

**ESTUDIO DE LOS CAMPOS MAGNETICOS PRODUCIDOS POR
SUBESTACIONES DE DISTRIBUCION A 13.2 KV Y LOS
PROBLEMAS QUE OCASIONAN EN EQUIPOS ELECTRONICOS
Y PERSONAS**

Autores

**OMAR ANDRÉS BURGOS SEQUEDA
ALVARO LOBELO DIAZ**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLIVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
MECATRÓNICA
CARTAGENA DE INDIAS
2004**

**ESTUDIO DE LOS CAMPOS MAGNETICOS PRODUCIDOS POR
SUBESTACIONES DE DISTRIBUCION A 13.2 KV Y LOS
PROBLEMAS QUE OCASIONAN EN EQUIPOS ELECTRONICOS
Y PERSONAS**

**OMAR ANDRÉS BURGOS SEQUEDA
ALVARO LOBELO DIAZ**

**Monografía, presentado para optar al titulo de Ingeniero
Electricista**

Director

ENRIQUE VANEGAS

Especialista en Automatización Industrial

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLIVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
MECATRÓNICA
CARTAGENA DE INDIAS
2004**

Nota de aceptación

Firma de presidente de jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Cartagena de Indias 28 de Mayo de 2004

INDICE DE CONTENIDO

	Pag.
INTRODUCCION	
1. TEORIA DE CAMPOS MAGNÉTICOS	10
1.1. CAMPOS MAGNÉTICOS	10
1.2. FUENTES DE INTERFERENCIA MAGNÉTICA	11
1.2.1. Transformadores	12
1.2.2. Cables	13
1.3. ACOPLAMIENTO INDUCTIVO O MAGNÉTICO	13
2. SUSCEPTIBILIDAD DE COMPONENTES Y CIRCUITOS ELECTRÓNICOS	17
2.1. EFECTOS DE LA INTERFERENCIA MAGNÉTICA EN LOS CIRCUITOS INTEGRADOS	17
2.2. ÍNDICE DE SUSCEPTIBILIDAD	18
3. TEORIA DE BLINDAJES	19
3.1. EFECTIVIDAD DE BLINDAJES	19
3.1.1. Perdidas por Absorción	21
3.1.2. Perdidas por Reflexión	23
3.2. BLINDAJES CONTRA CAMPOS MAGNÉTICOS	25
3.3. EFECTOS DE LAS APERTURAS EN LOS BLINDAJES	26
3.4. COMPARACIÓN DE MATERIALES PARA BLINDAJES	31
3.4.1. Materiales Ferromagnéticos	32
3.5. OTRAS TÉCNICAS DE APANTALLADO	34
3.5.1. Juntas Elásticas Conductoras	35
3.5.2. Blindaje de Cajas de Plástico	36
3.5.3. Galvanizado Selectivo	37
3.5.4. Pinturas Conductoras	37
3.5.5. Láminas Conductoras	38

4. LOS CAMPOS MAGNÉTICOS Y LA SALUD PÚBLICA	39
4.1. FUENTES DE EXPOSICIÓN	39
4.2. ESTRUCTURA BIOLÓGICA Y SU ENTORNO ELECTROMAGNÉTICO NATURAL Y ARTIFICIAL	41
4.3. EFECTOS ATRIBUIDOS A LOS CAMPOS MAGNÉTICOS	42
4.3.1. Investigación Epidemiológica	44
4.3.1.1. Estudios Epidemiológicos en Empleados de Compañías Eléctricas	45
4.3.2. Informe Karolinska	48
4.4. OTROS EFECTOS ATRIBUIDOS A LOS CAMPOS MAGNÉTICOS	50
4.5. INVESTIGACIONES DE LABORATORIO	51
4.5.1. Mecanismos de Acción Propuestos	51
4.5.2. Biología Celular y Molecular	53
4.5.3. Efectos Benéficos Encontrados	54
4.6. LEGISLACIONES EMPLEADAS EN ALGUNOS PAISES SOBRE LA EXPOSICIÓN DE LOS CAMPOS MAGNÉTICOS	55
4.7. CONCLUSIONES CON RESPECTO A LA SALUD	57
5. INSTRUCCIONES PARA LA MEDICIÓN DE CAMPOS MAGNÉTICO	60
5.1. ELECCIÓN DEL DISPOSITIVO DE MEDICIÓN	60
5.1.1. Calibración	61
5.2. MEDICIONES DE CAMPO	61
5.2.1. Análisis de Resultados	64
5.3. CÁLCULO DE LA EFECTIVIDAD DEL BLINDAJE	67
CONCLUSIONES	69
BIBLIOGRAFÍA	72
ANEXOS	74

LISTA DE FIGURAS

	Pag,
FIGURA 1.1. Principio de acoplamiento inductivo.	14
FIGURA 1.2. Respuesta en la salida del circuito.	15
FIGURA 3.1. Perdidas por absorción en función de la frecuencia.	23
FIGURA 3.2. Perdidas por reflexión en función de la frecuencia.	24
FIGURA 3.3. Diagrama del calculo de la efectividad de los blindajes.	25
FIGURA 3.4. a) Efecto de las discontinuidades en un blindaje. b) Efecto de una apertura angular. c) Sección de un agujero en forma de guía de ondas con diámetro D y longitud t.	27
FIGURA 3.5. Orientación aleatoria de los dipolos magnéticos atómicos.	32
FIGURA 3.6. Alineación de los dipolos magnéticos.	33
FIGURA 3.7. Curva de histéresis para un material ferromagnético.	33
FIGURA 3.8. Efecto de las juntas elásticas conductoras.	36
FIGURA 5.1. Circuito de prueba.	62
FIGURA 5.2. Grafica de la simulación.	63
FIGURA 5.3. Esquema de la subestación.	65
FIGURA 5.4. Esquema de la oficina.	65

LISTA DE TABLAS

	Pag.
TABLA 3.1. Efectividad de blindajes sólidos.	20
TABLA 3.2. Profundidad de penetración δ de varios materiales.	21
TABLA 3.3. Conductividad y permeabilidad relativa.	22
TABLA 3.4. Serie galvánica para unión de distintos metales.	30
TABLA 4.1. Recomendaciones de exposición a campos magnéticos.	40
TABLA 5.1. Mediciones de campo magnético en subestación.	63
TABLA 5.2. Mediciones de campo magnético en oficina.	64
TABLA 5.3. Niveles de campo magnético en Europa.	66

LISTA DE ANEXOS

	Pag.
ANEXO A. Resumen de ANSI-IEEE Standard 644-1994 "IEEE Standard Procedure for Measurements of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines".	75
ANEXO B. Especificaciones técnicas de equipos de medida	80

INTRODUCCIÓN

En recientes años, ha habido un incremento en el estudio de los problemas que originan los campos magnéticos en los equipos electrónicos y la salud, esta última de gran importancia debido a la preocupación mundial por las posibles enfermedades que pueden adquirirse al exponerse a estos campos. Por tal motivo se considera necesario realizar una investigación bibliográfica a nivel de monografía, con el objetivo de buscar soluciones e información pertinente sobre las consecuencias que generan los campos magnéticos.

Para el desarrollo de este estudio, primero se hizo una clasificación de las distintas técnicas para proteger los equipos electrónicos de los campos magnéticos, con el fin de elegir la mejor opción de protección contra campos producidos por subestaciones de 13.2 kV. Luego se buscó información de estudios realizados en otros países sobre los efectos que pueden causar estos campos en la salud humana, para sacar las respectivas conclusiones y recomendaciones. Y por último, se hicieron mediciones de campos magnéticos en la clínica Madre Bernarda para observar como afectan los equipos electrónicos ubicados cerca de la subestación, para realizar los cálculos de blindaje de protección de dichos equipos.

ESTUDIO DE LOS CAMPOS MAGNETICOS PRODUCIDOS POR SUBESTACIONES DE DISTRIBUCION A 13.2 KV Y LOS PROBLEMAS QUE OCASIONAN EN EQUIPOS ELECTRÓNICOS Y PERSONAS

1. TEORIA DE CAMPOS MAGNÉTICOS

1.1. CAMPOS MAGNETICOS

Los campos magnéticos se producen, en particular, cuando hay cargas eléctricas en movimiento, es decir, corrientes eléctricas que determinan el movimiento de las cargas, por lo cual se considera como un fenómeno electrodinámico. Estos campos son capaces de perturbar seriamente el funcionamiento de un circuito electrónico.

Su intensidad se mide en amperios por metro (A/m), aunque suele expresarse en función de la inducción magnética que produce, medida en teslas (T), militeslas (mT) o microteslas (μ T).

La región del espacio situada en las proximidades de un imán o de una carga eléctrica en movimiento posee unas propiedades especiales. Se observa experimentalmente que cuando una carga tiene una velocidad v en las proximidades de un imán o de otra carga eléctrica en movimiento, existe una fuerza adicional sobre ella que es proporcional al valor de la carga, Q , al módulo de la velocidad, v , y al módulo de la inducción magnética, B^1 . La dirección y sentido de la fuerza dependen de la dirección y sentido relativos de los vectores velocidad e inducción magnética. Así, se dice que en un punto de una región del

¹ RAYMOND A. SERWAY. Física Tomo II, Cuarta edición. Mexico. McGraw HILL. 1997, pag. 834.

espacio existe un campo magnético B, si al situar en dicho punto una carga que se mueve con velocidad v, aparece sobre ella una fuerza que viene dada por la expresión:

$$F = Q (v \times B) \quad 1.1$$

donde F es la fuerza que actúa sobre una carga móvil, Q es la carga, v la velocidad y B el campo magnético.

En algunos países, se utiliza normalmente otra unidad denominada gauss (G) (10.000 G = 1 T, 1 G = 100 mT, 1 mT = 10 G, 1 mT = 10 mG).

Todo aparato conectado a una red eléctrica generará a su alrededor, si está encendido y circula la corriente, un campo magnético proporcional a la cantidad de corriente que obtiene de la fuente que lo alimenta. La intensidad de estos campos es tanto mayor cuanto más cerca del aparato, y disminuye con la distancia.

1.2. FUENTES DE INTERFERENCIA MAGNÉTICA

En las oficinas que se encuentran cerca de fuentes de campos magnéticos, los trabajadores podrían percibir desplazamientos de la imagen en la pantalla conectada a su computadora. Si los campos magnéticos son en esos lugares superiores a aproximadamente 1 mT (10 mG), pueden llegar a interferir en los electrones que producen la imagen en el monitor. Una solución simple a este problema consiste en trasladar la computadora a otro lugar de la habitación en que los campos magnéticos sean inferiores a ese valor, sin embargo no es la mejor forma de evitar estos problemas, ya que muchas veces no se tiene la ventaja de acomodar los equipos a nuestro gusto y no se cuenta con el espacio suficiente para hacerlo; además no se sabe en que proporción estos campos pueden afectar

la salud de los usuarios en dicho lugar. Por lo tanto, es necesario buscar soluciones adecuadas que permitan acabar con el problema de raíz.

Los campos magnéticos suelen existir junto a los cables que suministran energía eléctrica a los edificios de oficinas o de apartamentos, o cerca de los transformadores utilizados para el suministro eléctrico de los edificios, ambos son elementos que se encuentran en una subestación de 13.2 kV.

En el caso planteado de la subestación de 13.2 kV de la clínica Madre Bernarda, se presentan los elementos mencionados anteriormente, que son fuente de interferencia para dispositivos susceptibles como circuitos electrónicos.

1.2.1. Transformadores

Los transformadores son los componentes pasivos más problemáticos desde el punto de vista de las interferencias, debido a que son el origen de gradientes de temperatura producidos por el calentamiento de su parte resistiva, flujo magnético de dispersión producido por las inductancias de dispersión, y el acoplamiento capacitivo parásito entre primario y secundario que acopla al secundario las tensiones de modo común existentes en el primario y viceversa. Este último se reduce a partir de apantallamientos conductores entre devanados con una lámina fina de cobre o aluminio, lográndose valores inferiores a 5 pF frente a las capacidades de 10 a 50 pF en transformadores normales.

Para el estudio se debe tener en cuenta que los transformadores son máquinas que trabajan según el principio de inducción magnética, que parte del hecho que un conductor por el cual circula una corriente eléctrica variable en el tiempo, crea a su alrededor un campo magnético igualmente variable que al estar cerca de otro conductor, puede inducir corriente en él. Por lo anterior, el transformador consta normalmente de dos bobinas de hilo conductor adyacentes, enrolladas alrededor de un solo núcleo de material magnético.

Como se puede observar su funcionamiento es a partir de campos magnéticos y por ende es una fuente de interferencia magnética en otros equipos.

1.2.2. Cables

Las propiedades eléctricas consideradas en un cable son la resistencia, la inductancia, la capacidad y el aislamiento entre conductores, que en conjunto determinan la respuesta en frecuencia del cable.

Los cables son elementos que contienen intrínsecamente propiedades inductivas, por lo que al igual que las bobinas de un transformador, producen campos magnéticos en su entorno que pueden llegar a causar interferencias en otros dispositivos susceptibles; además hay que tener presente que son básicos para interconectar equipos en una subestación.

1.3. ACOPLAMIENTO INDUCTIVO O MAGNÉTICO

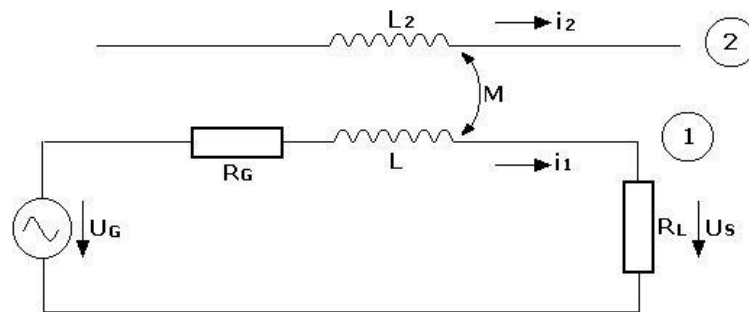
El acoplamiento inductivo se produce debido a las inductancias mutuas que existen entre un circuito y la fuente de interferencia. Siempre que se tenga un conjunto de conductores recorridos por corrientes eléctricas se presenta un fenómeno de inducción magnética entre todos ellos.

