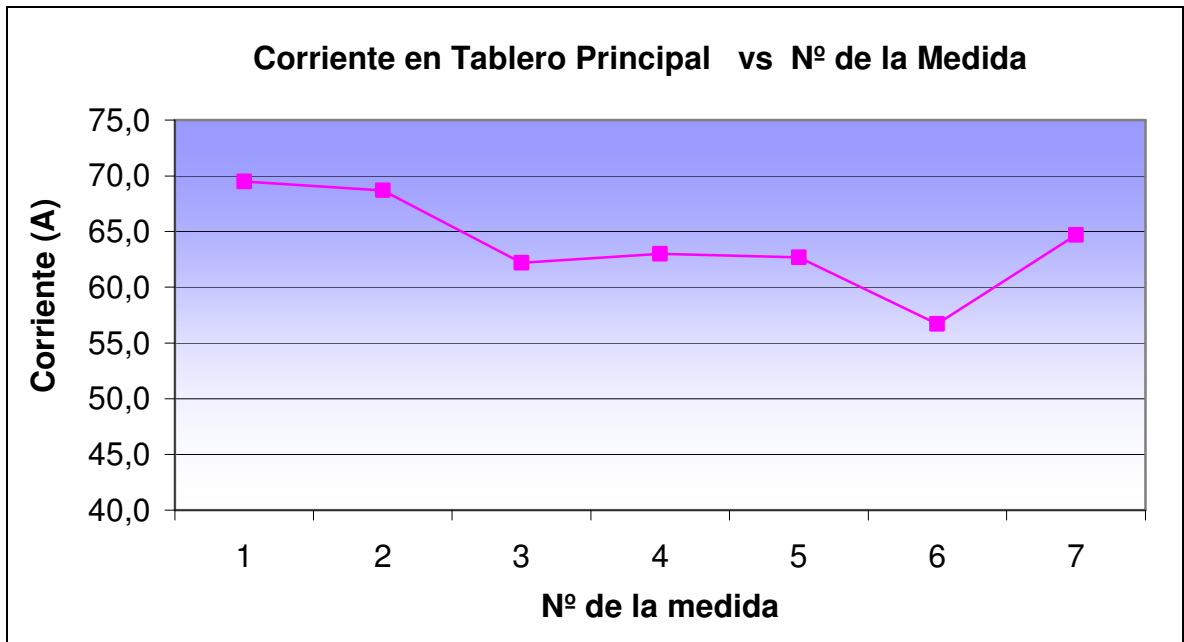


Figura D.1.4: Corrientes medidas en Tablero Principal simultáneamente con las medidas de inducción magnética.

Comentarios:

De la “Figura D.1.3”, se observa que las magnitudes de la inducción alcanzada por este otro tablero son de menor magnitud que el anterior, fluctuando entre los 2mG y los 3mG. Magnitudes que por lo demás se mostraron bastante fluctuantes en el transcurso de la medida. Además se observa a los 3m un aumento repentino de la magnitud de la inducción, la cual se justifica con la existencia de un equipo de aire acondicionado en el exterior del muro poniente de la Sala TEM (acondiciona a la sala adyacente).

Además gracias a la “Figura D.1.4”, es posible añadir que también se aprecia un valor de corrientes relativamente uniforme, dentro de los 60 y 70 Amperes, para un consumo a plena carga.

c. Eje 3: Eje de medida vertical, al centro de la sala – Desde el suelo hacia el cielo.

Distancia desde Muro Norte (m)	Inducción Magnética - B (mG)
0,0	0,6
0,5	0,9
1,0	0,9
1,5	1,0
2,0	1,1
2,5	0,9
3,0	1,1

Tabla D.1.3: Magnitudes de inducción magnética en el Eje 3.

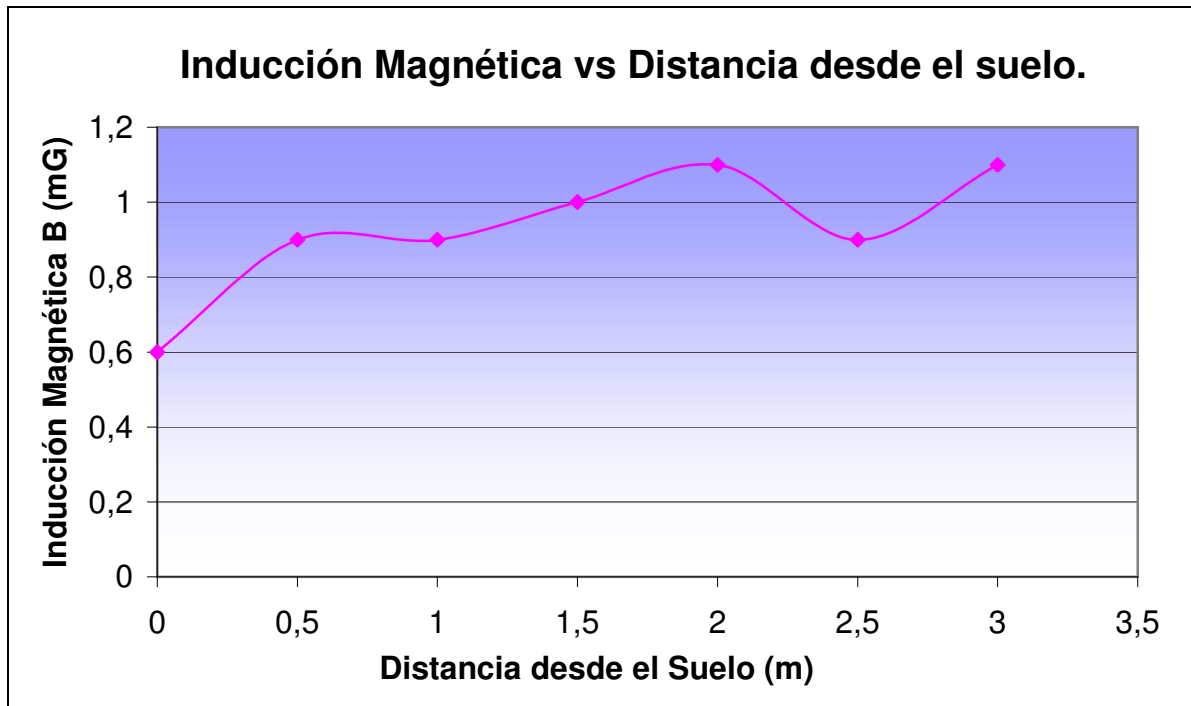


Figura D.1.5: Inducción Magnética en el centro de la Sala TEM vs Distancia desde el suelo.

Comentarios:

De la “Figura D.1.5”, se observa que las magnitudes de la inducción magnética van aumentando a medida que el instrumento se va acercando al cielo. Dicho aumento de magnitud, se puede justificar ya que existen numerosos conductores eléctricos que atraviesan por sobre el cielo falso de la sala.

2. Medida campo magnético interior Sala TEM, con corte de energía en ella.

Se realizó la medida de inducción magnética en el Eje 1, es decir avanzando en la dirección “Norte – Sur” desde la pared Norte de la Sala TEM, inmediatamente detrás del T.D.A.F.

Además se realizó la medida con un corte de energía puntual de la Sala TEM, intentando semejar la condición en que operará el microscopio, ya que para su funcionamiento requiere estar a oscuras y mantener cualquier fuente de EMI en el interior de la sala apagada mientras dure el trabajo con el TEM. Los resultados se indican a continuación en la Tabla D.1.4 y Figura D.1.6.

Distancia desde Muro Norte (m)	Inducción Magnética - B (mG)
0,0	1,3
1,0	1,4
2,0	1,2
3,0	1,0
4,0	1,0
5,0	1,0
6,0	0,7

Tabla D.1.4: Magnitudes de inducción magnética en el Eje 1 – con corte de energía solamente en la Sala TEM.

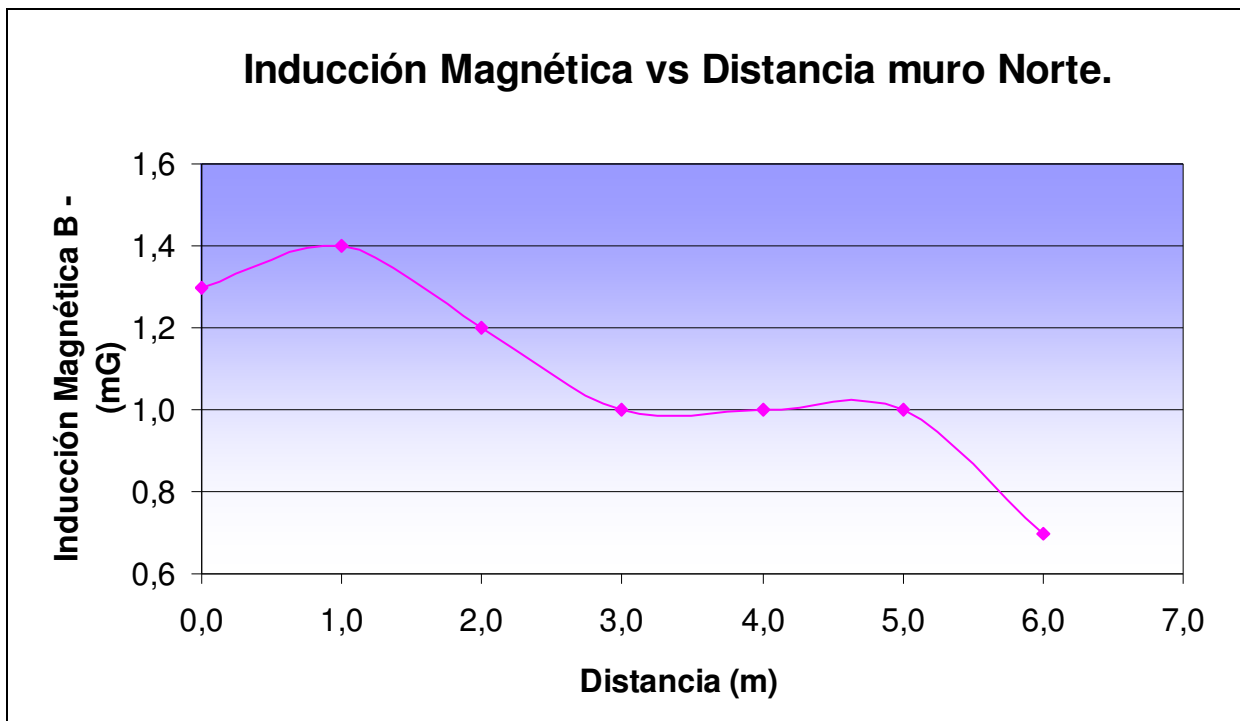


Figura D.1.6: Inducción Magnética con corte de energía en la Sala TEM vs Distancia al muro Norte, detrás del tablero eléctrico principal.

3. Medida campo magnético interior Sala TEM, con corte de energía parcial en el Zócalo del Edificio de Geología (salvo un solo laboratorio del Zócalo).

Una nueva medida de importancia resulta aquella en la cual el Zócalo del Edificio de Geología se encuentra con un corte de energía parcial. Puesto que ello, permite observar cual es la diferencia sustancial de la influencia electromagnética proveniente de todos los equipos que actúan como fuentes de EMI en dicho piso, mediante la comparación de los gráficos de la condición de trabajo normal del edificio (es decir, a plena carga), y los gráficos en los cuales se ha realizado el corte de la energía.

A continuación entonces, se entregan los resultados de la medición realizada al igual que la anterior, en el Eje de medida 1. Es decir, siguiendo la dirección Norte- Sur, desde la pared Norte de la Sala TEM, en la posición que está inmediatamente detrás del tablero eléctrico principal.

Distancia desde Muro Norte (m)	Inducción Magnética - B (mG)
0,0	0,9
1,0	0,7
2,0	1,2
3,0	1,0
4,0	0,6
5,0	0,4
6,0	0,5

Tabla D.1.5: Magnitudes de inducción magnética en el Eje 1 – con corte de energía parcial en el Zócalo del Edificio de Geología (salvo un laboratorio).