Esta inducción tiene su origen en el hecho de que las variaciones de corriente de un conductor cualquiera modifica las distribuciones de campo magnético, y, a su vez, estas variaciones de campo originan fuerzas electromotrices inducidas en todos los demás circuitos.

El acoplamiento magnético es la manifestación de la existencia de los campos magnéticos, y estos existen siempre que haya corrientes eléctricas. Por lo tanto cualquier conductor de un equipo genera un campo magnético, y sus variaciones

pueden incidir sobre cualquier circuito cercano que presente un área en la que se induce una fuerza electromotriz².

Figura 1.1. Principio de acoplamiento inductivo.



Supóngase que en la figura 1.1., en el circuito L_2 se produce un escalón de corriente de valor I_2 , que la inductancia mutua entre ambos circuitos es M , y que la autoinductancia del circuito 1 es L . Sean R_G y R_L las resistencias del generador U_G y de la carga, respectivamente³. Las ecuaciones del circuito son:

$$U_G = (R_G + R_L)i_1 + L \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} \quad 1.2$$

$$U_S = R_L i_1 \quad 1.3$$

Operando, se obtiene la siguiente expresión de la tensión de salida:

$$u_S(t) = U_G \frac{R_L}{R_G + R_L} - \frac{M}{L} R_L I_2 e^{-\{(R_G + R_L)/L\}t} \quad 1.4$$

En el circuito 1 aparece superpuesto un impulso de corriente según la figura 1.2. de altura:

$$\frac{M}{L} I_2 = I_1$$

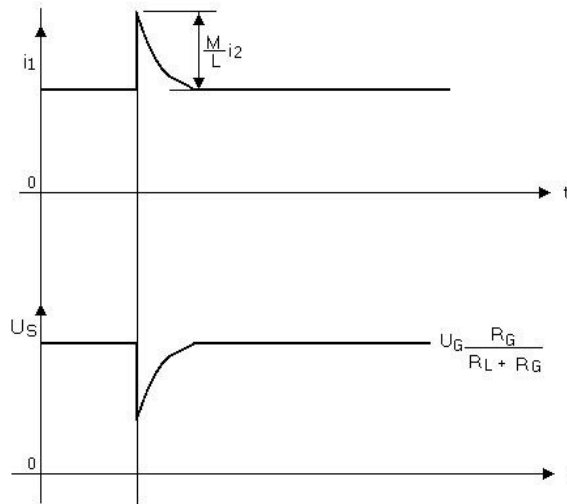
² www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/EMC/trabajos_01_02/blindajes_apantallamientos/Principal.htm.

³ WILLIAM H. HAYT Y JACK E. KENMERLY. Análisis de Circuito en Ingeniería. Quinta Edición. McGraw HILL. 1997, pag. 428.

Con polaridad positiva o negativa dependiendo del sentido de acoplamiento del campo magnético, y con caída exponencial con constante de tiempo:

$$\tau = \frac{L}{R_G + R_L} \quad 1.5$$

Figura 1.2. Respuesta en la salida del circuito.



La figura 1.2. muestra la corriente que circula en el circuito, la cual se ve afectada por la superposición de una señal de respuesta natural en un tiempo mayor que cero que se da en L_2 , de esta forma se observa un cambio brusco de corriente en el L_1 debido al acoplamiento magnético. Las variaciones de campo magnético en un circuito son debidas, por una parte, a las variaciones en la corriente que circula por el propio circuito, y, por otro parte, a las variaciones producidas exteriormente por cualquier otra causa. Sin importar la causa de variaciones de flujo, la cantidad de éste que atraviesa un circuito y que, por lo tanto, es capaz de producir inducciones, depende del área S del circuito según la relación:

$$\phi = BS \quad 1.6$$

siendo B la inducción magnética; de aquí se desprende que si se pretende minimizar la inducción magnética debe reducirse o el flujo magnético que alcanza al circuito o el área del mismo⁴.

Puede afirmarse que para reducir las interferencias magnéticas ocasionadas por el acoplamiento inductivo, puede actuarse, como siempre, sobre el origen de la perturbación, sobre el camino de acoplamiento o sobre el circuito afectado por la perturbación.

Puede protegerse a un circuito encerrándolo dentro de un recinto de material ferromagnético que canaliza el flujo magnético evitando así que alcance a producir interferencias en el circuito, en cuyo caso se habla de apantallamiento magnético.

Los caminos de acoplamiento pueden reducirse, disponiendo los cableados adecuadamente, separando los conductores de distintos circuitos, disponiendo los cruces a 90° y evitando las largas canalizaciones paralelas.

Por último, es fundamental que los circuitos presenten la menor área posible a los campos magnéticos. Para ello, el conductor que transporta una señal y el retorno deben estar muy próximos entre sí.

⁴ JOSEPH BALCELLS Y FRANCESC DAURA. Interferencias Electromagnéticas en Sistemas Eléctricos. Alfaomega Marcombo. 1992. pags. 56 – 57.

2. SUSCEPTIBILIDAD DE COMPONENTES Y CIRCUITOS ELECTRÓNICOS

El problema de las interferencias magnéticas no sería tal, si no existieran elementos susceptibles que actúan como receptores a los que se acoplan las perturbaciones procedentes de otros elementos. Los campos magnéticos no solo pueden causar daños físicos al equipo sino que también para niveles de potencia muy pequeños hacen que estos equipos tengan un mal funcionamiento.

La susceptibilidad de los sistemas electrónicos a interferencias producidas por campos magnéticos es debida no solo a componentes pasivos, incluyendo cables, sino también a los circuitos activos. El objetivo de este estudio es analizar las interferencias magnéticas separando los circuitos integrados en analógicos y en digitales⁵ debido a la diferencia que presentan en el umbral de ruido.

2.1. Efectos de la interferencia magnética en los circuitos integrados

En los circuitos análogos cuyo elemento no lineal más simple es una unión PN, si se aplica una tensión senoidal con un nivel de tensión continua de polarización, la forma de onda de la corriente que circula es asimétrica y tiene un nivel medio mayor que el que tendría si se aplicara solo la tensión continua de polarización. Es decir, sucede como si la señal alterna hubiera producido un desplazamiento del nivel de continua, de magnitud dependiente del nivel de polarización. Luego se puede hablar de unas características corriente voltaje inducidas por campos magnéticos.

⁵ JOSEPH BALCELLS Y FRANCESC DAURA. Interferencias Electromagnéticas en Sistemas Eléctricos. Alfaomega Marcombo. 1992. pag. 38.

En los circuitos digitales la información viene codificada en dos niveles de tensión distintos. Por ello su susceptibilidad se juzga ante todo por el cambio de un uno por un cero o viceversa. La presencia de interferencia en las líneas de alimentación de los circuitos digitales puede tener repercusiones graves tanto del punto de vista de pérdida de información como por razones de seguridad del dispositivo. Las tensiones de alimentación no deben rebasar los márgenes especificados, dentro de los cuales el fabricante garantiza la interpretación correcta de las tensiones de entrada y que las salidas alcancen los niveles propios. Cuando los cables de alimentación se encuentran rodeados por un campo magnético se producirá un acoplamiento magnético el cual generara una variación en la tensión de alimentación del circuito digital, trayendo como consecuencia deterioro e incluso daño del equipo, además se pueden presentar respuestas erróneas en la señal de salida.

2.2. Índice de Susceptibilidad

Una forma de comparar la susceptibilidad a las interferencias externas de diversos sistemas, analógicos o digitales es mediante el denominado índice de susceptibilidad del receptor (IS), que se define como el cociente entre el ancho de banda B y el nivel de ruido o sensibilidad, N, del circuito receptor. Cuanto mayor sea IS, más susceptible será el circuito, por cuanto la susceptibilidad aumenta al hacerlo el ancho de banda y al reducirse el umbral o nivel de ruido.

$$IS = \frac{B}{N} \quad 2.1$$

3. TEORIA DE BLINDAJES

Se ha visto que las interferencias magnéticas en equipos electrónicos susceptibles, se deben al acoplamiento de campos magnéticos producidos por elementos como transformadores y cables. Un método de protección frente a estos acoplamientos consiste en evitarlos utilizando blindajes o pantallas metálicas.

Un blindaje es una superficie metálica dispuesta entre dos regiones del espacio que se utiliza para atenuar la propagación de los campos no solo magnéticos sino eléctricos y electromagnéticos.

El ámbito de atenuación de los blindajes depende del material que se utiliza y del espectro de frecuencias donde se va a emplear dicho material, por lo tanto se habla de una efectividad del blindaje⁶.

3.1. EFECTIVIDAD DE BLINDAJES

La efectividad S de un blindaje puede especificarse en términos de atenuación en dB de la intensidad de campo. Entonces para campos magnéticos se tiene que:

$$S = 20 \log (H_0/H_1) \quad (\text{dB}) \quad 3.1$$

Donde H_0 es la intensidad de campo magnético sin blindaje y H_1 la intensidad cuando el equipo esta blindado.

La efectividad también varia con la frecuencia, la geometría del campo, la posición desde donde el campo es medido, con el tipo de campo que esta siendo atenuado, la polarización y con la dirección de la incidencia. Los resultados del cálculo de la efectividad sirven para comparar varios materiales en función de su atenuación.

⁶ www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/EMC/trabajos_01_02/blindajes_apantallamientos/Principal.htm.

Al incidir una onda magnética en una superficie metálica existen dos efectos. La onda es parcialmente reflejada por la superficie, y la parte transmitida (no reflejada) es atenuada al pasar a través del blindaje. Este último provoca las pérdidas por absorción. Las pérdidas por reflexión dependen del tipo de campo y de la impedancia de onda. La efectividad total de un blindaje es igual a la suma de las pérdidas por absorción (A), las pérdidas por reflexión (R) más un factor (B) que contabiliza las múltiples reflexiones en los blindajes.

$$S = A + R + B \text{ (dB)} \quad 3.2$$

Tabla 3.1. Efectividad de blindajes sólidos.

MATERIAL	FRECUENCIA (kHz)	PERDIDAS DE ABSORCION (TODOS LOS CAMPOS)	PERDIDAS DE REFLEXION		
			Campos Magnéticos	Campos Eléctricos	Ondas Planas
Magnético $\mu_r = 1000$ $\sigma_r = 0.1$	<1	A - B	A	E	E
	1 - 10	C - D	A - B	E	E
	10 - 100	E	B	E	D
	>100	E	B - C	D	C - D
No Magnético $\mu_r = 1$ $\sigma_r = 1$	<1	A	B	E	E
	1 - 10	A	C	E	E
	10 - 100	B	C	E	E
	>100	C - D	D	E	E
EFFECTIVIDAD DE LOS BLINDAJES					
	Atenuación (dB)		Característica		
A	0 - 10 dB		muy inefectivo (muy malo)		
B	10 - 30 dB		inefectivo (malo)		
C	30 - 60 dB		medio (normal)		
D	60 - 90 dB		efectivo (bueno)		
E	>90 dB		muy efectivo (excelente)		

La tabla 3.1. muestra una clasificación cualitativa de la eficiencia de los blindajes con varios márgenes de frecuencia, desde blindajes considerados muy inefectivos o ineficientes (0 – 10 dB) a los considerados muy efectivos (>90 dB), cuyo objetivo es difícil de conseguir.

3.1.1. Pérdidas por Absorción

Cuando una onda magnética pasa a través de un blindaje, su amplitud decrece exponencialmente debido a las corrientes inducidas. Estas provocan pérdidas por efecto Joule y por ello disipan calor en el material⁷. La distancia requerida para que la onda sea atenuada 36.7% de su valor inicial, se denomina profundidad de penetración (ver tabla 3.2.).

$$\delta = \frac{0.0066}{\sqrt{\mu_r \sigma_r f}} \quad (\text{cm}) \quad 3.3$$

Tabla 3.2. Profundidad de penetración δ de varios materiales.

Frecuencia	δ para mumetal	δ para cobre	δ para aluminio	δ para hierro
100 Hz	0,028	6,6	8,46	0,66
1 kHz	0,008	2,08	2,67	0,2
10kHz	-	0,66	0,84	0,08
100 kHz	-	0,2	0,28	0,02
1 MHz	-	0,08	0,08	0,008
10 MHz	-	0,02	0,03	0,002
(δ en mm)				

Las pérdidas por absorción constituyen el principal mecanismo de apantallado en el caso de campos magnéticos de baja frecuencia. La ecuación de las pérdidas de absorción es la siguiente:

$$A = 1314.3 \ t \sqrt{\mu_r \sigma_r f} \quad (1) \quad 3.4$$

⁷ Blindaje y Apantallamiento.

http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/EMC/trabajos_01_02/blindajes_apantallamientos/Principal.htm.

donde la absorción A esta dada en dB, el espesor t en cm y la frecuencia f en MHz, μ_r es la permeabilidad del material y σ_r es la conductividad del material⁸. Los posibles valores de la conductividad y la permeabilidad relativa de los materiales se pueden observar en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Conductividad y permeabilidad relativa.