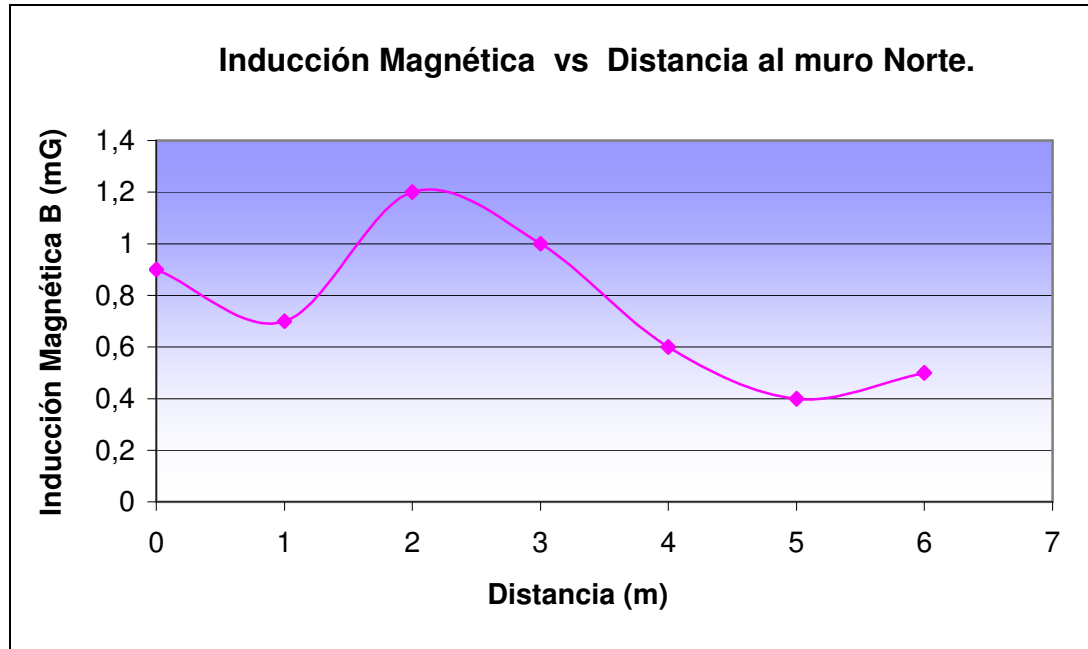


Figura D.1.7: Inducción Magnética con corte de energía parcial en el Zócalo del Edificio de Geología vs Distancia al muro Norte, detrás del tablero eléctrico principal.

4. Medida “B” interior Sala TEM, con corte de energía Total del Edificio de Geología.

Medida en el Eje 1, dirección “Norte – Sur” desde el muro Norte, directamente detrás del tablero eléctrico principal.

Distancia desde Muro Norte (m)	Inducción Magnética - B (mG)
0,0	0,6
1,0	0,4
2,0	1,0
3,0	1,0
4,0	0,7
5,0	0,5
6,0	0,7

Tabla D.1.6: Magnitudes de inducción magnética en el Eje 1 – con Corte de Energía Total.

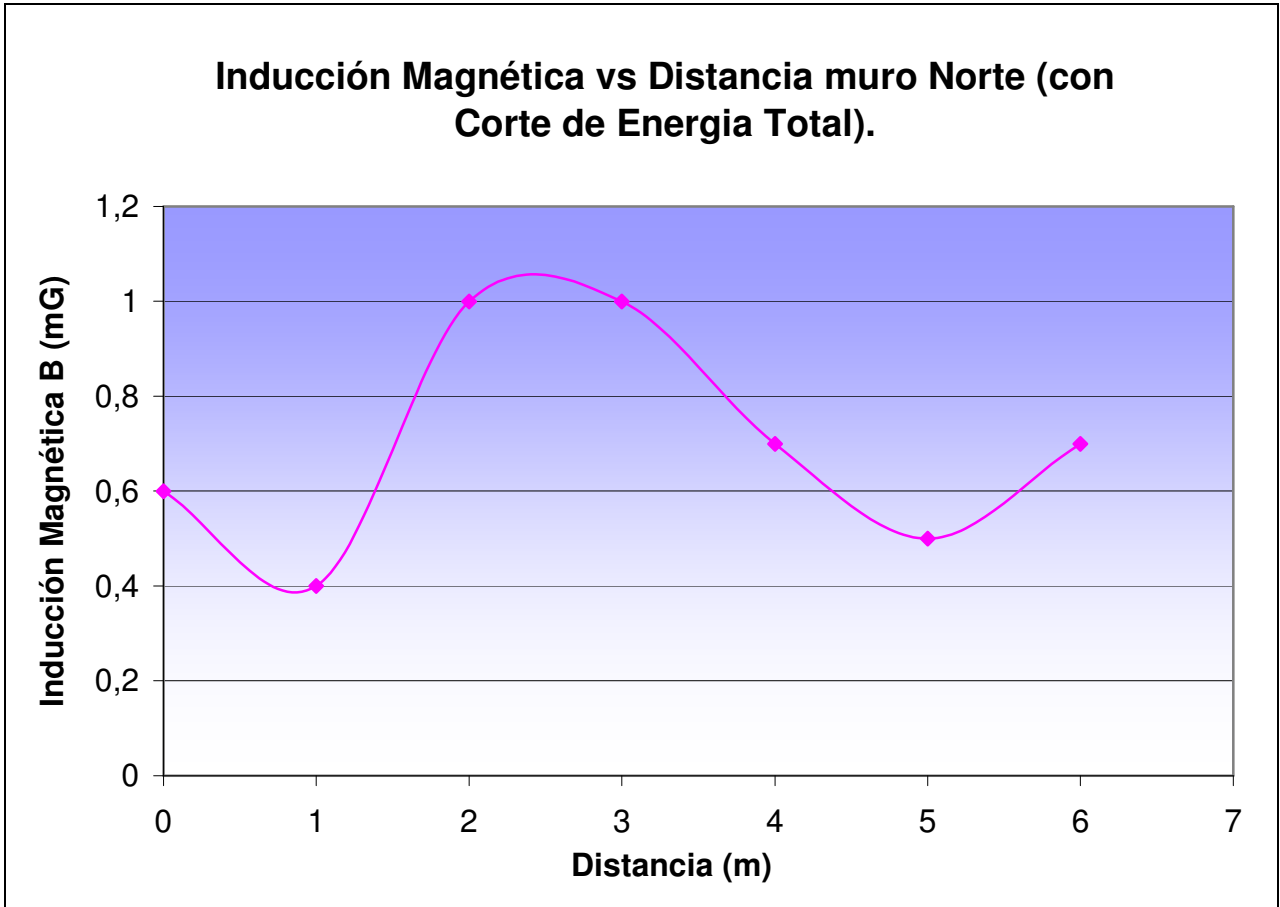


Figura D.1.8: Inducción Magnética con Corte de Energía Total del Edificio de Geología vs Distancia al muro Norte, detrás del tablero eléctrico principal.

Comentarios.

Es notable apreciar como en la Figura D.1.1 se aprecian niveles de inducción desde 11mG inmediatamente detrás del T.D.A.F, hasta luego decaer a valores que están entre 2mG y 4mG. Panorama que luego cambia drásticamente al medir en condiciones de corte parcial en la Sala TEM (Figura D.1.6), en donde se observa que los valores de inducción magnética inmediatamente detrás del tablero caen alrededor de 1.2mG o 1.4mG, para luego ir degradándose aun más a medida que uno se aleja del muro Norte de la Sala.

Por otro lado las Figuras: D.1.7 y D.1.8, nos indican claramente como a medida que vamos dejando carga fuera de servicio, la magnitud de la inducción magnética que se mide en la Sala TEM, va decreciendo cada vez más. Lo cual es una demostración clara de la manera en que la operación normal de los equipos eléctricos introduce fuentes de interferencias

electromagnéticas al Edificio de Geología. Lo cual va en desmedro del funcionamiento del microscopio electrónico de transmisión.

Por otra parte, en las figuras: D.1.7 y D.1.8, se observa que una vez realizado algún tipo de corte de energía, ya sea parcial del Zócalo o Total del Edificio de Geología respectivamente para el caso de cada figura antes señalada, la influencia de interferencias electromagnéticas provenientes desde el Edificio de Geología hacia la Sala TEM (i.e. desde el Norte de la Sala TEM), se reduce considerablemente a valores entre 0,4mG y 0,8mG. Sin embargo, por las ventanas de la Sala TEM ubicadas en el muro Sur de la sala, comienzan a filtrarse interferencias provenientes desde el exterior del Edificio de Geología, que sin duda por lo que se logra apreciar en las figuras: D.1.7 y D.1.8, es mayor que las interferencias provenientes desde el edificio. Lo cual es lógico, pues con condiciones de corte de energía se están eliminando las fuentes de EMI.

Anexo D-2 Contrastación de la S.E._B de dos láminas ferromagnéticas diferentes.

Ensayos realizados en el laboratorio de A.T.

Siguiendo la misma estrategia de medida señalada en la figura 4.31, a continuación se presentan dos ensayos realizados en el laboratorio de Alta Tensión, en los cuales se pretendió simular el blindaje que podrían proporcionar dos tipos de materiales diferentes:

1. El primero es con Acero Corriente (Figura D.2.1).
2. Y el segundo fue realizado con Fierro Silicoso de Grano Orientado M-4 (Figura D.2.2).

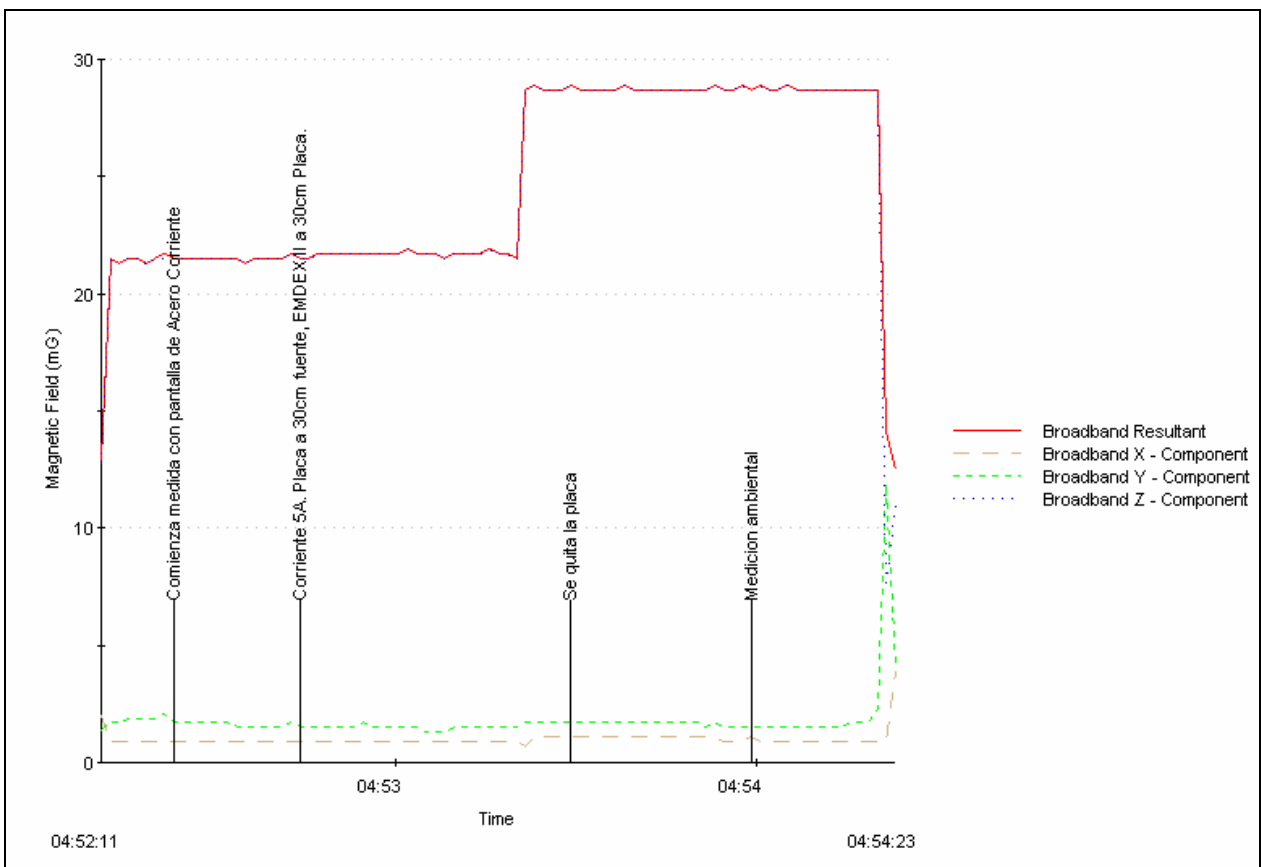


Figura D.2.1: Atenuación magnética resultante con Acero Corriente.

Como se observa de la figura D.2.1, el acero corriente atenuó el campo magnético resultante desde 28mG a 21.5mG aproximadamente, es decir, se obtuvo una variación de 2.29dB. En cambio si se observa la figura D.2.2 a continuación:

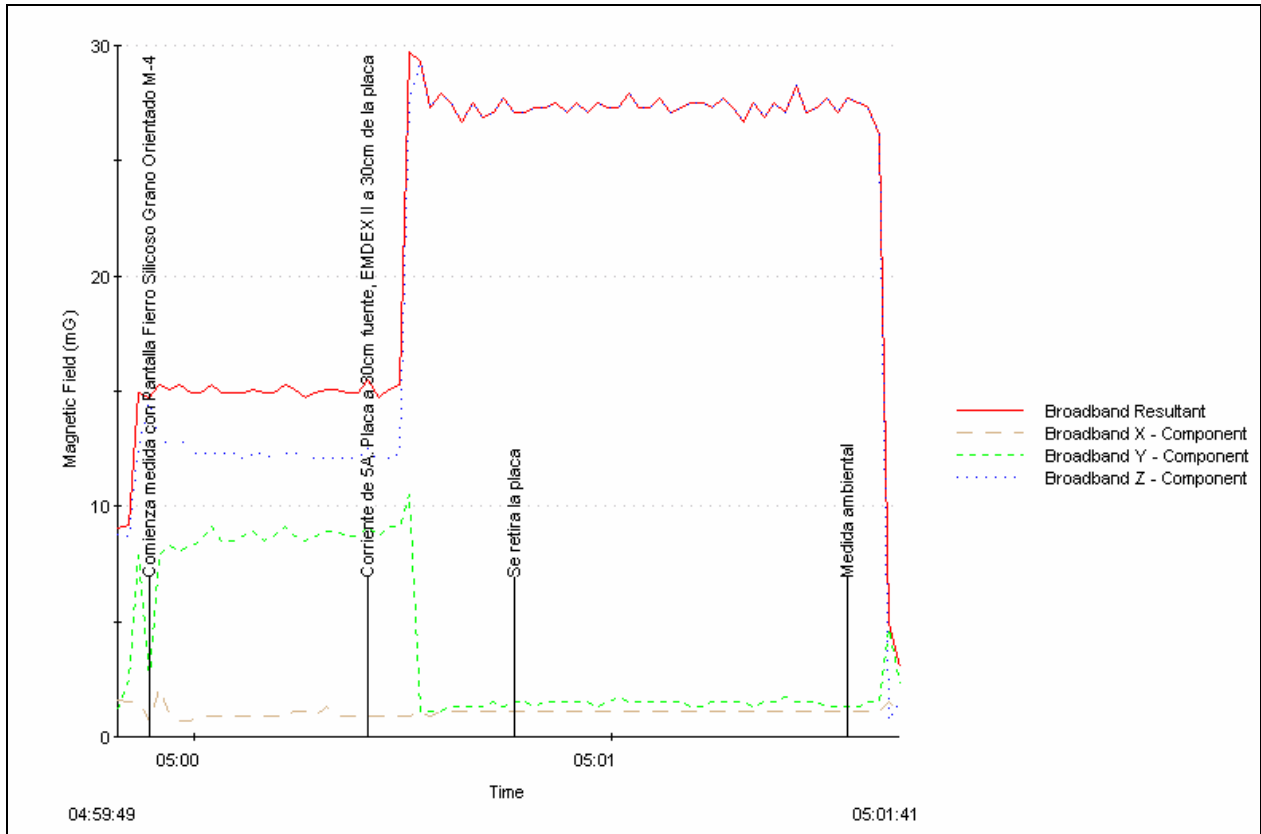


Figura D.2.2: Atenuación magnética resultante con Fierro Silicoso de Grano Orientado M-4.

La atenuación obtenida va desde los 28mG a los 14mG, o lo que es equivalente, existe una atenuación de 6.021dB del campo magnético resultante. Lo cual es 3.731dB superior al caso del blindaje con una pantalla de acero corriente.

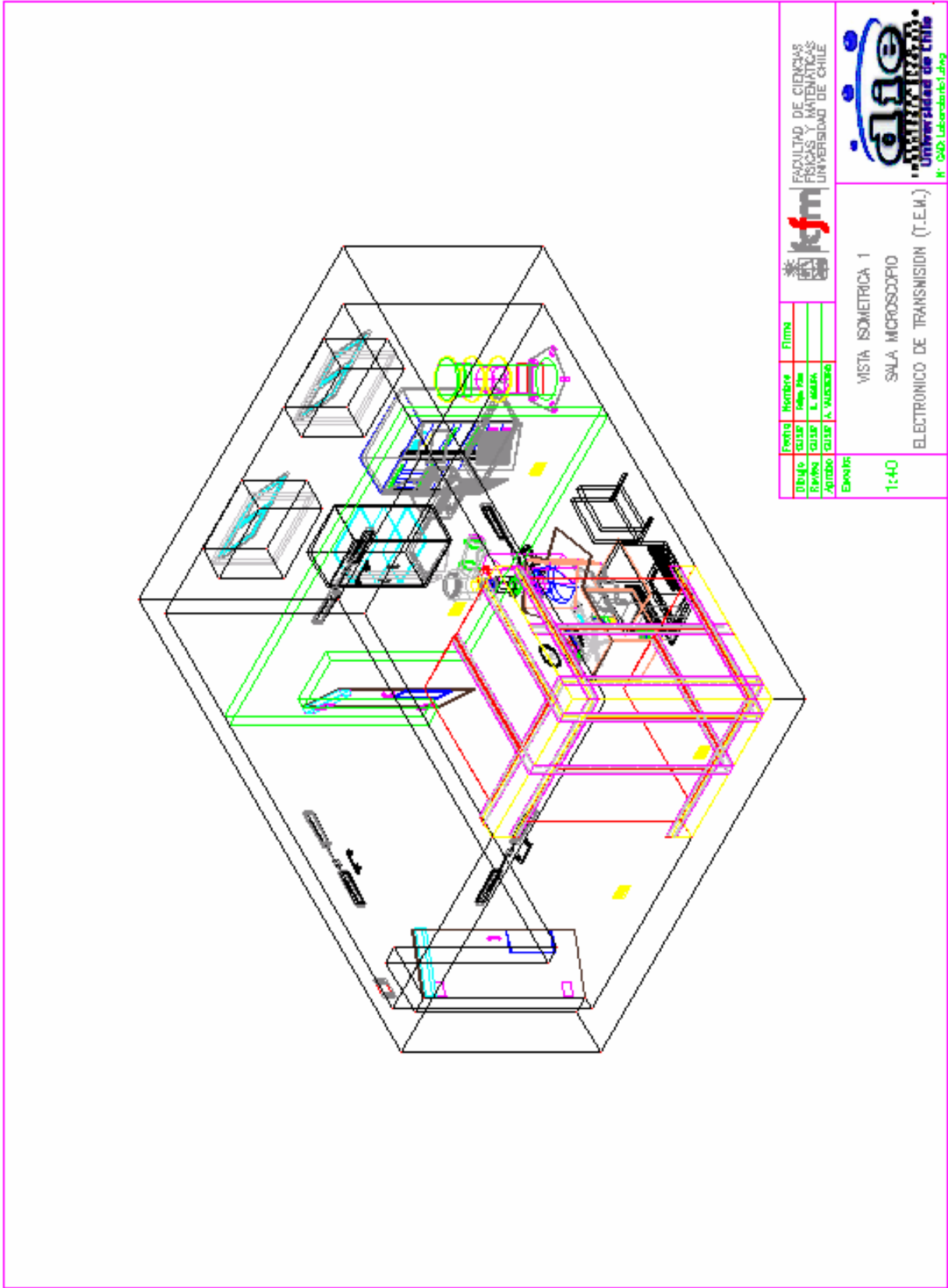
Por otro lado, de la figura D.2.1 se observa también que las componentes “X” e “Y” del campo magnético son muy pequeñas, y que en general sus magnitudes se mantienen prácticamente estáticas tanto en la medida “con lámina”, como en la medida “sin lamina”. Sin embargo, para el caso de la medida de la S.E._B del Fierro Silicoso de Grano Orientado M-4 (figura D.2.2), se observa que la componente “Y” del campo magnético aumenta a consecuencia que la “orientación del grano” del Fierro Silicoso M-4, hace que las corrientes inducidas recorran la placa en la dirección del “Eje Z” aumentando con ello el campo generado en el “Eje Y”. Sin embargo, también como consecuencia de ello se observa una atenuación adicional de la componente “Z” del campo magnético resultante, logrando con ello alcanzar para el “Eje Z” una atenuación total de 7.01dB, i.e. alrededor de 0.98dB más que el campo resultante.

Con todo aquello, se pretende dejar claro el efecto “direccional” que provoca la orientación del grano en las láminas de Fierro Silicoso M-4. Propiedad que junto con su alta permeabilidad magnética y buena conductividad eléctrica, lo han hecho un material tan ampliamente utilizado en la industria eléctrica.

Por otra parte, para poder contrarrestar el efecto adverso que provoca el aumento del campo en la componente “Y”, se deberá tener en cuenta la instalación de las placas de las paredes opuestas de la Sala TEM en la misma dirección, pero en sentidos opuestos. Con ello, las componentes inducidas en el “Eje Y” se restarán de a pares, en forma respectiva.

ANEXO E

Anexo E-1 Planos de diseño del blindaje electromagnético Sala TEM.

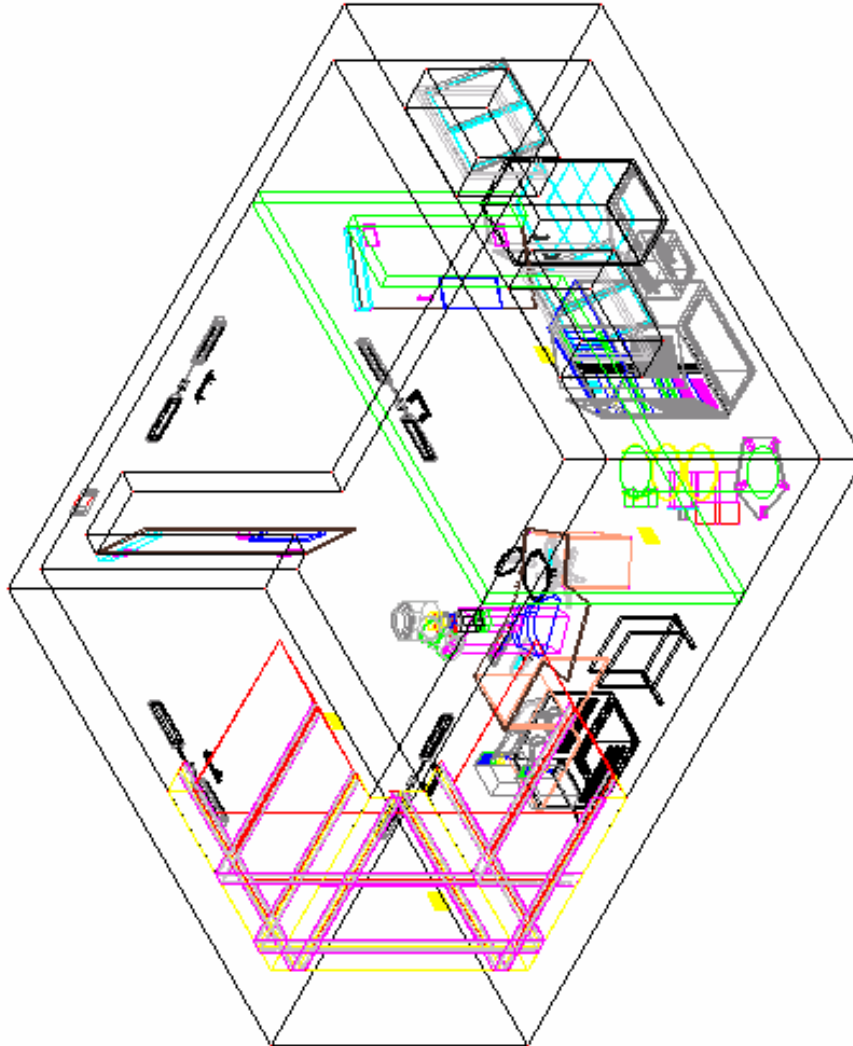




Fecha	Nombre	Fin
02/07/2014	Carlos	Modelo 3D
02/07/2014	Carlos	L. SALAS
02/07/2014	A. VALDEBANO	