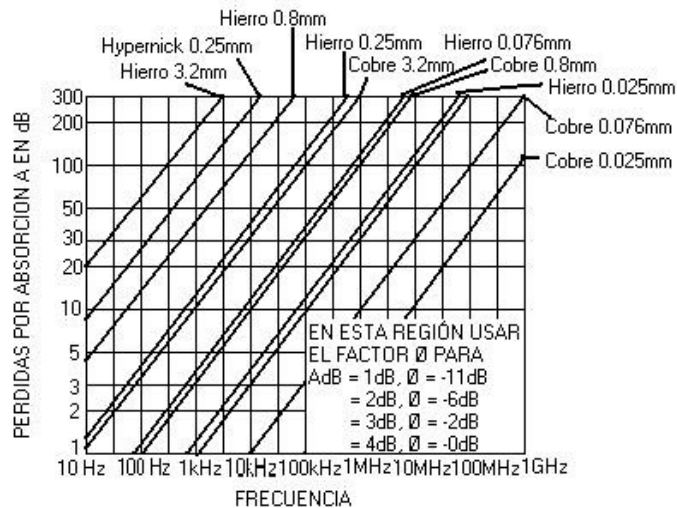
Metal	Conductividad Relativa σ_r	Permeabilidad Relativa $\mu_r \leq 10 \text{ kHz}$	Producto $\sqrt{\sigma_r \mu_r}$	Cociente $\sqrt{\sigma_r / \mu_r}$
1. Plata	1,064	1	1,032	1,032
2. Cobre (Sólido)	1,00	1	1	1
3. Cobre (*)	0,10	1	0,316	0,316
4. Oro	0,70	1	0,837	0,837
5. Cromo	0,664	1	0,815	0,815
6. Aluminio (Blando)	0,63	1	0,794	0,794
7. Aluminio (Revenido)	0,40	1	0,632	0,632
8. Aluminio (Papel Metalizado 15 μm)	0,53	1	0,728	0,728
9. Aluminio (Papel Metalizado 25 μm)	0,61	1	0,781	0,781
10. Aluminio (*)	0,036	1	0,190	0,190
11. Latón (91% Cu, 9% Zn)	0,47	1	0,686	0,686
12. Latón (66% Cu, 34% Zn)	0,35	1	0,592	0,592
13. Magnesio	0,38	1	0,616	0,616
14. Zinc	0,305	1	0,552	0,552
15. Tungsteno	0,314	1	0,560	0,560
16. Berilio	0,33	1	0,574	0,574
17. Cadmio	0,232	1	0,482	0,482
18. Platino	0,17	1	0,412	0,412
19. Estaño	0,151	1	0,389	0,389
20. Tantalio	0,12	1	0,346	0,346
21. Plomo	0,079	1	0,281	0,281
22. Manganeseo	0,039	1	0,197	0,197
23. Titanio	0,036	1	0,190	0,190
24. Mercurio (Líquido)	0,018	1	0,134	0,134
25. Bronce (Cu + Sn)	0,18	1	0,424	0,424
26. Acero (SAE 1045)	0,10	1000	10,00	0,0100
27. Acero Inoxidable (430)	0,02	500	3,162	0,0063
28. Supermalloy	0,023	100000	47,96	0,0005
29. 78 Permalloy	0,108	8000	29,39	0,0037
30. Hierro Puro (Hierro Dulce)	0,17	5000	29,15	0,0058
31. Hierro Comercial (0.2% Impuro)	0,17	200	5,83	0,0292
31. Mumetal	0,0289	20000	24,04	0,0012
32. Hypernick	0,0345	4500	12,46	0,0028
33. 45 Permalloy (Reconocido a 1200° C)	0,0384	4000	12,39	0,0031
34. 45 Permalloy (Reconocido a 1050° C)	0,0384	2500	9,80	0,0039
35. Acero Laminado en Caliente	0,0384	1500	7,59	0,0051
36. 4% Hierro al Silicio (Grano Orientado)	0,037	1500	7,45	0,0050
* Pulverizado con Soplete Oxiacetilénico				

⁸ JOSEPH BALCELLS Y FRANCESC DAURA. Interferencias Electromagnéticas en Sistemas Eléctricos. Alfaomega Marcombo. 1992. pags. 87 – 88.

La ecuación para el cálculo del factor de corrección B debido a las multirreflexiones es la siguiente:

$$B = 20\log(1 - e^{-2t/\delta}) \quad 3.5$$

Figura 3.1. Perdidas por absorción en función de la frecuencia.



La figura 3.1. muestra las pérdidas por absorción para varios materiales, teniendo en cuenta la frecuencia y el espesor en mm.

3.1.2. Perdidas por Reflexión

Estas pérdidas se presentan en la frontera entre dos medios (aire y blindaje o entre dos distintos metales) y están relacionadas con las impedancias características (Z_1 y Z_2) de cada uno de los dos medios.

Cuando una onda atraviesa un blindaje, encuentra dos cambios de medio, y si este es delgado en comparación con la profundidad de penetración δ , al tener pocas pérdidas por absorción, habrá múltiples reflexiones. Si el blindaje es metálico y el área que lo rodea es aire, entonces $Z_1 \gg Z_2$ y la mayor reflexión

ocurre cuando la onda deja la cara interna del blindaje en caso de campos magnéticos. La impedancia de cualquier material esta dada por:

$$|Z| = 3.68 \times 10^{-7} \sqrt{f} \sqrt{\frac{\mu_r}{\sigma_r}} \quad 3.6$$

Donde f esta dada en Hz.

En el caso de los campos magnéticos, al tener la reflexión principal en la segunda superficie, se tienen múltiples reflexiones y por ello la efectividad del blindaje queda reducida. Las pérdidas por reflexión aumentan al disminuir la frecuencia y aumentar la conductividad del material (ver figura 3.2.).

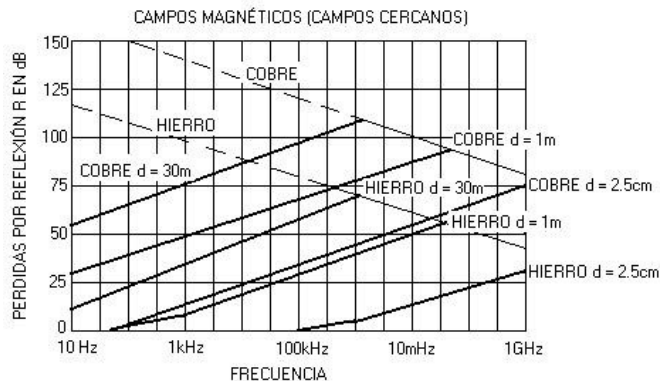
La ecuación para el cálculo de las pérdidas por reflexión R para campos magnéticos es:

$$R = 74.6 - 10 \log \left(\frac{\mu_r}{fd^2 \sigma_r} \right) \quad (\text{dB}) \quad 3.7$$

donde d es la distancia del emisor al blindaje en cm.

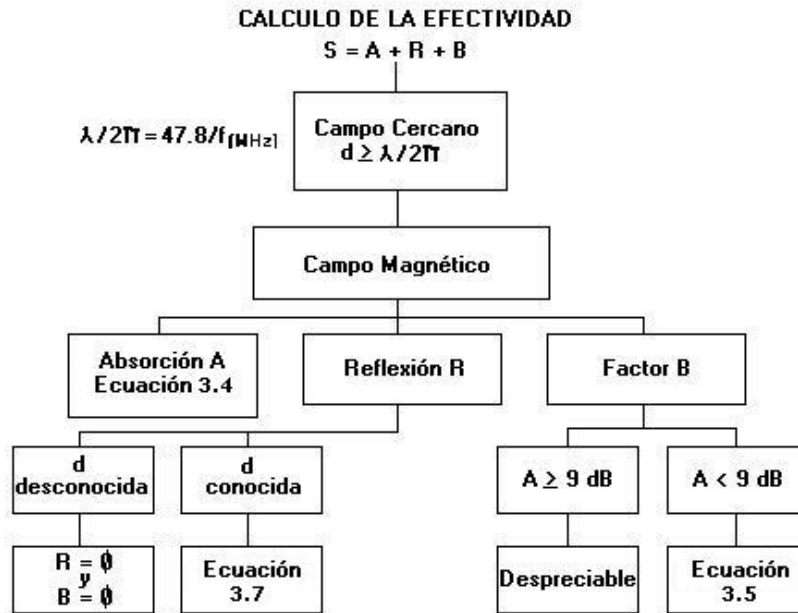
Para campos magnéticos es difícil apantallar en bajas frecuencias eficientemente porque la efectividad del blindaje es baja.

Figura 3.2. Pérdidas por reflexión en función de la frecuencia.



El resumen del cálculo de la efectividad de los blindajes se puede observar en la figura 3.3.

Figura 3.3. Diagrama del calculo de la efectividad de los blindajes.



3.2. BLINDAJES CONTRA CAMPOS MAGNETICOS

Un blindaje magnético efectivo debe encerrar totalmente a los componentes que se quieren proteger y debe tener alta permeabilidad.

En el acoplamiento magnético, el mecanismo físico es la inductancia magnética B, proveniente de cualquier interferencia externa, que induce una tensión parásita en un bucle de corriente en el circuito interferido, de acuerdo con la ley de Lenz⁹.

Es necesario tener en cuenta dos aspectos para defender a un circuito de este acoplamiento. Un aspecto es el de intentar minimizar los campos perjudiciales en la misma fuente que los genera. Esto se consigue reduciendo el área de los bucles de corriente o apantallando magnéticamente con materiales de alta permeabilidad todo el generador de interferencias, disponiendo los cables lo más cerca posible

⁹ RAYMOND A. SERWAY. Física Tomo II, Cuarta edición. Mexico. McGraw HILL. 1997, pag. 914.

de un plano de masa, si este existe. El otro es reducir la captación inductiva en el circuito interferido, minimizando el área de sus bucles, ya que, según la ley de Lenz, la tensión inducida en un bucle es proporcional a su área. Así, los dos aspectos implican la reducción de las áreas.

Un plano de masa es una superficie conductora que sirve como conductor de retorno para todos los bucles de corriente del circuito. Esto deja libre a cada bucle de corriente para tener cualquier configuración, teniendo mínima su área. Un flujo magnético mínimo significa un área de efectividad mínima, una susceptibilidad mínima al acoplamiento inductivo y una radiación magnética mínima.

3.3. EFECTOS DE LAS APERTURAS EN LOS BLINDAJES

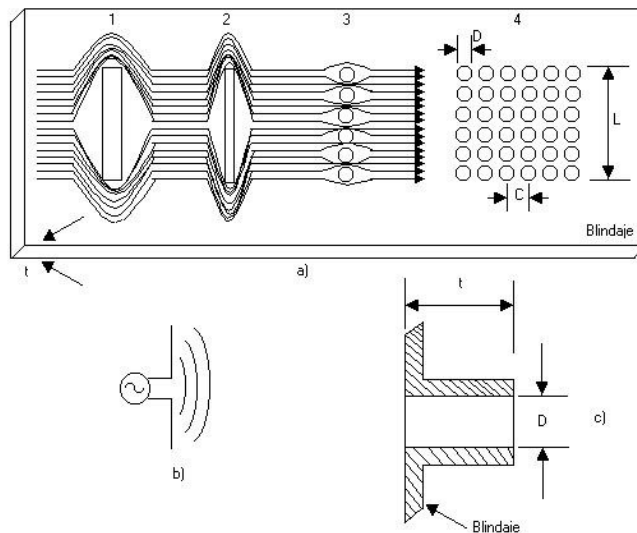
Es usual utilizar blindajes agujereados en los equipos electrónicos para que haya ventilación y satisfacer otros requisitos mecánicos. Todos los agujeros, juntas y ranuras reducen la efectividad del blindaje. De forma práctica, en el caso de un blindaje agujereado, la efectividad intrínseca del material tiene menor importancia que la pérdida a través de ranuras y juntas. Las discontinuidades en el blindaje tienen usualmente más efectos en la pérdida de efectividad del apantallado magnético que la de campo eléctrico. Por lo tanto es necesario dar mayor importancia en los métodos de reducción de pérdida de efectividad de apantallado magnético.

La disminución de efectividad en los blindajes con ranuras y juntas con el aumento de frecuencia es debida al paso de las ondas a través de las mismas. Este descenso de efectividad depende principalmente de la máxima dimensión lineal de la ranura (no del área), de la impedancia de la onda incidente y de la frecuencia de la fuente del campo. Hay que tener presente que un número elevado de pequeñas

ranuras provocan un descenso menor de efectividad que una gran ranura con la misma superficie total.

El hecho que sea la dimensión lineal máxima, no el área, la que determina el nivel de pérdida puede estudiarse considerando la teoría de circuitos aplicado a los blindajes. De acuerdo con lo anterior, los campos parásitos inducen corrientes en los blindajes y estas corrientes generan campos adicionales. Los nuevos campos cancelan el campo original en algunas regiones del espacio. Debido a esta cancelación, estas corrientes pueden circular sin ser distorsionadas en la forma en que son inducidas por el campo incidente.

Figura 3.4. a) Efecto de las discontinuidades en un blindaje.
 b) Efecto de una apertura rectangular. c) Sección de un agujero en forma de guía de ondas con diámetro D y longitud t .



Si una discontinuidad del blindaje conlleva a la circulación de las corrientes inducidas por otros caminos, la efectividad de apantallado queda reducida. Cuanto más se desvíen estas corrientes, mayor será la reducción de efectividad en el apantallado. En la figura 3.4.a) se muestra como las discontinuidades afectan a las corrientes inducidas en el blindaje. La discontinuidad 2 tiene casi el mismo efecto

que la discontinuidad 1, a pesar de ser más estrecha. La discontinuidad 3, aunque tiene mayor área total, distorsiona poco las corrientes y por ello tiene menor reducción de efectividad.

Se puede obtener una efectividad adicional si los agujeros se disponen en forma de guía de ondas. Una guía de ondas tiene una frecuencia de corte por debajo de la cual se comporta como un atenuador. Para una guía de ondas circular la frecuencia de corte es:

$$F_c = 175.26 \times 10^9 / D \text{ (Hz)} \quad 3.8$$

donde D es el diámetro en milímetro. Para una guía de ondas rectangular (ver figura 3.4. b),c)), la frecuencia de corte es:

$$F_c = 149.86 \times 10^9 / L \text{ (Hz)} \quad 3.9$$

donde L es la longitud mayor de la sección de la guía de ondas en milímetro. Si la frecuencia del campo incidente es menor a la de corte, la efectividad del apantallado contra campos magnéticos de una guía de ondas circular de diámetro D y longitud l, es:

$$S = 32 l / D \text{ (dB)} \quad 3.10$$

Esta efectividad es relativa a la máxima que se obtendría con un blindaje continuo sin agujero. En el caso de una guía de ondas rectangular, la efectividad de apantallado contra campo magnético es igual a:

$$S = 27.2 l / L \text{ (dB)} \quad 3.11$$

donde L es la mayor dimensión lineal de la sección de la guía de ondas y l es la longitud. Una guía de ondas con una longitud l tres veces su diámetro D tiene una

efectividad de apantallado de 95 dB. Si un agujero en un blindaje tiene un diámetro menor al del espesor del mismo, se forma una guía de ondas de longitud igual al espesor del blindaje.

Un método usual para tener ventilación es usar la configuración de múltiples agujeros en forma de cuadrado. El diámetro de todos los agujeros es igual a D , el espacio entre los centros de los agujeros es c , y longitud del lado del cuadrado formado es igual L . La efectividad de apantallado en este caso es el incremento de atenuación obtenido por el conjunto de agujeros con respecto a la efectividad que se tendría si se hubiera practicado un solo agujero con una dimensión de $L \times L$. Este incremento de efectividad es igual a:

$$S = 20 \text{Log} \frac{c^2 L}{D^3} + 32 \frac{l}{D} + 3.8 \text{ (dB)} \quad 3.12$$

Esta ecuación muestra que la efectividad de apantallado es independiente de la frecuencia en las condiciones en que es aplicable, es decir, $D < \lambda / 2\pi$. En la ecuación, el primer término representa la pérdida a través de los agujeros en un blindaje delgado, el segundo término es un factor de corrección del espesor del blindaje, tratando a cada agujero como una guía de ondas trabajando por debajo de la frecuencia de corte y el tercero es una constante de corrección. El término

$32 \frac{l}{D}$ es despreciable en el caso de espesores muy pequeños.

Cuando formando parte de un mismo blindaje se unen dos partes de metales distintos puede aparecer una pequeña diferencia de potencial debida a la acción galvánica entre ellos. La presencia de humedad o de vapor de agua en conjunto con los dos metales provoca la corrosión debida a la transferencia iónica del metal anódico hacia el catódico. Esta corrosión afecta al buen contacto eléctrico entre las juntas y por lo tanto también produce una menor efectividad de blindaje. La velocidad de corrosión depende de la humedad ambiental y de cuan lejos este un

metal del otro en la serie galvánica. Cuanto más lejos están dos metales en esta serie, mayor será la corrosión (ver tabla 3.4.).

Tabla 3.4. Serie galvánica para unión de distintos metales.

SERIE GALVANICA	
EXTREMO ANODICO (Más susceptible a la corrosión)	
GRUPO I	1. Magnesio y Aleaciones 2. Zinc 3. Acero Galvanizado
GRUPO II	4. Aluminio 2S 5. Cadmio 6. Aluminio 17ST 7. Acero 8. Hierro 9. Acero Inoxidable (activo)
GRUPO III	10. Pb/Sn para soldar 11. Plomo 12. Estaño 13. Niquel 14. Latón 15. Cobre 16. Bronce
GRUPO IV	17. Aleación Cobre-Niquel 18. Monel 19. Plata para Soldar 20. Niquel (pasivado por inmersión en una solución altamente ácida) 21. Acero inoxidable (pasivado por inmersión en una solución altamente ácida)
GRUPO V	22. Plata 23. Grafito 24. Oro 25. Platino
EXTREMO CATÓDICO (menos susceptible a la corrosión)	

Otro tipo de corrosión tiene lugar cuando en una unión de metales circula una corriente eléctrica, dando lugar a la corrosión electrolítica en un ambiente húmedo y ligeramente ácido. Esta corrosión puede ocurrir aunque las dos partes sean de un mismo metal y su velocidad depende de la acidez ambiental y de la corriente.

3.4. COMPARACIÓN DE MATERIALES PARA BLINDAJES

Si en un blindaje se usa un material magnético en lugar de un buen conductor, se tendrá un incremento de permeabilidad μ y un decremento de la conductividad σ . Esto implicará un incremento de las pérdidas por absorción y un decremento de las pérdidas por reflexión. Si se tiene un campo magnético de baja frecuencia, este hecho significa una ventaja debido a que éstos no tienen casi pérdida por reflexión.

La permeabilidad de estos materiales disminuye con la frecuencia y depende de la intensidad de campo H y cuando se les mecaniza pueden perder sus propiedades magnéticas. Por ejemplo, el mumetal consigue sus buenas características magnéticas gracias a un tratamiento térmico adecuado; si luego del tratamiento se somete a vibración, mecanizado o choque mecánico pierde todas sus propiedades magnéticas de apantallado.

La máxima permeabilidad y, por ello, la efectividad máxima del blindaje se mantendrá a un nivel medio de intensidad de campo de la curva de histéresis de cada material. Tanto a baja como a alta intensidad de campo H , la permeabilidad es baja y, en consecuencia, la efectividad del blindaje también es baja.

Para evitar la saturación se pueden utilizar materiales distintos superpuestos combinando adecuadamente sus permeabilidades, es decir, situando al material de baja permeabilidad frente a la fuente de campo y el de alta permeabilidad en el interior del blindaje donde habrá menor intensidad de campo H .

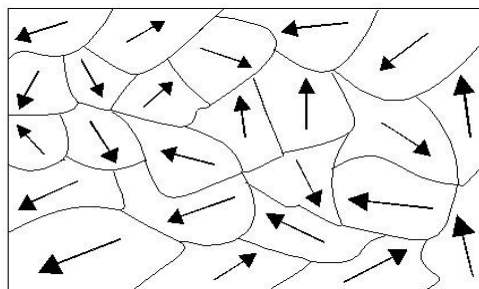
En conclusión, un material magnético (μ alta) tiene una mayor efectividad de apantallado magnético a bajas frecuencias en comparación con los buenos conductores como el cobre.

3.4.1. Materiales Ferromagnéticos

Ciertos materiales cristalinos, cuyos constituyentes atómicos tienen dipolos magnéticos permanentes, muestran intensos efectos magnéticos que reciben el nombre de ferromagnetismo. Ejemplos de sustancias ferromagnéticas incluyen al hierro, cobalto, níquel, gadolino y disprosio. Dichos materiales contienen momentos magnéticos atómicos que tienden a alinearse paralelos entre sí incluso en un campo magnético externo débil. Una vez que los momentos se alinean, el material permanece magnetizado después de que el campo externo se elimina. Esta alineación permanente se debe a un intenso acoplamiento entre momentos vecinos, lo cual sólo puede entenderse en función de la mecánica cuántica¹⁰.

Todos los materiales ferromagnéticos contienen regiones microscópicas llamadas dominios, dentro de las cuales se alinean los momentos magnéticos. Estos dominios tienen volúmenes de aproximadamente 10^{-12} a 10^{-8} m³ y contienen de 10^{17} a 10^{21} átomos. Las fronteras entre los diversos dominios que tienen diferentes orientaciones se conoce como paredes de dominio. En una muestra desmagnetizada, los dominios se orientan al azar de manera que el momento magnético neto es cero, como se ve en la figura 3.5.

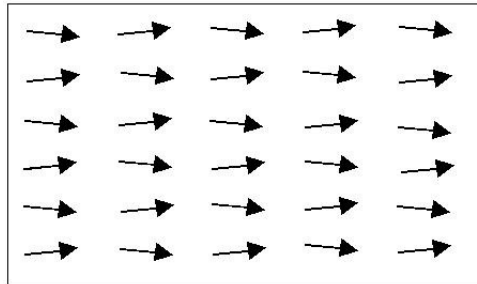
Figura 3.5. Orientación aleatoria de los dipolos magnéticos atómicos.



¹⁰ RAYMOND A. SERWAY. Física Tomo II, Cuarta edición. Mexico. McGraw HILL. 1997, pag. 886.

Cuando la muestra se pone en un campo magnético externo, los momentos magnéticos de algunos dominios pueden tender a alinearse con el campo, lo cual produce en una muestra magnetizada, como en la figura 3.6.

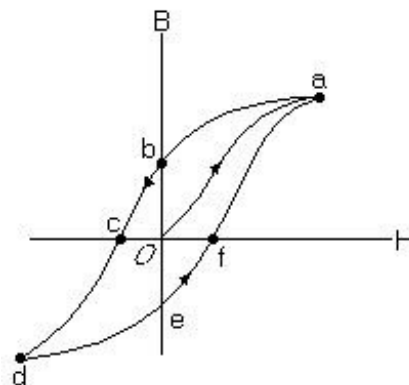
Figura 3.6. Alineación de los dipolos magnéticos.



Las observaciones muestran que los dominios inicialmente orientados a lo largo del campo externo crecerán de tamaño a expensas de los dominios orientados menos favorablemente. Cuando se elimina el campo externo, la muestra puede retener una magnetización neta en la dirección del campo original. A temperaturas ordinarias, la agitación térmica no es suficientemente alta para alterar esta orientación preferida de los momentos magnéticos.

La magnetización de una sustancia ferromagnética depende de la historia de la sustancia, así como de la intensidad del campo aplicado, lo cual se denomina histéresis magnética.

Figura 3.7. Curva de histéresis para un material ferromagnético.



En la figura 3.7. se puede observar un lazo de histéresis o curva de magnetización de un material ferromagnético.

El área encerrada por la curva de magnetización representa el trabajo requerido para llevar el material por el ciclo de histéresis. Cuando el ciclo de magnetización se repite, los procesos disipativos dentro del material debido al realineamiento de los dominios origina una transformación de energía magnética en energía térmica interna, la cual eleva la temperatura de la sustancia. Por esta razón, los dispositivos sujetos a campos externos usan núcleos fabricados con sustancias ferromagnéticas blandas, las cuales tienen lazos de histéresis estrechos así como una pequeña pérdida de energía por ciclo correspondiente¹¹.

3.5. OTRAS TÉCNICAS DE APANTALLADO

Los armarios metálicos y cajas realizadas en hierro, aluminio, o zinc, habituales en los equipos electrónicos se han ido dejando de utilizar siendo sustituidos en parte por el plástico debido a la mejora en los costos de producción para grandes series, resistencia estructural suficiente con mucho menor peso y mayor libertad en el diseño de forma. Pero el plástico tiene el inconveniente de su transparencia a los campos magnéticos, por lo que sus propiedades de apantallamiento son nulas.

Un problema usual de los armarios es que al tener puertas juntas, bisagras, etc, pueden degradar la efectividad del blindaje. Para solventar este problema se emplea juntas elásticas conductoras¹².

¹¹ RAYMOND A. SERWAY. Física Tomo II, Cuarta edición. Mexico. McGraw HILL. 1997, pag. 887.

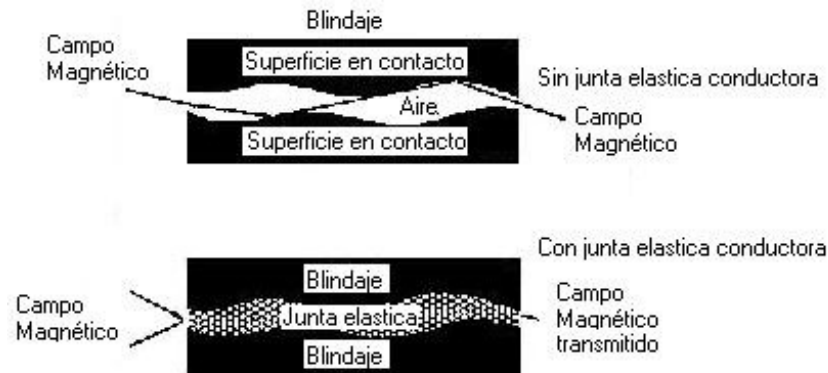
¹² JOSEPH BALCELLS Y FRANCESC DAURA. Interferencias Electromagnéticas en Sistemas Eléctricos. Alfaomega Marcombo. 1992. pag. 97.

3.5.1. Juntas Elásticas Conductoras

Se utilizan cuando se rompe la continuidad del camino conductor en una caja metálica, como en los casos en que hay una tapa encajada o una puerta. En ello el flujo de corriente puede quedar interrumpido, ya que la caja y la tapa o puerta pueden tener pocos puntos en común y estos a su vez, tener una alta resistencia de contacto. Las uniones constituyen un obstáculo para el correcto apantallamiento de los circuitos electrónicos contenidos en las cajas. Para conseguir un buen contacto existen dos soluciones: un mecanizado de precisión en las zonas de unión (muy costoso) o una junta metálica de apantallamiento. Estas juntas son encajadas entre tapa y caja, o entre puerta y armario y permiten garantizar un buen contacto, ya que además de conductoras son elásticas, permitiendo su acomodación a las tolerancias metálicas.

Otro tipo de juntas son las de malla tejida, de las que existen dos tipos principales: aquellas en que la malla metálica se compacta en una sección transversal rectangular y aquellas en que un tubo de caucho, silicona u otro elastómero se cubre con una o más capas de malla tubular. La malla suele fabricarse con aluminio o acero inoxidable, si bien puede ser cualquier otro metal. La junta elástica es comprimida entre dos superficies de unión, constituyendo un camino conductor entre las dos partes del blindaje y facilitando que las corrientes circulen en este sin cambios abruptos en la densidad de corriente y manteniendo las buenas características del blindaje (ver figura 3.5.).