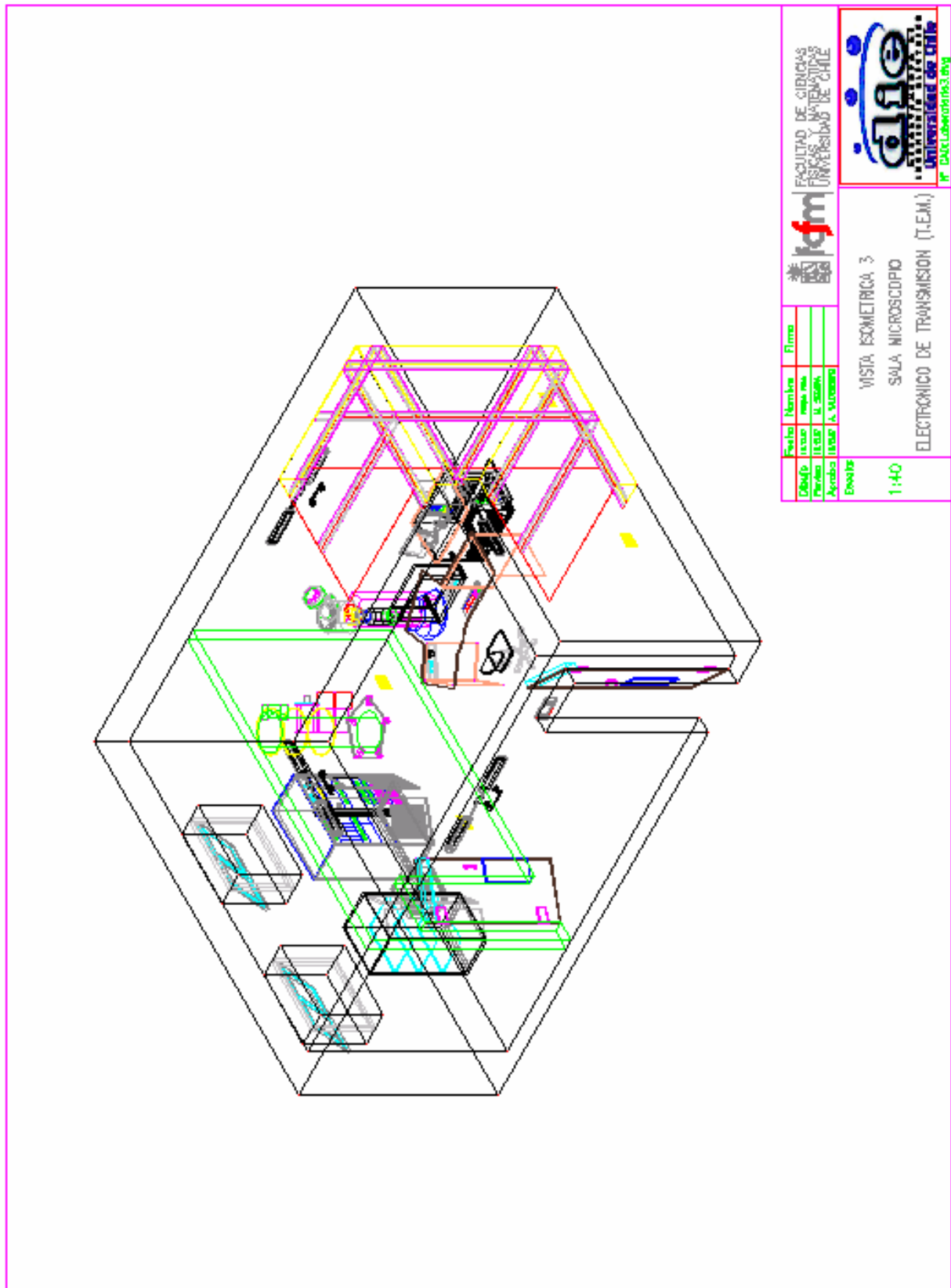

 FACULTAD DE CIENCIAS
 FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
 UNIVERSIDAD DE CHILE





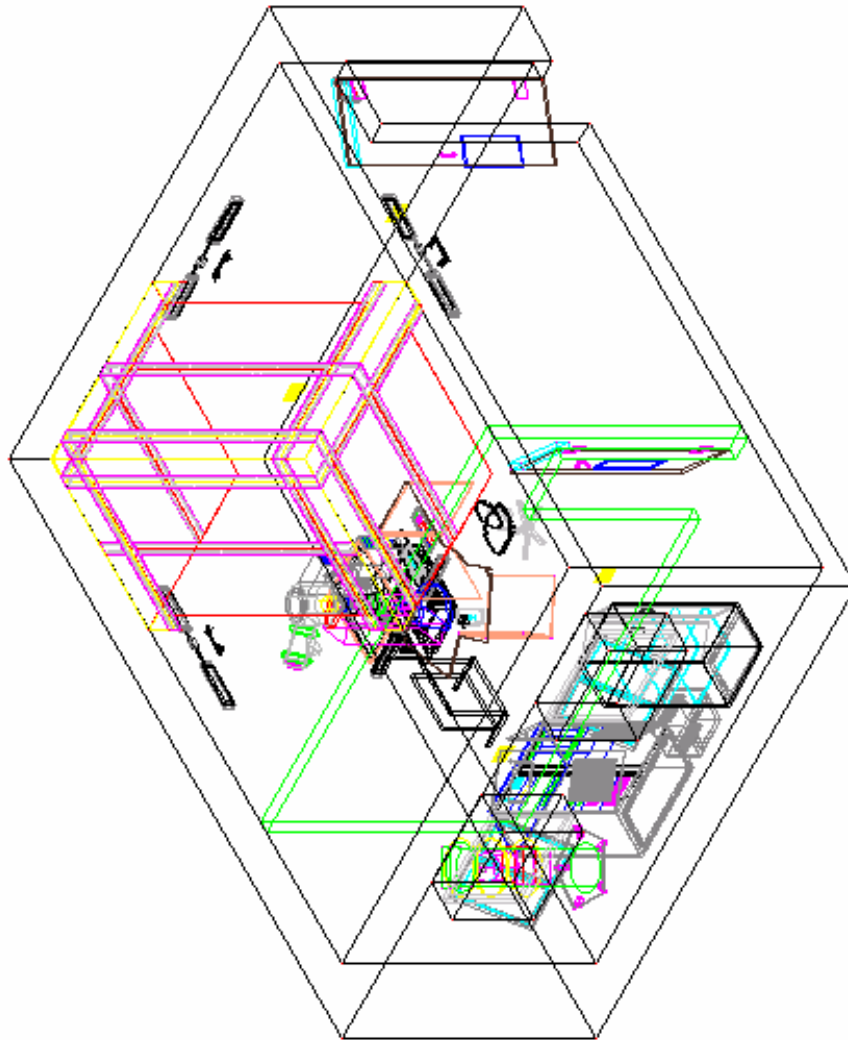
VISTA ISOMETRICA 1
 SALA MICROSCOPIO
 ELECTRONICO DE TRANSMISION (T.E.M.)
 Escala:
 1:40





Fecha	Nombre	Firma	 FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS UNIVERSIDAD DE CHILE	 Laboratorio de Compatibilidad Electromagnética Universidad de Chile Tel: 5621 54000000
Diseño	Autores			
Revisión	U. CORREA			
Aprobado	A. VILLALBA			
Escala:			VISTA ISOMETRICA 2 SALA MICROSCOPIO ELECTRONICO DE TRANSMISION (T.E.M.)	
Escala:			1:40	

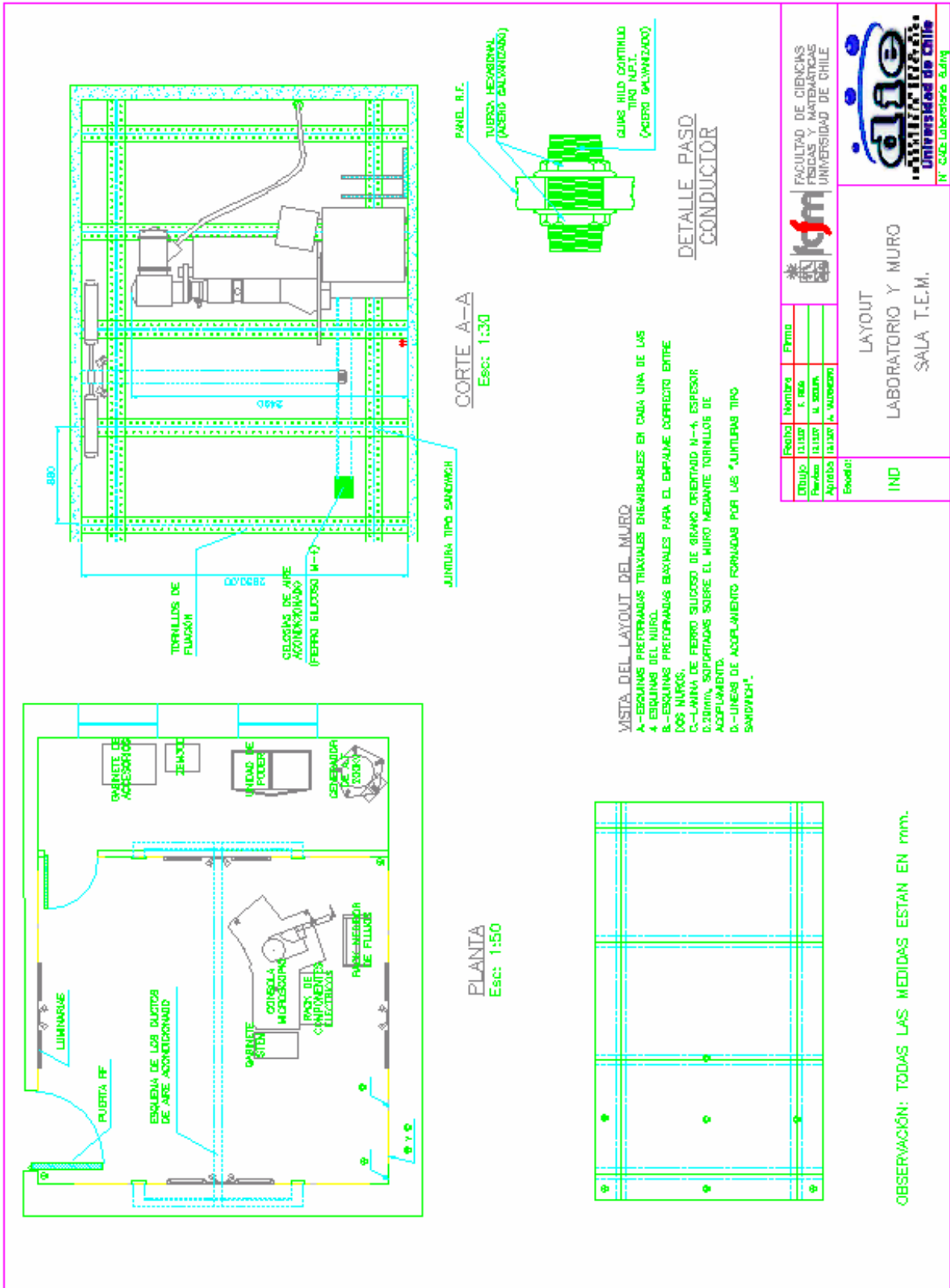


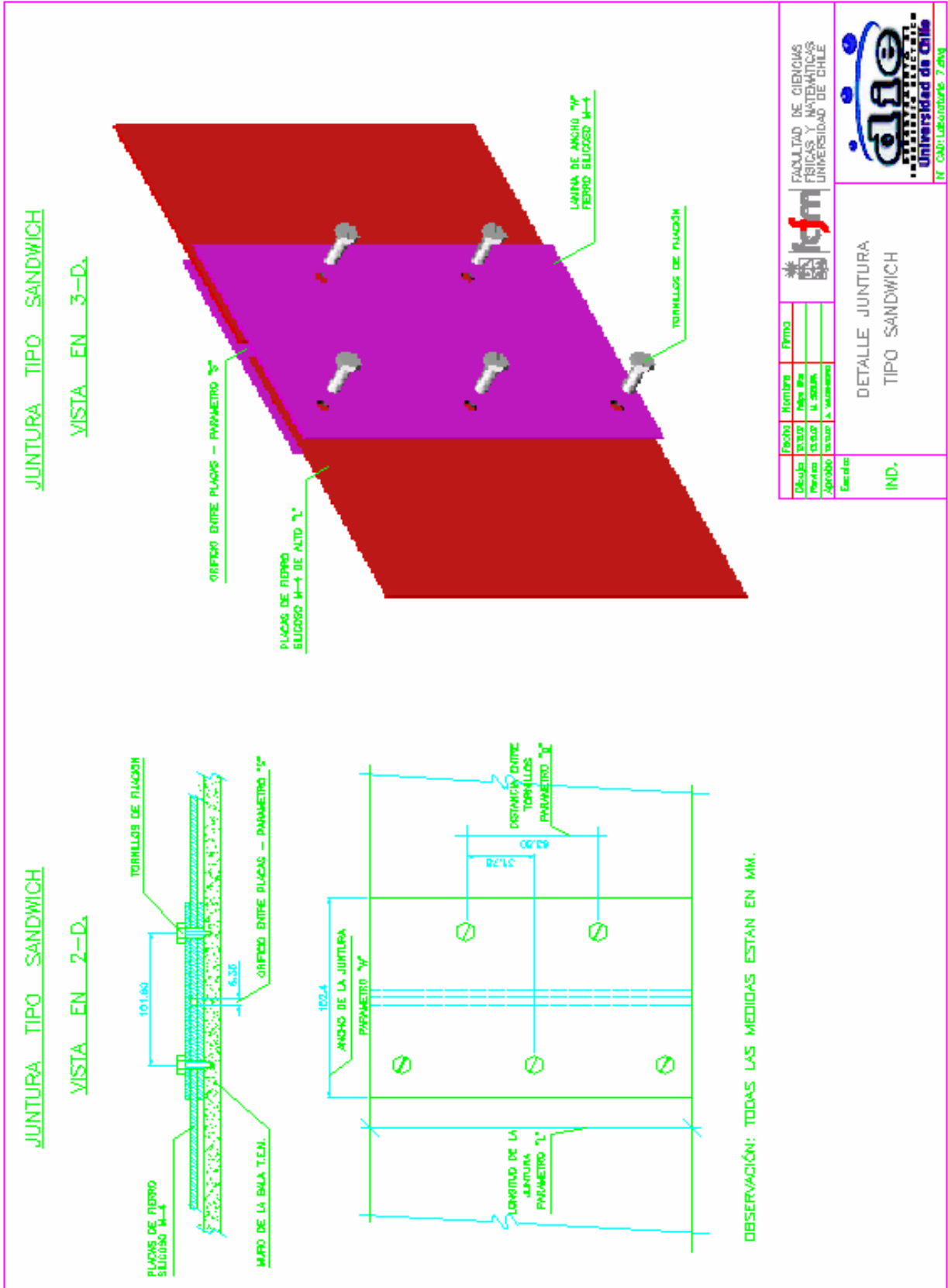
			
Fecha:	Nombre:	Fecha:	Firma:
Dibujó:	Fecha de entrega:		
Proyecto:	U. de Chile:		
Aprobado:	Por:		
Escala:		VISTA ISOMETRICA, 3 SALA MICROSCOPIO ELECTRONICO DE TRANSMISION (T.E.M.)	
1:40			



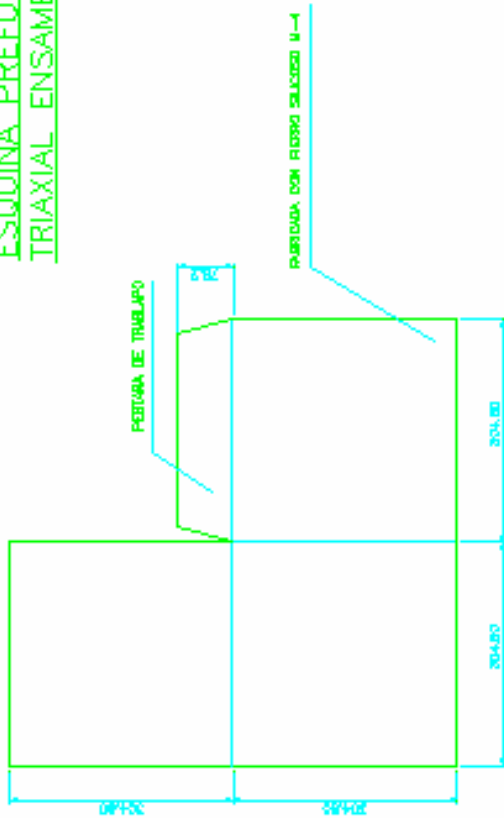
		FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS UNIVERSIDAD DE CHILE	
Fecha	Nombre	Firma	
Dibujó	Fecha del		
Revisó	o. con		
Aprobó	a. Vices		
Ejemplar			
1:40		VISTA ISOMETRICA_4 SALA MICROSCOPIO ELECTRONICO DE TRANSMISION (T.E.M.)	
		 Universidad de Chile www.ciencia.uchile.cl	



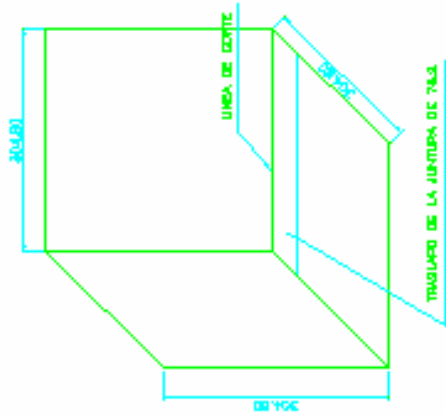
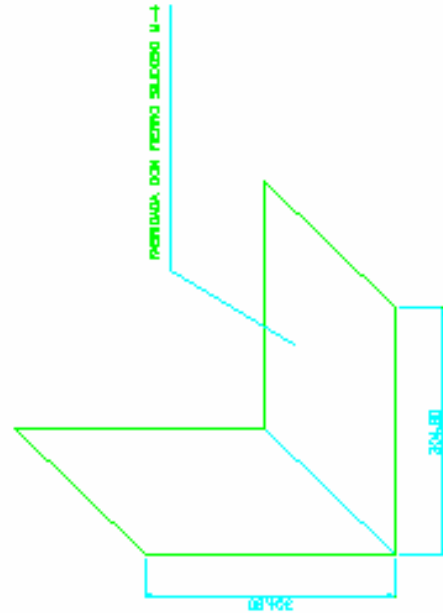




ESQUINA PREFORMADA TRIAXIAL ENSAMBLABLE



ESQUINA PREFORMADA BIAIXIAL

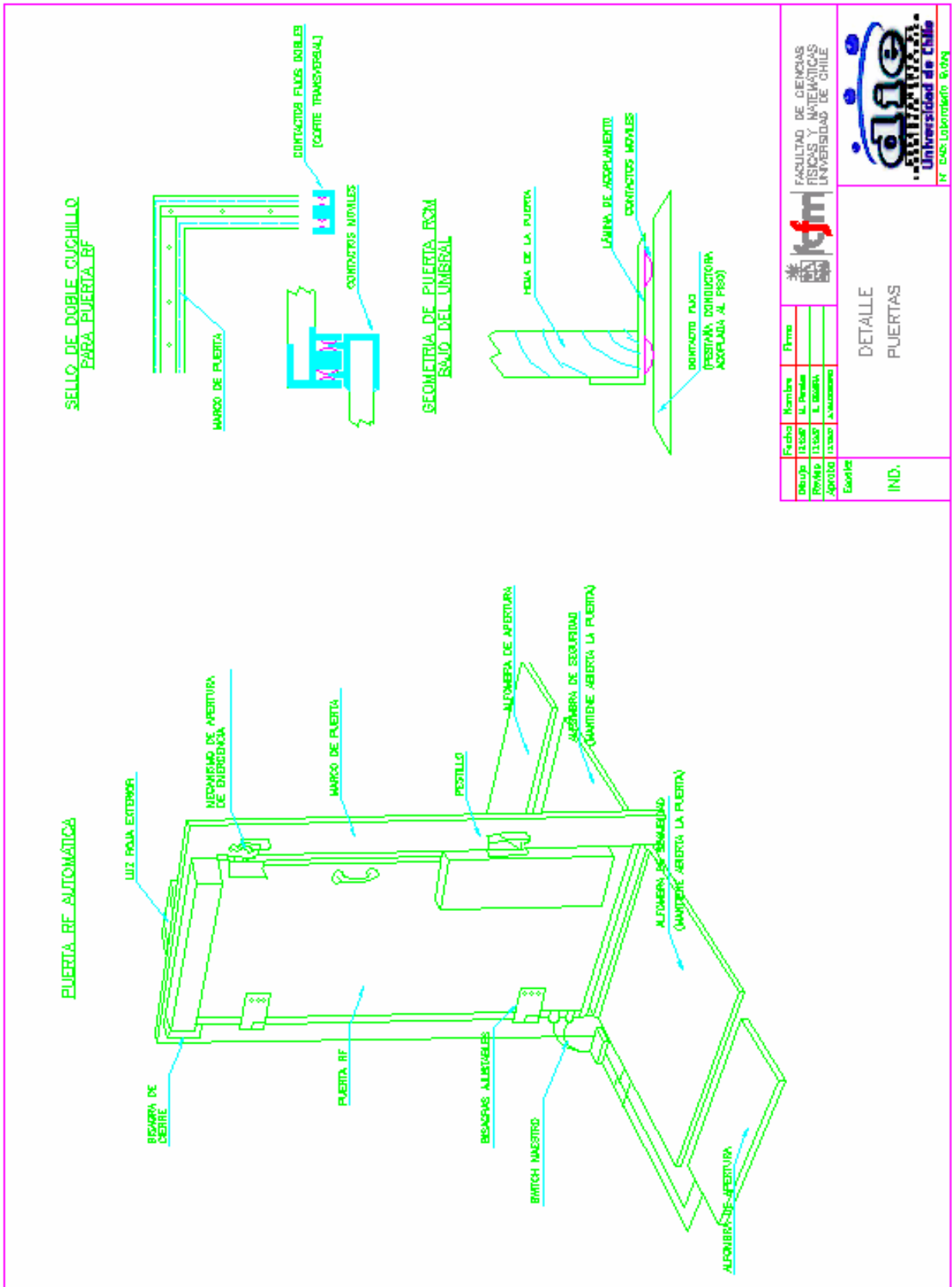


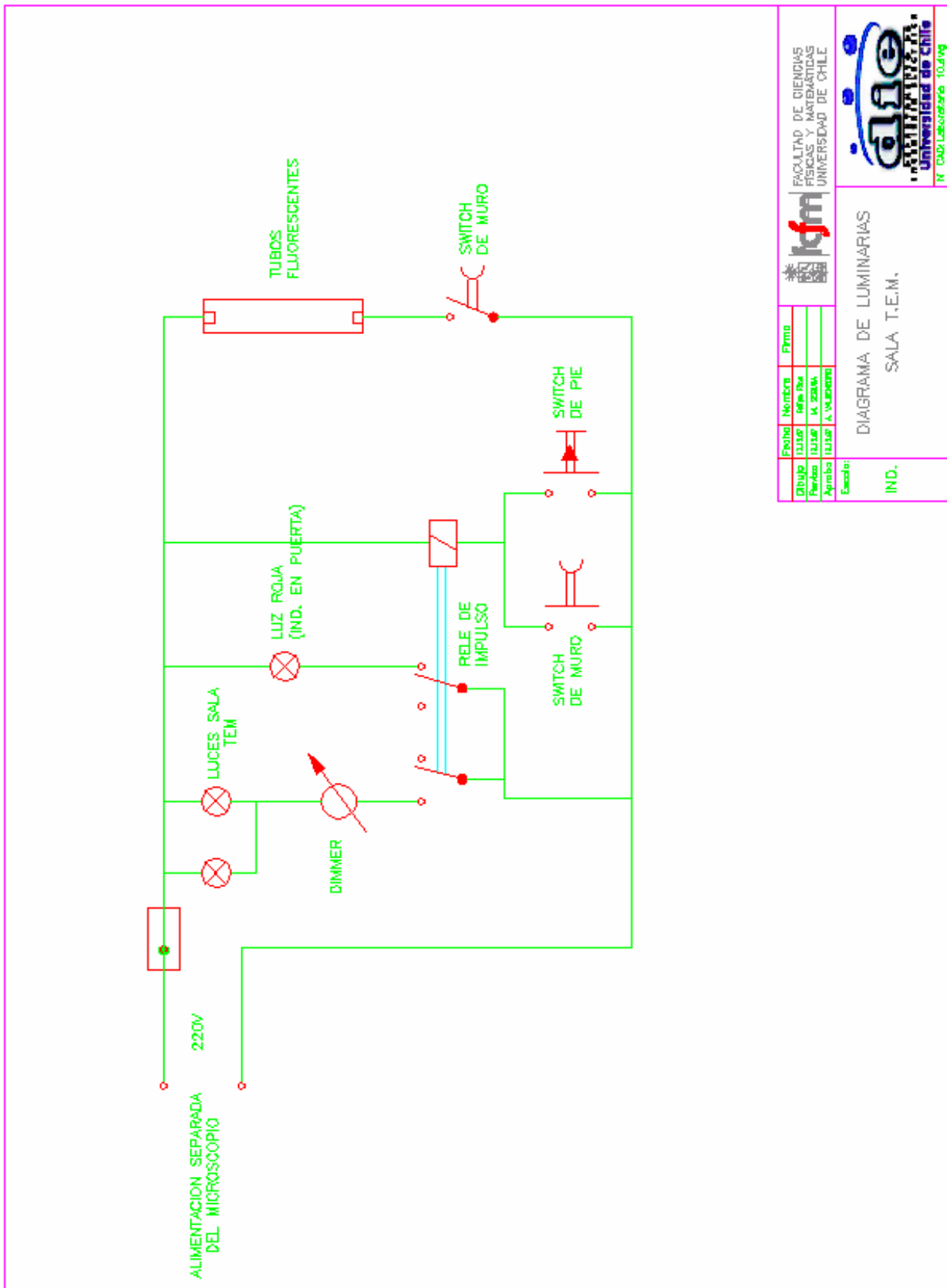
OBSERVACION: TODAS LAS MEDIDAS ESTAN EN MM.