Figura 3.8. Efecto de las juntas elásticas conductoras.



3.5.2. Blindaje de Cajas de Plástico

El plástico es popular en las cajas para contener circuitos electrónicos. Para apantallar se debe hacer conductores a estos plásticos y hay dos formas para conseguirlo: mezclando caja metálica conductora con el plástico en el inyectado del molde o revistiendo el plástico con un material conductor.

El método de añadir aditivos conductores en la inyección para obtener plásticos conductores evita la necesidad de realizar una segunda operación. Los aditivos más utilizados son los compuestos de policarbonato en los que se tienen escamas de aluminio, fibra de carbono (grafito), fibra de níquel y fibras de acero inoxidable o de cobre. Las de fibra de acero alcanzan eficiencias de apantallamiento superiores a 40dB con carga del 50%, mientras que las de níquel requieren carga del 10% para el mismo nivel.

La efectividad del blindaje no solo depende del material utilizado sino también del control de las fugas a través de las aperturas y los agujeros. Los plásticos conductores presentan la ventaja sobre las pinturas y metalizados conductores de una mayor resistencia al desgaste y que no pueden ser arañados.

3.5.3. Galvanizado Selectivo

Otro método para obtener un plástico conductor es depositar en la superficie plástica interna un galvanizado selectivo. Este método es un proceso electrolítico usado para depositar metal en sustratos conductores. Los metales más usados son: cobre, níquel, cobalto, cromo, plata, oro, platino, cadmio, estaño, zinc, indio, y plomo.

En algunos casos, sea cual sea el metal a depositar, se realiza un paso intermedio en el que se deposita cobre debido a su alta conductividad, pero no podría dejarse solo ya que este se oxida, perdiendo conductividad.

Las capas se presentan en el orden siguiente: el plástico de la caja, una capa de cobre y por último el metal seleccionado.

El material más usual en blindaje es el níquel, por ofrecer buena protección contra la oxidación y una resistividad de $0.04 \Omega/\text{Cm}^2$ con un espesor de 0.05 ml. El grafito también suele utilizarse debido a su resistividad de unos $0.3 \Omega/\text{Cm}^2$ con un espesor de 0.05 ml.

3.5.4. Pinturas Conductoras

Existen pinturas conductoras basadas en grafito, cobre, níquel y plata que superan ampliamente con ventaja a otros tratamientos y que tienen las siguientes ventajas: su utilización como pinturas ordinarias, aplicación por aerosol sin personal muy especializado y secado al aire, no requieren o es mínimo el tratamiento previo de superficie, se adhieren a casi cualquier tipo de plástico con gran poder de cobertura, son duras y resistentes y superan las condiciones climáticas extremas.

3.5.5. Laminas Conductoras

Otra alternativa para apantallar puede ser la aplicación de laminas adhesivas metalizadas, especialmente recortadas a medida para encajar en el interior de la caja, pero tienen el inconveniente de que los extremos son una fuente de fuga debido al efecto de los bordes, rebajando la efectividad. Normalmente son de cobre o aluminio proporcionando una buena conductividad.

4. LOS CAMPOS MAGNÉTICOS Y LA SALUD PÚBLICA

Todos estamos expuestos a una compleja diversidad de campos magnéticos de diferentes frecuencias, que se encuentran en nuestro medio ambiente. La exposición a estas frecuencias es cada vez mayor, a medida que la tecnología continúa avanzando y que se crean nuevas aplicaciones.

Para objeto de estudio, estos tipos de campos están asociados principalmente a la transmisión y uso de la energía eléctrica a las frecuencias de 50/60 Hz y son motivo de preocupación debido a la incertidumbre que se tiene acerca de lo perjudicial que pueden ser para la salud.

A continuación se expondrá sobre los posibles efectos de los campos magnéticos en la salud. La información procede de un estudio de la OMS sobre este tema, y de otros estudios recientes a cargo de eminentes autoridades.

4.1. FUENTES DE EXPOSICION

A las frecuencias de 50/60 Hz, los campos magnéticos de origen natural tienen intensidades muy bajas, del orden de 0.00001 mT. La exposición de las personas a los campos magnéticos proviene, en su mayor parte, de la generación, transmisión y utilización de la energía eléctrica. En los núcleos de población la energía eléctrica se distribuye desde las estaciones generadoras hasta los núcleos urbanos mediante líneas de transmisión de alto voltaje. Para dar conexión a las líneas de distribución de las viviendas se emplean transformadores reductores. Bajo las líneas de transmisión del tendido aéreo, los campos magnéticos pueden llegar a alcanzar los 30 mT. En las inmediaciones de las estaciones y subestaciones generadoras, este valor puede llegar a ser de 270 mT.

En las viviendas la intensidad de los campos magnéticos dependerá de diversos factores, como la distancia a que se encuentren las líneas de suministro de la zona, el número y tipo de aparatos eléctricos que se utilicen, o la configuración y situación de los cables eléctricos en la vivienda.

En la mayoría de los electrodomésticos utilizados, los campos magnéticos no sobrepasan, por lo general, los 150 mT. Este nivel puede ser bastante mayor a muy corta distancia, pero disminuye rápidamente al alejarse.

En el lugar de trabajo, todos los equipos y cables eléctricos utilizados en las instalaciones industriales generan campos magnéticos. Los técnicos que mantienen las líneas de transmisión y de distribución pueden estar expuestos a campos magnéticos muy intensos. En las estaciones y subestaciones generadoras pueden existir campos magnéticos superiores a 2 mT. Los soldadores pueden estar expuestos a campos magnéticos de hasta 130 mT. También, cerca de los hornos por inducción y de las baterías electrolíticas de uso industrial, los campos magnéticos pueden superar los 50 mT. Por otra parte, en las oficinas, los trabajadores están expuestos a campos mucho menores cuando utilizan aparatos del tipo de las fotocopiadoras o los monitores de vídeo.

En la tabla 4.1. se muestran algunas recomendaciones de exposición a campos magnéticos para la salud pública y ocupacional¹³.

Tabla 4.1. Recomendaciones de exposición a campos magnéticos.

	H (mG) publico	H (mG) ocupacional
State Regulary Florida	150	250
IRPA	1000	5000
ICNIRP	4166,7	833,3
CENELEC	5300	13300

¹³ www.edyd.com/omorales/index.html.

4.2. ESTRUCTURA BIOLÓGICA Y SU ENTORNO ELECTROMAGNÉTICO NATURAL Y ARTIFICIAL

La vida resultaría imposible sin las radiaciones naturales que forman parte de todo proceso biológico. Los seres vivos, tanto plantas como animales, son estructuras bioeléctricas: toda célula viva se comporta como un dipolo, ya que la distribución asimétrica de cargas hace que el interior celular sea negativo respecto al exterior.

También el subsuelo terrestre genera radioactividad natural, en la atmósfera se detecta electromagnetismo y las radiaciones solares son, en general, necesarias para la vida. Por tanto, los seres vivos han estado sometidos durante millones de años a influencias magnéticas de origen natural. Nuestros músculos se activan mediante pequeñas descargas eléctricas, además el corazón y el cerebro presentan una actividad de este tipo, y si conocemos tan bien su funcionamiento, ha sido precisamente por el registro de esta actividad eléctrica (electrocardiograma y electroencefalograma).

Por otra parte, las ondas presentes en la naturaleza y aquellas artificiales producto de la tecnología humana, pueden colocarse en forma ordenada de acuerdo con la frecuencia de oscilación (formando el espectro electromagnético), que abarca desde ondas de frecuencia extremadamente baja, menores de mil ciclos por segundo (Hz) hasta las de muy elevada frecuencia, de miles de millones de Hz.

Este espectro se divide en dos zonas; una de baja a media frecuencia (elevada longitud de onda), que es la que se conoce como zona de radiación no ionizante, en la que se encuentran los campos magnéticos, y otra de media a alta frecuencia (baja longitud de onda), en la que se encuentra la radiación ionizante (rayos X), con energía suficiente para producir radicales libres y romper las moléculas de ADN que forman el material genético celular.

4.3. EFECTOS ATRIBUIDOS A LOS CAMPOS MAGNETICOS

Para los campos magnéticos existen escasas pruebas experimentales confirmadas que muestren que afectan a la fisiología y el comportamiento humano a las intensidades habituales en el hogar o en el medio ambiente. En voluntarios sometidos durante varias horas a campos magnéticos de hasta 5 mT, los efectos de esta exposición fueron escasos tras realizar diversas pruebas clínicas y fisiológicas de hematología, electrocardiografía, ritmo cardíaco, presión arterial o temperatura del cuerpo.

Algunos investigadores han comunicado que la exposición a campos magnéticos puede suprimir la secreción de melatonina, que es una hormona vinculada a nuestros ritmos de actividad diurna-nocturna. Se ha indicado que la melatonina podría proteger contra el cáncer de mama, de modo que su supresión podría contribuir a una mayor incidencia de esta enfermedad por causa de otros agentes. Aunque hay indicios de que la melatonina resulta afectada en animales de laboratorio, los estudios realizados con voluntarios no han confirmado esas alteraciones en las personas.

Por otra parte, no existen pruebas convincentes de que la exposición a los campos magnéticos cause directamente daños en las moléculas de los seres vivos, y en particular en su ADN. Por lo que se considera improbable que pueda desencadenar un proceso de carcinogénesis. Sin embargo, se han realizando estudios para determinar si la exposición a esos campos puede influir en la estimulación o coestimulación del cáncer. Algunos estudios realizados en animales no han demostrado que la exposición a campos magnéticos influya en la incidencia de cáncer.

El análisis realizado en 1996 por la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos indicaba que la circunstancia de habitar cerca de una línea eléctrica podía estar asociada a un alto riesgo de leucemia infantil, aunque no de otros cánceres.

No se apreció en esos estudios ninguna relación semejante entre el cáncer y la exposición de los adultos en sus domicilios.

Muchos de los estudios publicados en los últimos diez años sobre la exposición a campos magnéticos en el lugar de trabajo carecen de solidez en varios aspectos. Por una parte, parecen indicar un ligero aumento del riesgo de leucemia en los trabajadores de empresas eléctricas. Sin embargo, en muchos de ellos no se ha tenido en cuenta la influencia de otros factores, como la posible exposición a sustancias químicas en el entorno de trabajo. El hecho es que no se ha encontrado una correlación satisfactoria entre el riesgo de cáncer en los sujetos estudiados y el valor estimado de su exposición a campos magnéticos. Por consiguiente, no se ha confirmado la existencia de una relación de causa-efecto entre la exposición a campos magnéticos y el cáncer.

Estudios realizados por la Universidad de Minesota en junio de 1998, establecieron que cada día que una línea de alta tensión trabaja normalmente, se producen en cada kilómetro 37.5 litros de ozono y 25 de óxido de nitrógeno.

La acción sutil de un campo magnético puede comprobarse con un tubo fluorescente de uso doméstico con toma de tierra. Bajo una línea de alta tensión sigue encendido sin necesidad de estar enchufado a la red.

La existencia de estas "perturbaciones" generadas en el medio que nos rodea, hace que nos preguntemos hasta qué punto son o no perjudiciales para nuestro organismo.

Existen otras suposiciones que dicen que la contaminación magnética altera los ritmos bióticos naturales que regulan muchos procesos vitales. La presencia de campos magnéticos artificiales que invaden los naturales trae como consecuencia, que los biorritmos se adapten a las pulsaciones de la corriente eléctrica, lo que perjudica al organismo y aumenta su vulnerabilidad para contraer enfermedades que antes hubiera podido combatir más fácilmente.

Aunque actualmente se considera que las radiaciones influyen en el comportamiento de la materia viviente, todavía no se cuantifica hasta que punto

pueden ser causantes de una patología importante. Distintos estudios parecen evidenciar la relación entre este campo magnético y la aparición de determinados síntomas como trastornos del sueño, fatigas crónicas, pérdidas de memoria, irritabilidad, cefaleas o jaquecas, en los adultos y suelen ser más frecuentes en los niños (por estar en fase de crecimiento y con una rápida división celular), ciertos tipos de cánceres especialmente cerebrales y leucemia.

4.3.1. Investigación Epidemiológica

En los últimos años se han intensificado las investigaciones que tratan de probar si existe un efecto biológico del campo magnético, particularmente asociado con frecuencias de onda extremadamente bajas.

En Norteamérica y en Europa Occidental es donde con mayor énfasis se han llevado a cabo estos estudios, lo cual coincide con el alto grado de industrialización y consumo eléctrico, prevalencia de neoplasias y preocupación ambiental de la población¹⁴.

Hasta el momento la agencia de protección ambiental de los Estados Unidos de Norte América (Environmental Protection Agency, EPA) no ha establecido limitaciones de protección a la población, diferentes a las usuales en el caso de las radiaciones de campos magnéticos. Sin embargo, ha llevado a cabo una amplia labor de divulgación para mantener al público informado de las posibles consecuencias de las radiaciones y de las últimas investigaciones, y así facilitar las relaciones de la comunidad con las empresas.

Es de interés anotar también que, el gobierno federal en los Estados Unidos ha destinado recursos para la investigación científica, tanto de tipo epidemiológico

¹⁴ Campos Electromagnéticos y Salud Humana. Autor: Dr. Orlando Morales Matamoros.
<http://www.edyd.com/omoraes/index.html>.

como de laboratorio, con el fin de dilucidar los efectos biológicos y posibles consecuencias sobre la salud humana.