Fecha	Nombre	Plano
01/05/2011	Diego Salas	01
02/05/2011	Diego Salas	1.0
03/05/2011	Diego Salas	1.0

IND. DETALLE ESQUINAS PREFORMADAS ENSAMBLABLES





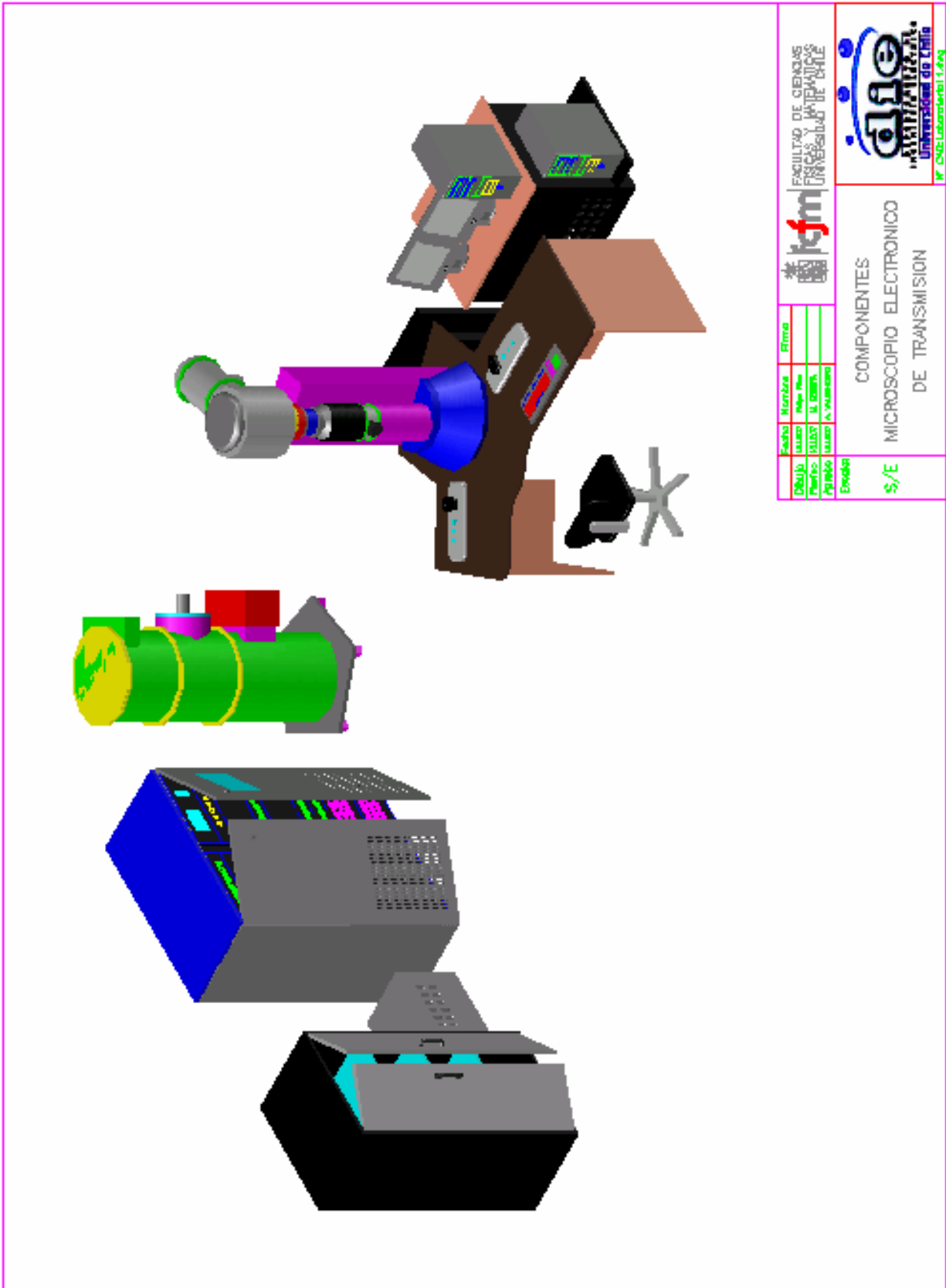
Fecha	Nombre	Firma
Dibuja: 12.10.07	Maria Rosa	
Revisa: 12.10.07	M. Zúñiga	
Aproba: 12.10.07	A. Valdebenito	

Escalafón:
IND.

DIAGRAMA DE LUMINARIAS
SALA T.E.M.




Nº 000 Laboratorio 104.org



Fecha	Nombre	Etapa

Diseño	AutoCAD
Modelado	SOLIDWORKS
Programación	Visual Basic

Expositor: S/E

COMPONENTES
MICROSCOPIO ELECTRONICO
DE TRANSMISION

FCM FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS UNIVERSIDAD DE CHILE

UChile UNIVERSIDAD DE CHILE
LABORATORIO 1.209

Anexo E-2 Efectividad del blindaje electromagnético proporcionado por una Cañería de Acero Galvanizada (C.A.G).

Antecedentes.

El presente anexo, tiene por objeto resumir un compendio de resultados provenientes de la experimentación sobre la Efectividad del Blindaje Electromagnético⁵³ que puede proporcionar una cañería de acero galvanizada, frente a diversas solicitaciones de corriente.

Para poder estudiar dicho fenómeno, se procedió a realizar el siguiente experimento:

En primer lugar, se “tendió” un conductor apoyándolo en sus extremos gracias a la ayuda de dos cadenas de aisladores, ver Figura E.2.1.

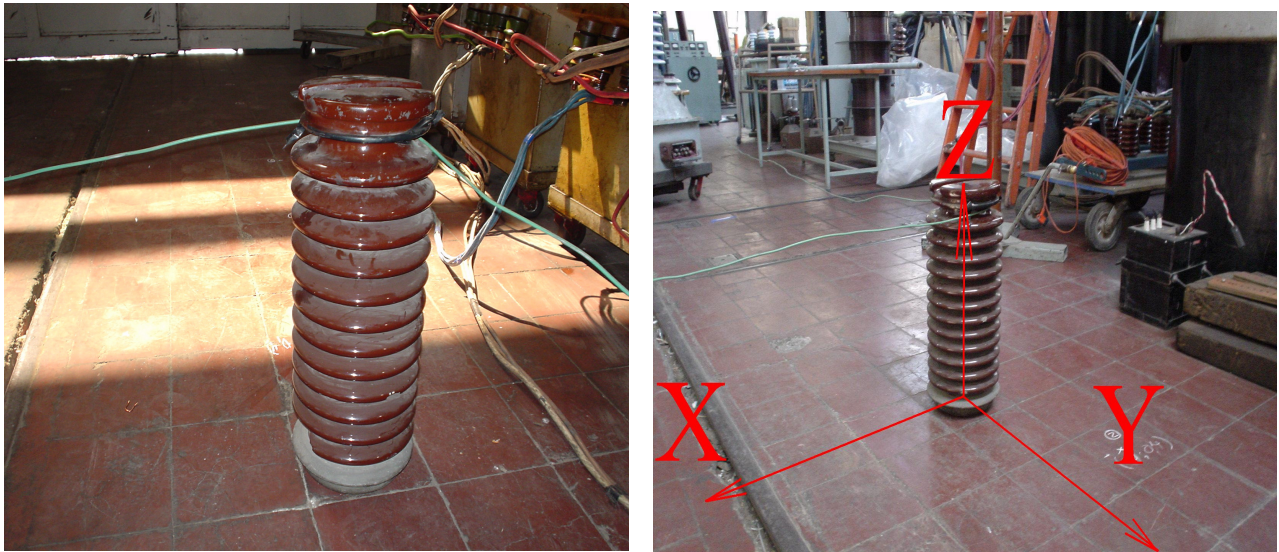


Figura E.2.1: Disposición del conductor tendido al aire libre.

Cada columna de aisladores mide 50cm y el conductor se dispuso a 45cm del suelo. Con todo aquello, se procedió luego a efectuar las mediciones del campo magnético inducido en las vecindades de dicho conductor. Mas específicamente, las medidas se realizaron tomando como sistema de referencia los ejes que se observan en la foto anterior, midiéndose así un perímetro de 3,3m según el eje X (el largo de la cañería de acero galvanizada es de 3m), por 3,5m según el eje Y, siguiendo la estrategia que se presenta en la figura E.2.2.

⁵³ En ingles “Shielding Effectiveness” (S.E).

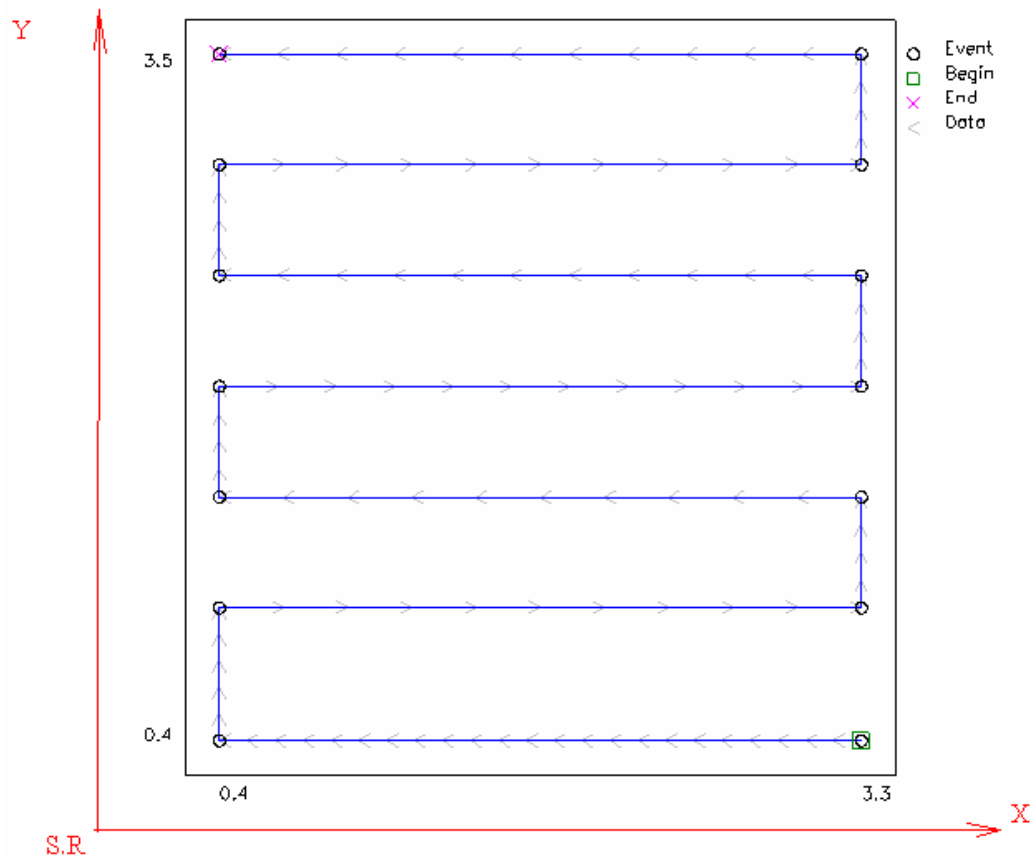


Figura E.2.2: Estrategia de medida del campo inducido en las vecindades del conductor.

De esta forma, se obtuvieron mediciones del campo magnético inducido en las vecindades del conductor para corrientes circulantes de: 5A, 13A y 20A. Ver figuras E.2.8, E.2.9 y E.2.10, letras “a)” respectivamente. Luego se dispuso al conductor al interior de la cañería de acero galvanizado, y se procedió a aterrizar uno de sus extremos, tal cual lo indica la Figura E.2.3.

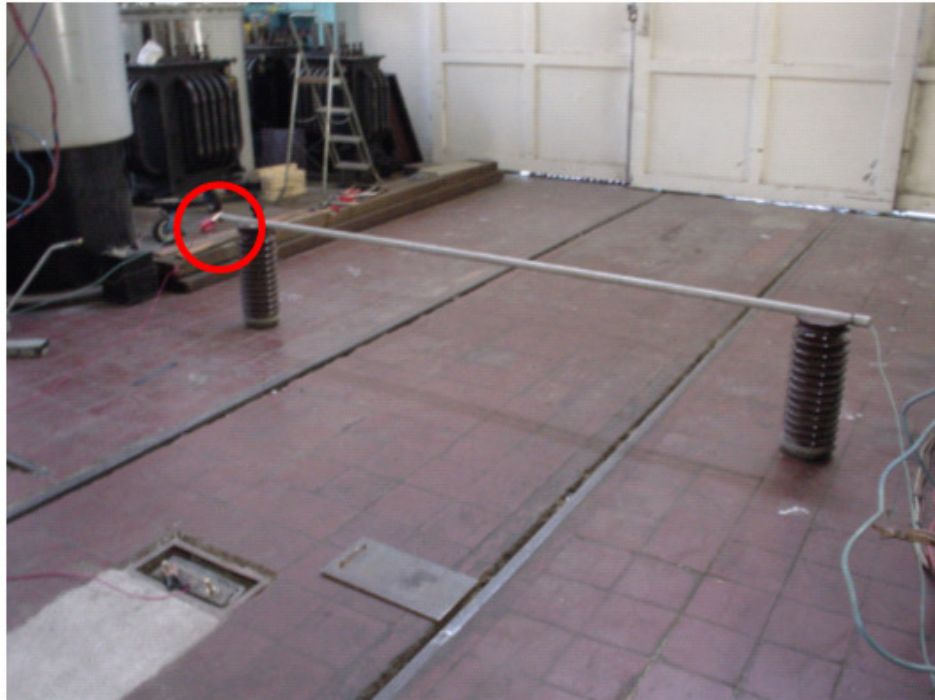


Figura E.2.3: Blindaje con CAG⁵⁴ 3/4" aterrizada en uno de sus extremos.

Y con tal disposición se efectuaron 3 mediciones usando la misma estrategia de medida, para 5A, 13A y 20A. Resultados que se observan en las figuras E.2.8, E.2.9 y E.2.10, letras "b)" Respectivamente.

De modo análogo, luego se efectuaron las mediciones "c)" presentes en las figuras E.2.8, E.2.9 y E.2.10. Dichas mediciones corresponden al caso en que se midió, aterrizando la CAG en sus 2 extremos (Figura E.2.4), y haciendo uso de 5A, 13A y 20A respectivamente.

Del mismo modo, más tarde se repitieron las mediciones pero esta vez solo aterrizando el punto central de la CAG (Figura E.2.5). De tal experiencia surgen los gráficos denotados con la letra "d)" presentes en cada una de las figuras E.2.8, E.2.9 y E.2.10.

Y finalmente, aterrizando la CAG en sus dos extremos más el punto central de esta (Figura E.2.6), se efectúa el proceso análogo de medidas para 5A, 13A y 20A. Del cual se desprenden los resultados denotados con la letra "e)" de cada uno de las figuras E.2.8, E.2.9 y E.2.10.

⁵⁴ Cañería de acero galvanizada.

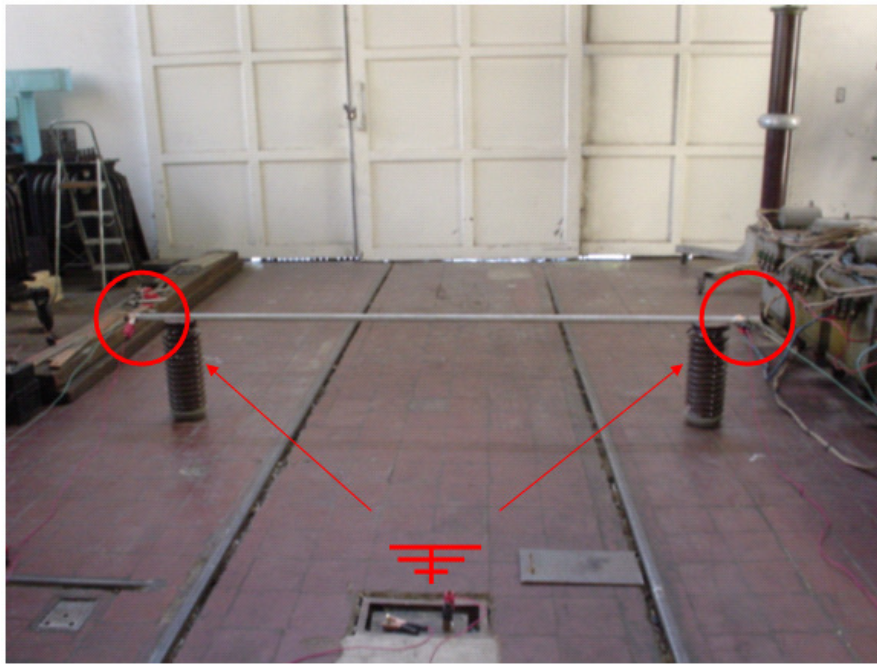


Figura E.2.4: CAG aterrizada en sus 2 extremos.

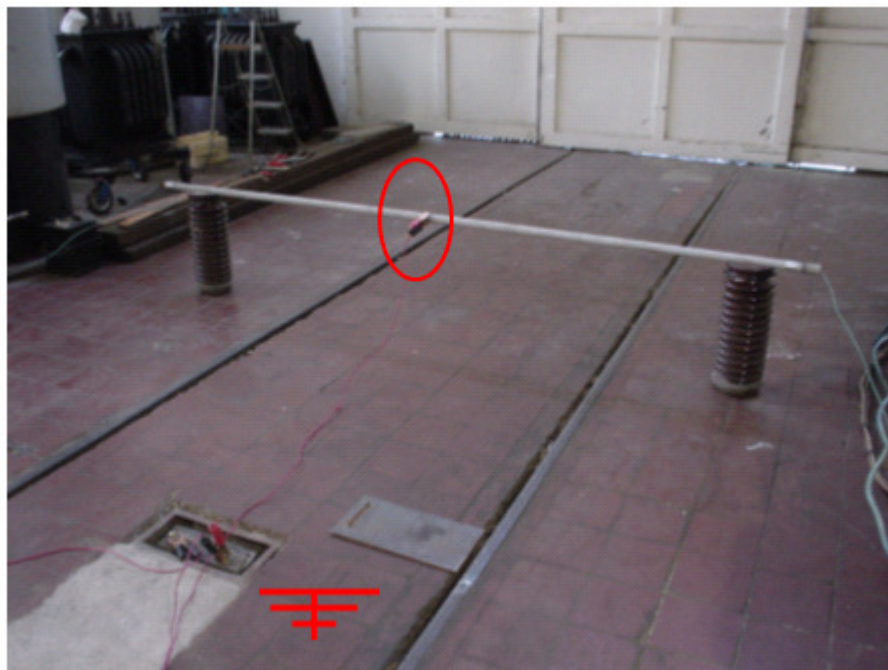


Figura E.2.5: CAG aterrizada en su punto medio.

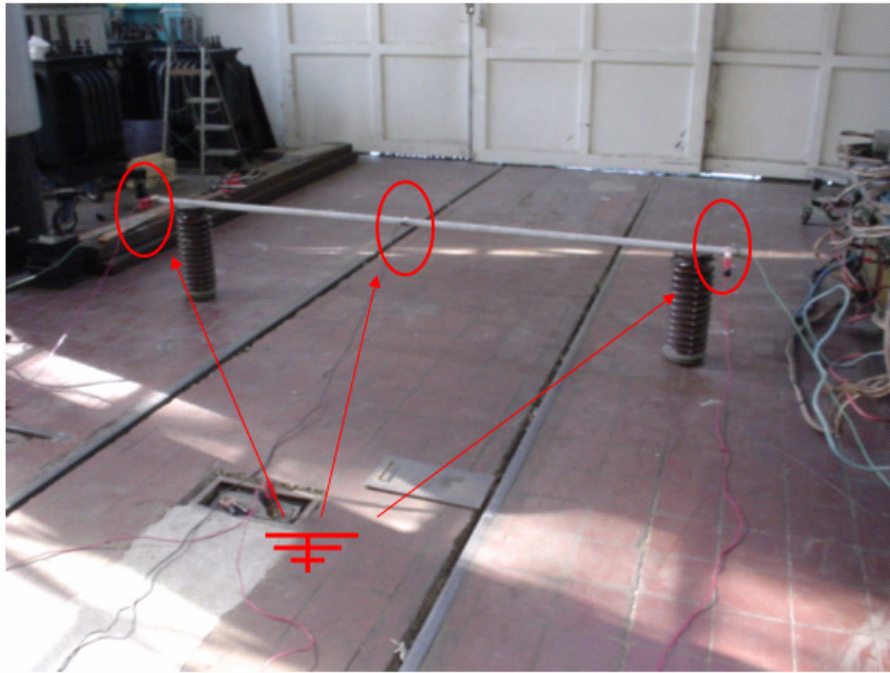


Figura E.2.6: CAG aterrizada en su punto medio y extremos.

Comentario de los Resultados Obtenidos.

De acuerdo a lo que se observa en los resúmenes de resultados descritos en las figuras E.2.8, E.2.9 y E.2.10, se puede decir que es notable el efecto del Blindaje que brinda la CAG, frente a la Inducción de campo magnético provocada por la circulación de corriente a través del conductor. Puesto que por ejemplo, si observamos el “Resumen 1” (figura E.2.8) al avanzar con la mirada por los resultados desde el “a” hasta el “e”, claramente se nota que: “cualquiera sea la configuración de la puesta a tierra de la cañería, a una misma distancia desde nuestro sistema de referencia (físicamente la CAG propiamente tal) atenúa el campo magnético en un rango que puede variar entre 5 y 10mG a una distancia de 0.5m (Figura E.2.7), o entre 2 y 5mG a una distancia superior a 1.5m desde la cañería.

Por otra parte, es también de importancia notar que para corrientes de menor orden (como la de 5A), la configuración que brinda mayor conveniencia es la de conectar a tierra los dos extremos de la CAG. Pero que para corrientes mayores (en nuestro caso la de 13A y 20A) la configuración óptima es conectar no solo sus extremos sino también su centro.

Por otro lado, es muy grato que los resultados encontrados muestren con tanta claridad el efecto de la S.E. de dicha cañería, puesto que por ejemplo para el caso en que se aterrizan los extremos de la CAG (en comparación con el caso del conductor al aire libre), es notable la presencia marcada de campos de menor magnitud (Zonas Azul, Celeste y Verde mucho más “ANCHAS”) a una misma distancia con respecto a la fuente de la EMI.

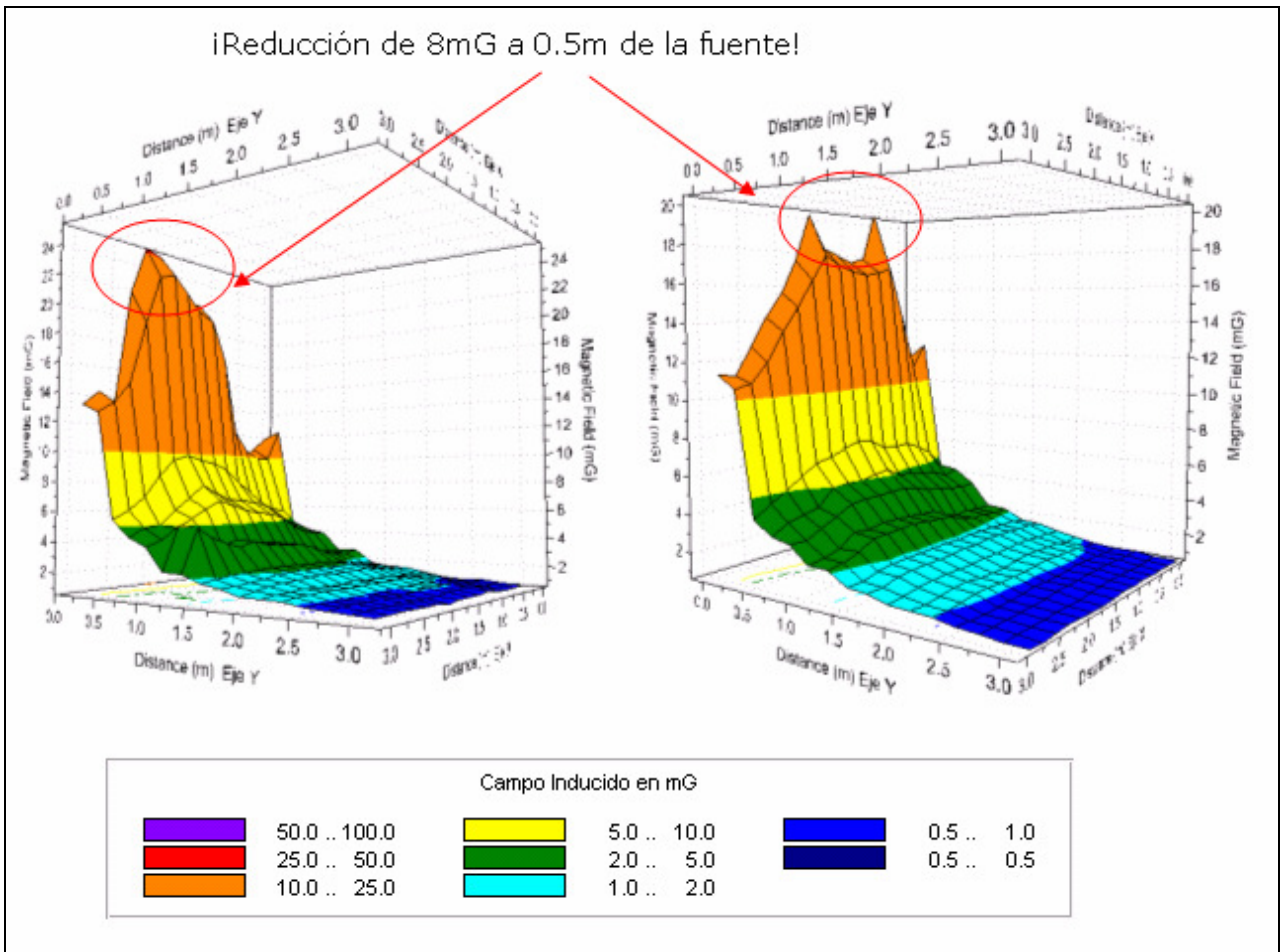
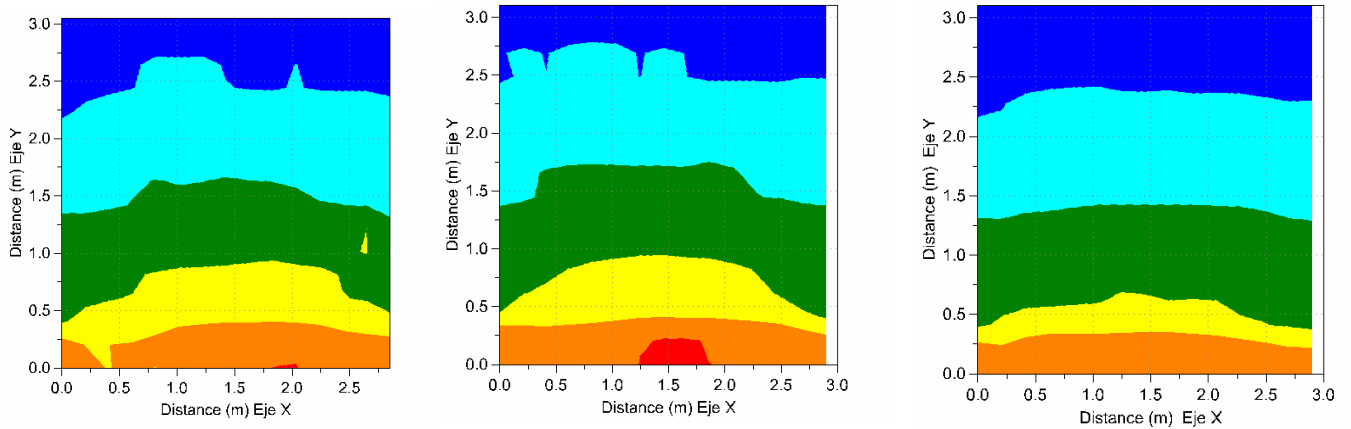