Hasta el momento, los resultados obtenidos no han sido definitivos y a menudo son controversiales, existiendo críticas sobre los diseños del experimento o la intensidad del campo magnético utilizado experimentalmente. Lo que sí es cierto es que desde la publicación en 1979 (Wertheimer & Leeper) que describía la posible relación de leucemia en niños con exposición a líneas de alto voltaje, el público se ha interesado en el tema y ha tenido una participación que ha ido más allá de las evidencias científicas, lo cual hace necesario una revisión actualizada y a fondo de las investigaciones realizadas. Ahora, mientras no se conozcan resultados definitivos y no se conozcan los mecanismos, la práctica de la evitación prudente es una garantía. Este concepto fue enunciado por M.G. Morgan, del Depto de Ingeniería y Políticas Públicas de la Universidad Carnegie Mellon en 1989, y tiene amplia aceptación práctica. En síntesis, mientras se investiga más al respecto, más vale prevenir, utilizando procedimientos de evitación razonable.

4.3.1.1. Estudios Epidemiológicos en Empleados de Compañías Eléctricas

Los empleados de compañías eléctricas, sobre todos aquellos cuyo trabajo se desarrolla en los sitios de mayor exposición a los campos magnéticos (plantas, subestaciones, líneas de transmisión y de distribución, etc.) han sido objeto de muy variados estudios epidemiológicos.

El Departamento de Epidemiología de la Escuela de Salud Pública de la Universidad de Carolina del Norte realizó un estudio (1995) entre 138.905 empleados de cinco compañías eléctricas de Estados Unidos que por lo menos trabajaron 6 meses entre 1950 y 1986, usando un diseño experimental cuantitativo. Los datos obtenidos, a juicio de los autores, no dieron base para una

asociación entre la exposición ocupacional al campo magnético y la leucemia, pero sugirió una relación con el cáncer cerebral. La mortalidad por esta causa aumentó ligeramente en relación con la duración de los trabajos y al mayor índice de exposición al campo magnético.

Otro estudio epidemiológico de gran envergadura fue el realizado por un equipo de investigadores de cuatro instituciones: Departamento de Salud Ocupacional, Facultad de Medicina de la Universidad de McGill en Montreal, Canadá; Departamento de Medicina Preventiva y Bioestadística de la Facultad de Medicina de la Universidad de Toronto, Canadá; Instituto Nacional de Salud e Investigación Médica de Francia y los Servicios Generales de Medicina del Trabajo de la Empresa Electricité de France, (1994).

El grupo experimental abarcó poco más de 223.000 trabajadores de tres compañías eléctricas: Ontario Hydro, Hydro Québec y Electricité de France, en un periodo de observación de 1970 a 1989. Se estimó la exposición media acumulativa tomando como base la medición de trabajadores que ocupan actualmente cargos similares. Aunque no se encontró relación entre los campos magnéticos y 29 tipos de cáncer estudiados, entre ellos melanoma de la piel, cáncer mamario masculino y de próstata, sí se informa de una asociación positiva en otros tipos de cáncer como el pulmonar. En trabajadores con una exposición acumulativa alta se encontró un mayor riesgo en tres tipos de leucemia, y aunque se mencionó un mayor riesgo para cáncer cerebral, no fue estadísticamente significativo.

El mismo grupo de investigación, del estudio de Ontario Hydro, Hydro Quebec y Electricité de France, pocos meses después publicó otro trabajo donde más bien señaló sobre una clara asociación con el cáncer cerebral y no con otros tipos de cáncer de los cuales se sospechaba anteriormente. La asociación con cáncer pulmonar fue para el grupo de alta exposición al campo magnético y sobre todo detectada en Quebec. Aclararon que debido a que los aparatos usados para medir la intensidad del campo magnético también respondían a señales en la banda

entre los 5 a 20 MHz, hasta frecuencias de 150 y 300 MHz, se limitaba la evidencia de la relación causal entre enfermedad y campo magnético.

Investigadores del Registro de Cáncer de Noruega, del Instituto de Investigación Epidemiológica en Oslo, en un estudio que incluyó 5088 hombres que trabajaron en alguna de las ocho compañías eléctricas que participaron en el estudio, entre 1920 y 1991, informan que la incidencia de cáncer fue cercana a la unidad, lo cual indica que el estudio estadístico no detectó diferencias atribuibles al campo magnético. Además, la razón de incidencia estandarizada para linfoma, estuvo por debajo de la unidad y que la leucemia y los tumores cerebrales, fueron similares a los controles (casos típicos o normales).

Si resultó llamativo que aunque la exposición acumulada calculada para el campo magnético no se relacionó ni con la leucemia ni el cáncer cerebral, si se encontró un exceso de melanoma maligno en aquellos pertenecientes a la más alta categoría de exposición a campos magnéticos.

En Suecia, se encontró, en un estudio de casos y controles, que el riesgo de padecer de leucemia aumenta con el grado de exposición al campo magnético.

Un estudio muy conocido fue el de Dinamarca, realizado a 2.8 millones de daneses, de 20 a 64 años y que incluyó un período de 17 años. Se encontró un exceso de riesgo de padecer leucemia (aguda y de otros tipos), pero no tuvieron un exceso de riesgo para cáncer cerebral y melanomas. El riesgo para leucemia en trabajadores continuamente expuestos fue principalmente en electricistas en trabajos de instalación y en obreros de fundiciones, pero no se evidenció en electricistas que trabajan en las plantas de generación eléctrica.

El estudio de Sahl y colaboradores no deja de ser importante mencionarlo aquí, ya que se obtuvo especial cuidado en correlacionar el trabajo con el grado de exposición al campo magnético en trabajadores de actividades eléctricas (operadores de plantas, subestaciones, linieros, electricistas, mecánicos, técnicos, soldadores, etc.). La comparación se hizo con funcionarios de otras oficinas y personal técnico de apoyo y se concluyó que no hay una asociación consistente

entre la ocupación o el campo magnético medido y la muerte por leucemia, linfoma, cáncer cerebral y todos los tipos de cáncer combinados¹⁵.

4.3.2. Informe Karolinska

En un organismo vivo, al recibir sobre su superficie la acción de un campo magnético, se origina varios mecanismos de interacción, como la actuación de las fuerzas de los campos magnéticos sobre las cargas eléctricas en movimiento de los organismos expuestos, induciéndoles campos y corrientes eléctricas interiores. El organismo humano es un buen conductor eléctrico, ya que está compuesto fundamentalmente de agua. Por ello, cuando se encuentra expuesto a un campo eléctrico, se produce un aumento de energía en la superficie, y en el interior se generan corrientes eléctricas que pueden interferir en los mecanismos biológicos del organismo a través de su actividad eléctrica natural. Estas interferencias pueden suceder tanto en el funcionamiento de cada órgano como en el transporte de información en las células, ya que éstas se comunican e interaccionan entre sí mediante señales químico-eléctricas y se ha comprobado que un campo eléctrico y/o magnético exterior de baja frecuencia y baja intensidad que induzca al organismo una determinada corriente, puede modificar dicha comunicación, lo cual parece ser que afecta a las síntesis de proteína y al sistema inmunológico. Según investigaciones de Russel Reiter, Universidad de San Antonio (Estados Unidos), es posible que los campos magnéticos alteren en la glándula pineal, situada en la parte posterior del cerebro, la producción de la hormona melatonina, que se segrega durante la noche para regular el reloj biológico del cuerpo.

¹⁵ FEYCHTING, M. y AHLBOM, A.: "Magnetic fields and cancer in children residing near Swedish high-voltage Power lines" *American Journal Epidemiology*, nº 7, pág 467-481. 1993.

A pesar de tenerse suficiente información sobre las graves consecuencias para la salud de las personas que viven cercanas a una línea de alta tensión, numerosas constructoras siguen levantando edificios cercanos a estas instalaciones con el consentimiento de los ayuntamientos y la falta de información suficiente a los ciudadanos. Recientemente, la línea que pasaba por debajo de la urbanización Rosa de Luxemburgo en San Sebastián de los Reyes, ha sido quitada tras largos años de lucha vecinal¹⁶.

La exposición a campos eléctricos y magnéticos genera estrés, falta de concentración, fatiga, irritabilidad, etc., y disminuyen las defensas orgánicas de las personas o niños expuestos, con lo cual las enfermedades pueden aparecer con mayor facilidad¹⁷.

El informe Karolinska elaborado en Suecia y avalado por el Instituto del mismo nombre de gran prestigio internacional, es el resultado de una investigación exhaustiva sobre "Los Campos Magnéticos y el Cáncer en personas que viven cerca de las Líneas de Alta Tensión Suecas", dirigido por María Feychiting y Anders Ahlbom, en el que se realizó un estudio a 436.503 personas que habían vivido a menos de trescientos metros de una línea de alta tensión entre 1960 y 1985. Concluyó recomendando no vivir a menos de cien metros de una torre o línea de alta tensión. Suecia ha elaborado una ley que regula este tipo de instalaciones y ha trasladado a los colegios cercanos a estas líneas, fuera del alcance de los campos magnéticos. El informe sueco planteó igualmente, el riesgo de leucemia entre la población infantil localizada a menos de 300 metros de las líneas de alta tensión. Según el profesor Anders, hay indicios proporcionados por pruebas de laboratorio, en animales y también por personas expuestas en su

¹⁶Campos Electromagnéticos y Salud Humana. Autor: Dr. Orlando Morales Matamoros.

¹⁷ Campos Electromagnéticos y Salud Humana. Autor: Dr. Orlando Morales Matamoros.
<http://www.edyd.com/omoraes/index.html>.

trabajo a elevados niveles de magnetismo, que éste influye en determinadas formas de cáncer.

Otro estudio que se realizó fue FEYCHTING Y AHLBOM (1993), del Instituto Karolinska, en Estocolmo, estudiaron a menores de 16 años que hubieran vivido por lo menos un año a no más de 300 m de líneas de transmisión de 200 y 400 kV. El resultado fue un aumento en el riesgo para leucemia infantil, proporcional a la radiación magnética, pero no para linfoma, ni tumores del sistema nervioso central.

4.4. OTROS EFECTOS ATRIBUIDOS A LOS CAMPOS MAGNETICOS

Entre otros efectos atribuidos a los campos magnéticos se encuentran algunos casos preocupantes de aborto espontáneo debido a los campos magnéticos en oficinas, pero la medición de campos magnéticos mediante dosímetros personales arrojó un valor modesto, entre 1.0 y 6.5 mG, con un promedio de 3.2 mG.

Sin embargo, en Finlandia se encontró que el aborto natural era mayor cuando el campo magnético residencial era más alto, aunque señalan que por el bajo número de casos, el resultado debe interpretarse con precaución. A la inversa, otros encontraron que la exposición residencial no tiene efectos reproductivos adversos tales como embarazo espontáneo o malformaciones, aunque debe estudiarse más acerca de este planteamiento.

Investigaciones en Australia (1994) señalaron que las personas expuestas al campo magnético de las terminales de video, no están en mayor riesgo que la población general. Este estudio fue confirmado por Parazzini, que informó de la ausencia de evidencia que indicara riesgos reproductivos por exposición al campo magnético proveniente de los aparatos de video.

En Francia, en un estudio para correlacionar si las líneas de alto voltaje estaban asociadas a malformaciones congénitas, se concluyó que no hay exceso de

ningún tipo de malformaciones observadas por exposición a líneas de transmisión. Todo indica que no hay evidencia significativa de riesgo por campos magnéticos, tal como se demuestra en la ausencia de efectos sobre el crecimiento y el desarrollo fetal (Bracken 1995). En forma similar, Lundsberg (1995) en un estudio de exposición al campo magnético y subfertilidad, encuentra que el recuento, morfología y movilidad de espermatozoides fueron normales¹⁸.

Por tanto, no se ha demostrado la relación inequívoca entre campo magnético y riesgo reproductivo y más bien la mayor parte de los trabajos son negativos al respecto.

4.5. INVESTIGACIONES DE LABORATORIO

4.5.1. Mecanismos de Acción Propuestos

Aunque no se sabe el mecanismo de acción de cómo los campos magnéticos ejercen su efecto biológico, las teorías son abundantes, y se pueden citar: alteraciones en el potencial eléctrico de la membrana celular, problemas asociados a la concentración intracelular del ión calcio, interferencia con la síntesis proteica, variación de la liberación de melatonina, cristales de magnetita, alteraciones enzimáticas, etc., varios de los cuales han sido discutidos por Cleary (1993).

La regulación de la glándula pineal ha tenido bastante divulgación, con base en el principio de que la hormona producida, llamada melatonina tiene un efecto anti-oncogénico y por tanto protector contra el cáncer, es suprimida por los campos magnéticos. Reiter (1993) es un propulsor del mecanismo mediante el cual los

¹⁸ Campos Electromagnéticos y Salud Humana. Autor: Dr. Orlando Morales Matamoros.
<http://www.edyd.com/omoraes/index.html>.

campos magnéticos inhiben la liberación de melatonina, mediante estímulos luminosos o debidos a ondas magnéticas de carácter oscilatorio. Sin embargo, se ha visto que a diferencia de los roedores, en humanos los campos magnéticos provenientes de experimentos, no alteraron los niveles de melatonina.

Ya que en ratas la acción citotóxica de la melatonina sobre líneas celulares de cáncer mamario es evidente, y ya sea por la luz o los campos magnéticos se inhibe la melatonina, habría un aumento en el riesgo del cáncer mamario. En igual sentido se manifiestan otros autores que trabajaron sobre un modelo experimental de células cancerígenas humanas, en que se demuestra que el campo magnético eliminó el efecto anti-oncogénico de la melatonina (Liburdy 1993).

Ha sido descrito que al alterarse el potencial de la membrana celular (Azadniv 1993), en varios tipos de células animales, los campos magnéticos actúan como una señal que reduce la tasa de crecimiento.

En líneas celulares leucémicas humanas, por efecto de campos magnéticos se registran cambios en la conductividad de la membrana celular, pero esto se consigue a intensidades de radiación que son tres órdenes de magnitud mayores que las corrientes (Santini 1995).

Por su lado, Eichwald (1995), reporta que mediante un proceso de transducción celular en que interviene la proteína reguladora G, el campo magnético altera la concentración intracelular de calcio y por tanto las actividades dependientes de este catión.

Se ha hablado también de una posible interacción entre magnetita intracelular y el campo magnético. Estas partículas ferromagnéticas lesionarían la estructura biológica si se expone al campo magnético (Kobayashi 1995), pero se ha encontrado que los informes de laboratorio son equívocos debido a encontrarse la magnetita como contaminante (Saffer 1995).

4.5.2. Biología Celular y Molecular

Aunque el mecanismo oncogénico es desconocido, los informes científicos producto del resultado de los experimentos de laboratorio son tan abundantes, como variados y a veces contradictorios.

Así, por ejemplo, Galt (1955), no halló defectos cromosómicos ni alteraciones enzimáticas por efecto de los campos magnéticos. Para que se produzca un efecto carcinogénico o mutagénico, las alteraciones en el ADN son un requisito, pero en experimentos con filamentos sencillos de ADN no pudo producirse lesión por efecto de campos magnéticos ni con un estrés oxidativo simultáneo (Fairbairn & O'Neill 1994). Mediante estudios con linfocitos, con exposición entre 50 y 100 mG, de cinco parámetros en un estudio citogenético, dos fueron afectados, entre ellos el rompimiento de cromosomas. Se ha reportado que los campos magnéticos aumentan la transcripción genética y la tasa de degradación del ARN ribosomal, según se ha visto en células leucémicas (Green 1993).

Mevissen (1995), en experimentos con ratas, encontró un aumento en la enzima descarboxilasa de la ornitina, similar a lo que producen otros agentes cancerígenos, por exposición a campos magnéticos, pero no se observó en todos los tejidos estudiados.

En líneas celulares de osteosarcoma, el efecto de los campos magnéticos se manifestó en aumento de los receptores de membrana, similar a la insulina (Fitzsimmond 1995), lo cual explicaría el efecto osteogénico.

Para algunos hay un aumento en el metabolismo, como se comprueba por su mayor capacidad para adaptarse a nutrientes y ligero aumento en el crecimiento, visto en bacterias sometidas a campos magnéticos (Kondo 1995). Pero más bien, con una exposición elevada, el crecimiento de linfocitos se inhibe, como lo ha demostrado Norimura (1993).

Resulta de interés conocer que Dacha (1993), han demostrado que en eritrocitos, las enzimas glicolíticas, el consumo de glucosa y la formación de lactato, no cambia por acción del campo magnético, al compararse con los controles.

4.5.3. Efectos Benéficos Encontrados

Además de todos los estudios para demostrar lo maligno que pueden ser los campos magnéticos para la salud humana, también se han encontrado algunos efectos benéficos. Para algunos, la magnetoterapia es una alternativa válida usada en la medicina física, más que un peligro, como Jacobsen (1993), que le ve una serie de aplicaciones alternas. Ha sido muy usada en casos de fracturas y en general, alteraciones del tejido conectivo, ya que aumenta su capacidad de regeneración y reparación tisular (Aaron & Ciombor 1993). También se ha visto un efecto benéfico en casos de la enfermedad de Parkinson y en la esclerosis lateral múltiple, con dosis muy pequeñas en el rango de picoteslas (Sandik & Derpapas 1993; Sandik 1994).

Se ha visto que resuelve favorablemente procesos inflamatorios como la osteoartritis de la rodilla y a nivel cervical (Trock et al 1995), medido como mayor movilidad y reducción del dolor, por efecto de la magnetoterapia. También se ha demostrado que pulsos cortos de origen magnético, reducen el dolor pélvico de origen ginecológico (Jorgensen 1994).

La magnetoterapia se ha utilizado con éxito en enfermedades reumáticas, desórdenes isquémicos, tratamiento de la espasticidad y en enfermedades oftálmicas (Jerabeck 1994).

Es frecuente como medio de diagnóstico el uso de la resonancia magnética nuclear que utiliza intensidades de más de 1 T, o sea mayor de 10.000 G, sin que se reporten efectos nocivos.

4.6. LEGISLACIONES EMPLEADAS EN ALGUNOS PAISES SOBRE LA EXPOSICION DE LOS CAMPOS MAGNETICOS

La legislación española sobre riesgo eléctrico sigue la Norma UNE-ENV 50166-1, que tolera unos límites de exposición enormes, hasta 100 μT para público en general y hasta 500 μT para trabajadores, esta norma esta basada en los estándares del Consejo de la Unión Europea (IRPA-CENELEC), pero estos niveles de referencia no son aceptadas por países modernos como Suecia, Suiza e Italia.

Así mismo la sentencia de la Audiencia de Murcia (febrero 2001), considera muy peligrosa la "intromisión en el domicilio" de un campo magnético de 10 mG (1 μT), producido por un transformador de Alta Tensión situado en la cercanía de una casa, una situación habitual por otra parte que se da, inadvertidamente, en miles de viviendas.

Diversos países siguiendo el modelo sueco, aplican el principio de precaución y señalan el límite máximo de 2,5 mG (0,25 μT), para exposición permanente de las personas al campo magnético, dado que a partir de este nivel las investigaciones en Física Médica observan potenciales efectos neurológicos, inmunitarios, y cancerígenos a largo plazo, un nivel por otra parte que se reduce cada año, en tanto progresa la investigación en Bioelectromagnetismo.

Este es el nivel de referencia adoptado por la norma SWEDAC que regula la exposición a 50 cm de una pantalla de visualización. Según diversos estudios científicos (H. Ramón y Cajal) a partir de 0,1 microTeslas (μT) ya existe riesgo biológico, especialmente para los fetos, con potenciales efectos teratógenos (abortivos). Como se ha publicado desde 1992 (Feychting y Ahlbom), la exposición a un campo magnético de 3 mG (0,3 μT), puede incrementar el riesgo de patologías degenerativas (leucemia infantil y cáncer de cerebro), más del 250%, y a partir de 3 mG (0,3 μT) el riesgo aumenta más del 450%.

Con criterios de seguridad sanitaria muy diferentes a los expuestos en el informe, según normas suecas (Informe Karolinska), diversos países consideran que el pasillo de seguridad de una línea de Alta Tensión debe ser, al menos, de un metro por cada KV, o sea que con un tendido eléctrico de 110 KV, deberá excluirse la presencia humana en una franja de 110 m a cada lado de la línea de Alta Tensión, y en una de 380 kV, será de 380 m a ambos lados del eje.

Esto implica un importante desembolso económico para las compañías eléctricas. El gobierno de Suiza ha fijado límites más estrictos para las emisiones de ondas de radio y electromagnéticas en lugares públicos. Hasta el momento Suiza seguía las normativas de ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection), pero la BUWAL (organismo suizo de medio ambiente) ha decidido que existe evidencia suficiente como para fijar normativas más estrictas¹⁹.

La BUWAL ha fijado un límite de 10 mG, 1 μ T, para los campos magnéticos admisibles en áreas de trabajo y residenciales.

Quizás esta cifra no nos diga demasiado, pero hay que destacar que es 100 veces menor que las fijadas por la ICNIRP. La BUWAL fundamenta su decisión en que "nuestra tarea es proteger al público, no sólo de aquellos agentes que se sabe son nocivos, sino también de aquellos que podrían ser nocivos".

El Parlamento Europeo emitió un dictamen de fecha 10-3-99 sobre la recomendación del Consejo a la limitación de los ciudadanos a los campos magnéticos desde 0 Hz a 300 GHz.

Entre otros apartados el Parlamento Europeo "consideró que es absolutamente necesaria la protección de los ciudadanos de la Comunidad contra los efectos nocivos para la salud, o potencialmente nocivos a largo plazo, que se sabe pueden resultar de la exposición a campos magnéticos".

¹⁹ Campos Electromagnéticos y Salud Humana. Autor: Dr. Orlando Morales Matamoros.

<http://www.edyd.com/omoraes/index.html>.

El Parlamento Europeo continuó alegando que: "Los Estados miembros determinarán las distancias de seguridad mínimas de los aparatos eléctricos y las distancias mínimas de los edificios públicos, viviendas y lugares de trabajo para el establecimiento de líneas eléctricas de alta tensión, de radares e instalaciones de transmisión y retransmisión incluidos los repetidores de telefonía celular, y establecerán las distancias de seguridad recomendadas para el uso".

Es obvio que la línea objeto del presente estudio queda reflejada dentro de estos focos emisores de radiaciones que precisan de "necesaria protección contra los efectos nocivos para la salud".

4.7. CONCLUSIONES CON RESPECTO A LA SALUD

Luego de una amplia revisión bibliográfica e internet se investigaron varios artículos provenientes de la literatura científica mundial, la mayor parte publicados entre 1985 y 1995, sobre el efecto biológico de los campos magnéticos y en particular sobre la salud humana, se encontró que:

- a) Existe un efecto biológico de los campos magnéticos generados por la corriente eléctrica alterna. El mecanismo se desconoce y los posibles efectos perjudiciales no han sido debidamente comprobados.

- b) No se ha probado, en la mayor parte de las investigaciones que los campos magnéticos estén asociados a problemas reproductivos ni den origen a malformaciones congénitas, así como tampoco con alteraciones del comportamiento.

- c) En cuanto a diversos tipos de cáncer involucrados (leucemia y cerebral principalmente), los resultados no son concluyentes, a pesar de la amplia gama de

investigaciones en diversas partes del mundo. El efecto en los adultos no ha sido constante ni reproducible, aunque en niños existe una ligera tendencia al aumento en el riesgo para la leucemia.

Se desconoce el mecanismo biológico por el cual los campos magnéticos podrían producir el cáncer cerebral y la leucemia; hasta la fecha sólo se tienen hipótesis de trabajo, sujetas a estudio y comprobación.

d) El ser humano constantemente está expuesto a campos magnéticos de variada intensidad, al utilizar aparatos eléctricos tanto en su vida doméstica como laboral.

e) Mientras se aclara este problema científico, se ha recomendado la aplicación de la "evitación prudente", o sea, evitar la exposición a los campos magnéticos cuando resulte razonable, práctico y económico, como aplicación del principio de la precaución, pero no por haberse confirmado un peligro.

f) En general los medios de información tratan de exagerar las consecuencias, aunque los físicos señalan que las ondas de los campos magnéticos de frecuencia extremadamente baja, son de tan bajo contenido energético que difícilmente podrían afectar la estructura biológica.

g) A pesar de cierta renuencia a establecer estándares para este tipo de radiación no ionizante, la incertidumbre científica aún en países líderes como Suecia no ha permitido tomar en consideración el establecimiento de límites a nivel mundial. El organismo competente de la Unión Europea (CENELEC), recientemente ha fijado niveles de referencia que superan en mucho los valores usuales de exposición encontrados en Costa Rica.

h) Existen abundantes estudios que comprueban el uso benéfico de los campos magnéticos en Medicina, desde el rango de picoteslas (pT) hasta los 2 T usados en la resonancia magnética nuclear.

i) Sobre este asunto controversial, en que abundan críticas metodológicas, existe consenso en que se debe investigar más y mejor como una forma de resolver científicamente si hay un efecto real originado por los campos magnéticos, o bien si existe la contribución de otros factores concurrentes.

5. INSTRUCCIONES PARA LA MEDICIÓN DE CAMPOS MAGNÉTICO

Las mediciones de campos magnéticos a 60 Hz (o densidades de flujos magnéticos) se deben realizar de acuerdo con las especificaciones y guías que están indicadas en:

- ANSI-IEEE Standard 644-1987 "IEEE Standard Procedure for Measurements of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines"²⁰.
- International Labour Office, "Protection of Workers from Power Frequency Electric and Magnetic Fields: A Practical Guide", 1984.

La utilización de las indicaciones de dichas Normas se recomienda hasta que se publiquen las pertinentes normas IEC o CENELEC.

Los monitores de exposición personal (a veces llamados "dosímetros") se pueden usar para mediciones de campos, solamente si su comportamiento es adecuado para tal uso.

Si se usan sondas de efecto Hall, se advierte que son sensibles también a los campos magnéticos estáticos (incluyendo el campo terrestre o "geomagnético").

5.1. ELECCIÓN DEL DISPOSITIVO DE MEDICIÓN

La gama de frecuencias del dispositivo de medición debe ser conocida y comparada con el espectro frecuencial o el contenido armónico del campo a medir. Si el espectro frecuencial o el contenido armónico no se conocen de antemano, puede ser necesario hacer un análisis espectral para comprobar la adecuación del dispositivo al campo a medir.

²⁰ Ver anexo A

La incertidumbre global del dispositivo de medición debe ser menor que el 10%. Básicamente, un medidor de intensidad de campo tiene dos partes: la sonda o el sensor del campo y el detector que consiste en un circuito procesador de señales y un visualizador (display) analógico o digital.

Los dispositivos pueden poseer sondas isotrópicas (tres elementos sensores ortogonales) o sondas anisotrópicas (elemento sensor uniaxial).

5.1.1. Calibración

La calibración de los dispositivos de medición se debe realizar en sistemas que crean campos uniformes.

Un campo magnético uniforme se puede obtener con bobinas de Helmholtz o con varias disposiciones de bobinas cuadradas de diferentes tamaños²¹.

5.2. MEDICIONES EXPERIMENTALES

Para complementar la parte teórica, se llevó a cabo una serie de mediciones experimentales de campo magnético, realizadas en la subestación eléctrica de la clínica Madre Bernarda. Para dicho objetivo, se utilizó un osciloscopio marca GW INSTEK y un Gaussímetro FW BELL con sonda tipo transversal²².