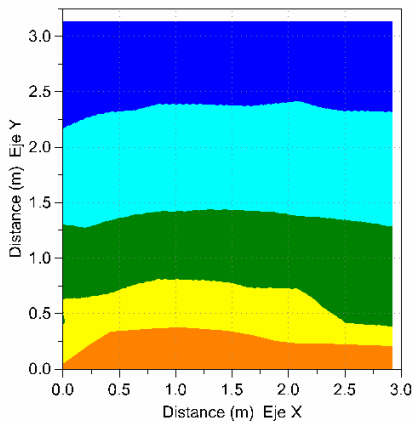
Figura E.2.7: Comparación entre medida del campo inducido por conductor al aire libre y al interior de la CAG con sus 2 extremos a tierra.



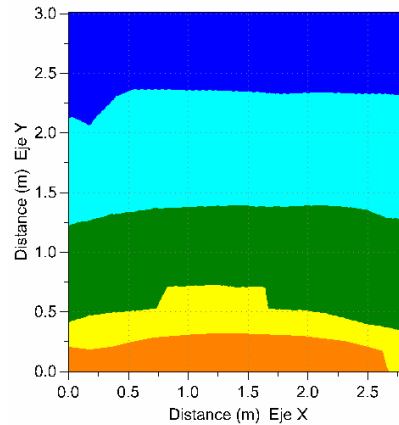
a) Conductor al aire libre

b) CAG Con extremo aterrizado

c) CAG con 2 Extremos aterrizados



d) CAG con su centro a tierra



e) CAG con sus extremos y centro a tierra.

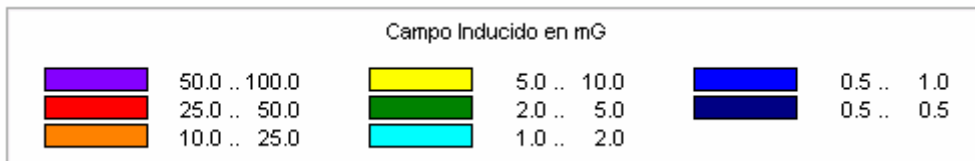
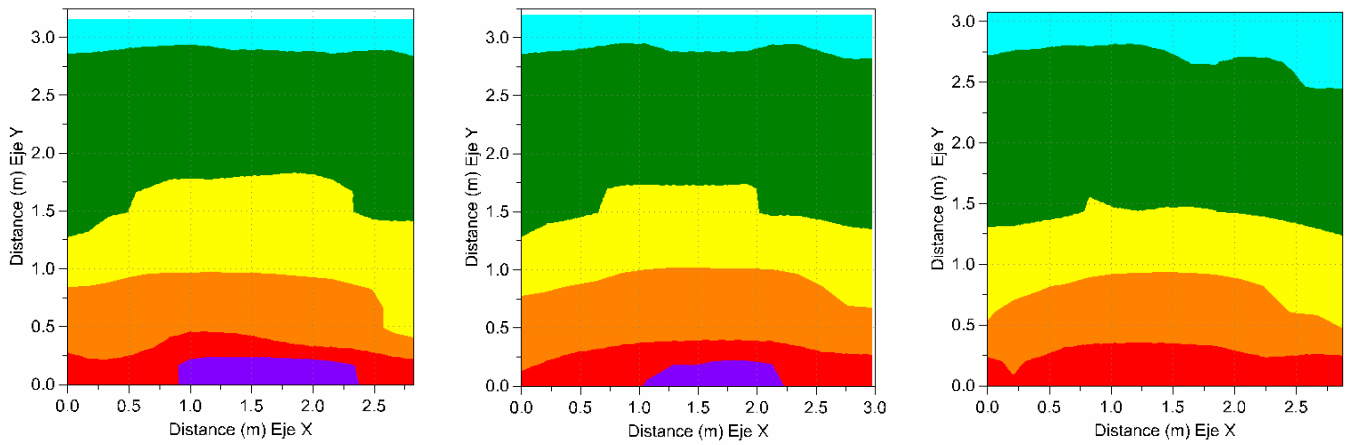
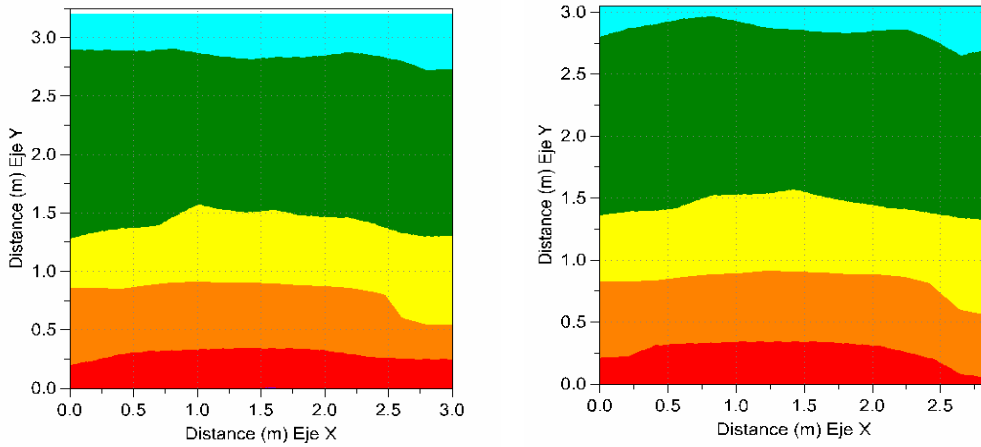


Figura E.2.8: Resultados del blindaje obtenido con una CAG aplicando 5A al conductor.



a) Conductor al aire libre b) CAG Con extremo aterrizado c) CAG con 2 Extremos aterrizados



d) CAG con su centro a tierra e) CAG con sus extremos y centro a tierra.

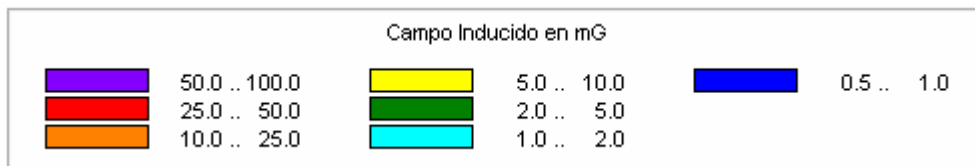
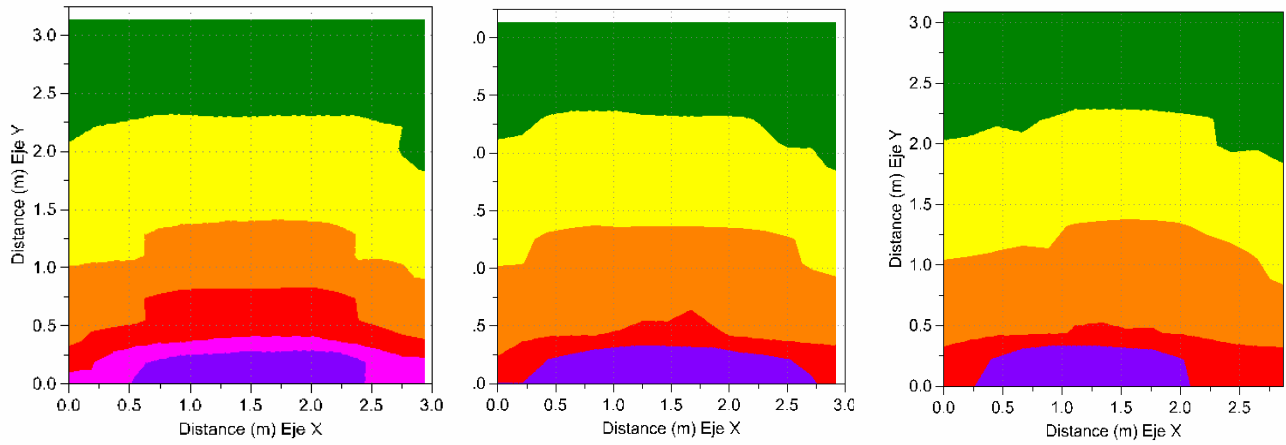
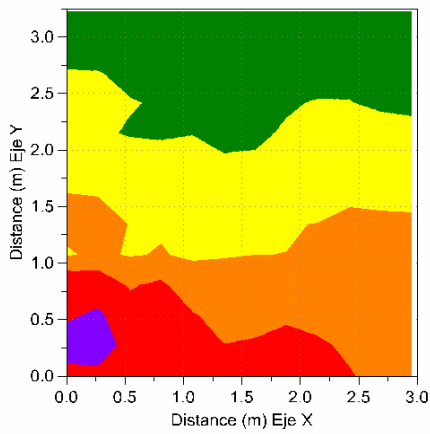


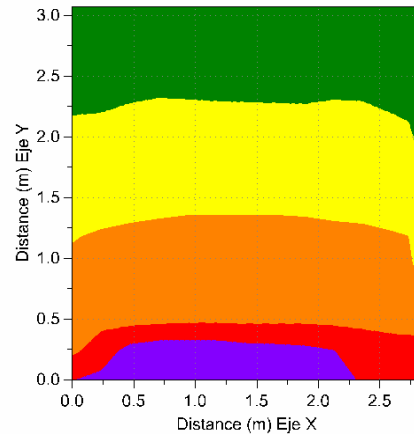
Figura E.2.9: Resultados del blindaje obtenido con una CAG aplicando 13A al conductor.



a) Conductor al aire libre b) CAG Con extremo aterrizado c) CAG con 2 Extremos aterrizados



d) CAG con su centro a tierra.



e) CAG con sus extremos y centro a tierra.

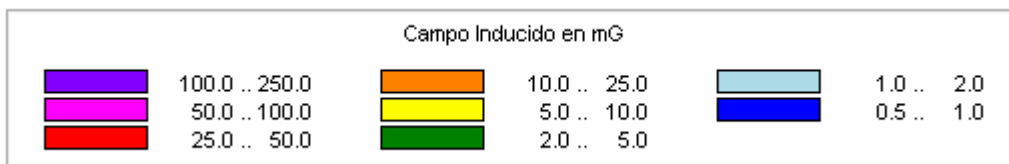


Figura E.2.10: Resultados del blindaje obtenido con una CAG aplicando 20A al conductor.