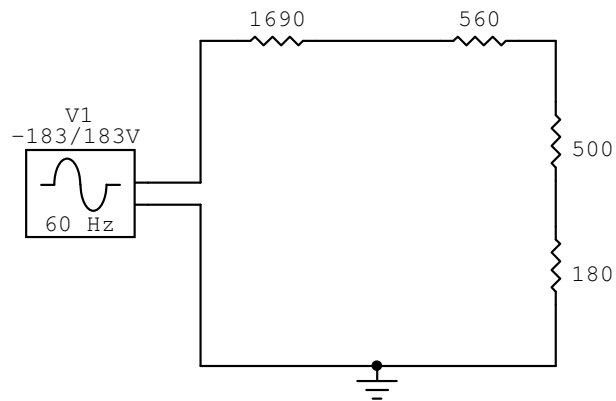
Con el osciloscopio, se observó la señal fundamental de tensión en los tomas eléctricos de la oficina que se encuentra arriba de la subestación, con el fin de

²¹ Medida de emisiones electromagnéticas en buques oceanográficos. Universidad Politécnica de Cataluña. <https://www-eel.upc.es/wwwdib/gcem/esp/investigacion.htm>

²² Ver anexo B

buscar algún tipo de perturbación o distorsión armónica en la onda. Se utilizó el siguiente esquema:

Figura 5.1. Circuito de prueba.



de donde

$$I_{(pico)} = \frac{183.84V}{1690\Omega + 560\Omega + 500\Omega + 180\Omega} = 62.7mA$$

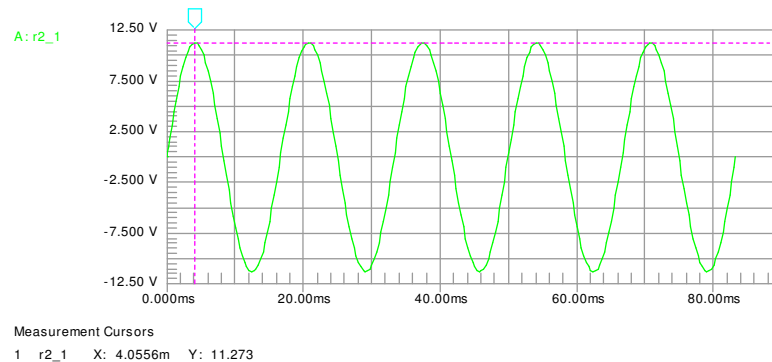
La señal de voltaje se midió en la resistencia de 180Ω, entonces:

$$V_{180(pico)} = 180\Omega * 62.7mA = 11.28V$$

$$P_{180} = 11.28V * 62.7mA = 0.7W$$

Haciendo la simulación se obtiene lo siguiente:

Figura 5.2. Grafica de la simulación.



La señal que se obtuvo en el campo no tuvo ningún tipo de perturbación armónica, es decir, la onda senoidal no presentó ninguna anomalía, aunque cabe anotar que la frecuencia está un poco por encima del valor nominal (60Hz), el valor medido fue de 61.53 Hz²³.

Las mediciones de campo magnético se realizaron con el Gaussímetro, tanto en la subestación eléctrica como en la oficina que se encuentra encima de esta. Para la subestación se escogió los puntos o sitios posibles generadores de campo magnético, por lo que se midió el campo producido por el transformador, las celdas de baja y media tensión, y el cableado por bandejas. Las medidas obtenidas fueron las siguientes:

Tabla 5.1. Medidas de campo magnético en subestación.

ITEM	MEDICION (Gauss)	LUGAR	OBSERVACION
1	31.1	Transformador	
2	11.1	Celda de media tensión	
3	19.6	Celda de baja tensión	En el momento estaban circulando 600A
4	34.6	Cableado por bandeja	Cables de baja tensión
5	21.3	Cableado por bandeja	Cables de baja tensión

²³ WILLIAM H. HAYT Y JACK E. KENMERLY. Análisis de Circuito en Ingeniería. Quinta Edición. McGraw HILL. 1997, pag. 235.

Para tomar las medidas en la oficina se eligió una serie lugares aleatorios abarcando todo el área de trabajo, es decir, ubicación de equipos electrónicos y de las personas, con el fin de observar si los campos magnéticos pueden causar interferencias en los equipos o afectar la salud humana. Los resultados fueron los siguientes:

Tabla 5.2. Medidas de campo magnético en oficina.

ITEM	MEDICION (Gauss)	LUGAR	OBSERVACION
1	6.4	Punto aleatorio	Punto coincidente con transformador
2	1.3	Punto aleatorio	Se encuentra el escritorio
3	9.7	Cerca al toma de alimentación	En este se conecta el computador

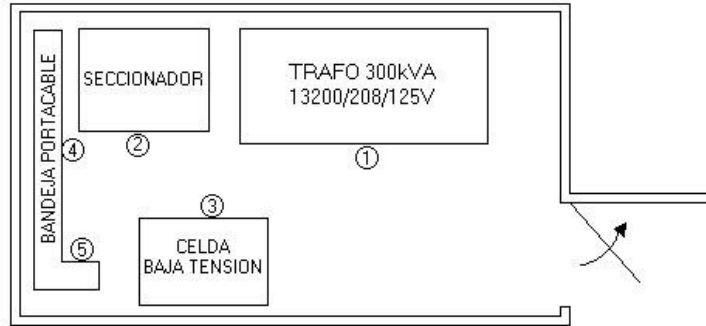
5.2.1. Análisis de Resultados

Las mediciones hechas con el osciloscopio mostraron que la señal de la fundamental no presenta distorsiones, pero se alcanzó a observar que la frecuencia era de 61.53 Hz un valor alto y perjudicial para los equipos. Según lo anterior se considera que ese valor no se debe a los campos magnéticos si no a la calidad de la energía que suministra Elecrocosta a la clínica Madre Bernarda, ya que se hicieron otras mediciones en otros lugares con el osciloscopio y se encontró el mismo valor de la frecuencia.

Para las mediciones de los campos magnéticos se notó que los valores medidos eran mayores en los puntos donde circulaba más corriente, esto se debe a la ley de Ampere²⁴. Dichos puntos son los que se muestran en el siguiente diagrama:

²⁴ RAYMOND A. SERWAY. Física Tomo II, Cuarta edición. Mexico. McGraw HILL. 1997, pag. 871.

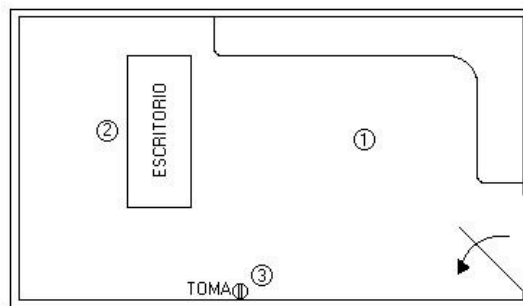
Figura 5.3. Esquema de la subestación.



Como se puede observar los mayores valores de campo magnético se encontraron en el secundario del transformador de 300 KVA, y el cableado del breaker totalizador por baja tensión del transformador.

En la oficina de atención al cliente de la Clínica Madre Bernarda ubicada sobre la subestación de esta instalación, los puntos donde se realizaron las mediciones son los que se muestran en el siguiente diagrama:

Figura 5.4. Esquema de la oficina.



En estas mediciones se esperaba que el punto que iba a registrar la mayor medición correspondería al punto ubicado en la parte arriba del transformador, pero nos encontramos con la sorpresa que el punto donde se encontraba el mayor campo magnético fue el ubicado en el tomacorriente que alimentaba el

computador de la oficina, lo cual da a entender que los problemas presentados por el computador, como el desplazamiento de la pantalla y las reiniciadas se deben a la interferencia que producen los campos magnéticos en ese sitio.

Como conclusión de estas mediciones se puede decir que en los lugares donde circula mayor corriente para subestaciones de 13.2 Kv serán los puntos donde los campos magnéticos serán mayores, aunque hay que tener presente que estas mediciones se hicieron lo más cerca posible a los elementos energizados por lo que las valores encontrados son los más altos encontrados.

Para el análisis de los datos en relación con la salud, hay que considerar los niveles permitidos de campos magnéticos en otros países desarrollados, ya que en Colombia todavía no existen normas que regulen los niveles de exposición a estos campos, la siguiente tabla muestra los valores máximos permitidos:

Tabla 5.3. Niveles de campo magnético en Europa.

PAIS	NIVEL (T)	NIVEL (G)
España	500 μ T	5000 mG
Suecia	0,25 μ T	2,5 mG
Suiza	1 μ T	10 mG

Aunque los valores obtenidos en la Clínica Madre Bernarda fueron elevados hay que resaltar que dichos datos fueron tomados lo más cercano posible (10 cm) a los equipos que se encontraban, como el transformador o el cableado de baja tensión para el caso de la subestación.

En la oficina de atención al cliente se encontraron valores de 1.3 G y de 6.4 G en zonas por donde transitan diariamente personas, el valor de 1.3 G es permitido en España pero no en Suecia y Suiza, pero el valor de 6.4 G no es permitido en ninguno de estos países hay que recordar que este valor fue el que se obtuvo en

el punto ubicado justamente arriba del transformador de la subestación de la clínica.

Si bien, todavía no se ha logrado demostrar que los campos magnéticos son dañinos para el cuerpo humano, tampoco se ha demostrado lo contrario, pero por seguridad lo mejor es no ubicar oficinas en sitios cercanos a la subestación de una empresa y tratar de evitarlos al máximo utilizando cualquier mecanismo de blindaje.

Para el caso de la clínica, una solución posible sería hacer un blindaje que proteja toda la oficina con el fin de disminuir los niveles de exposición a estos campos, pero tal solución implica una alta inversión de dinero, lo cual muestra que el factor económico influye de manera relevante en el momento de buscar la mejor y la mayor protección contra los campos magnéticos.

5.3. CALCULO DE LA EFECTIVIDAD DEL BLINDAJE

Para calcular la efectividad del blindaje se debe considerar el tipo de material que se va a utilizar. En este caso se ha decidido emplear un material ferromagnético que sea de fácil acceso comercial y de uso común, por lo tanto se empleara el hierro comercial, el cual según la tabla 3.3. tiene una conductividad relativa σ_r de 0.17 y una permeabilidad relativa μ_r de 200, además se considerara un espesor t de 0.8 cm. Sabiendo que la efectividad del blindaje depende de las pérdidas por absorción y reflexión, primero se hallan las pérdidas por absorción, entonces²⁵

$$A = 1314.3 * 0.8cm * \sqrt{200 * 0.17 * 0.000060Hz} = 47.49dB$$

²⁵ Estándar del IEEE sobre métodos de medida de intensidad de campo electromagnético de ondas sinusoidales continuas de entre 30Hz y 30GHz .

http://catedra-coitt.euitt.upm.es/web_salud_medioamb/normativas/ieee/291.pdf

luego se calcula la profundidad δ

$$\delta = \frac{0.0066}{\sqrt{200 * 0.17 * 0.000060Hz}} = 0.1461cm$$

teniendo este valor se puede hacer la corrección por las múltiples reflexiones explicada en capítulos anteriores

$$B = 20 \log\left(1 - e^{-\frac{2 * 0.8cm}{0.1461cm}}\right) = -1.574 \times 10^{-4} dB$$

por ultimo, se calcula las perdidas por reflexión tomándose la distancia del emisor al blindaje de 2.5 cm.

$$R = 74.6 - 10 \log\left(\frac{200}{0.000060Hz * 0.17 * 2.5^2}\right) = 9.6310dB$$

Finalmente, la efectividad del blindaje de hierro comercial es:

$$S = 47.49dB + 9.6310dB - 1.574 \times 10^{-4} dB = 57.12dB$$

El valor obtenido muestra una efectividad media la cual es adecuada para realizar el blindaje²⁶.

²⁶ JOSEPH BALCELLS Y FRANCESC DAURA. Interferencias Electromagnéticas en Sistemas Eléctricos. Alfaomega Marcombo. 1992.

CONCLUSIONES

Con este estudio se logro identificar que los blindajes son un mecanismo que permite en cierto modo que aquellos equipos electrónicos que están sometidos a campos magnéticos no se alteren en su funcionamiento debido a interferencias. Pero hay que tener presente que el blindaje no aísla el campo magnético sino que funciona como un medio de acoplamiento inductivo para que el material del blindaje conduzca las corrientes parásitas inducidas por el campo y de esa forma proteger el equipo deseado. Por lo tanto, se recomienda como una alternativa para atenuar los niveles de campo presentes en la Clínica Madre Bernarda según los cálculos realizados de efectividad.

En las mediciones que se hicieron en la Clínica Madre Bernarda se pudo comprobar que en los sitios por donde circulaba más corriente se encontraban los campos magnéticos más intensos, dichos lugares se ubican en la subestación, la cual es de acceso restringido y no representa un inconveniente para las personas, sin embargo en la oficina exactamente arriba de la subestación se pudieron medir campos magnéticos entre valores de 1.3 G y 9.7 G que en países como España según su reglamentación son perjudiciales para la salud, por lo tanto se tendría que estudiar la forma de realizar un blindaje entre la subestación y la oficina para disminuir los niveles de campo magnético que se encuentran en esta zona; aunque no hay que alarmarse ya que hasta el momento no existen estudios que demuestren que estos valores sean perjudiciales.

Otras de las mediciones hechas en la Clínica Madre Bernarda fue la de frecuencia en la cual se obtuvo 61.53 Hz, este valor esta por encima del rango que establece la CREG el cual es de 59.8 y 60.2 Hz para el valor nominal de 60 Hz; las mediciones se hicieron en distintos lugares de la clínica y se encontró el mismo valor lo que nos hace pensar que la empresa de distribución eléctrica Electrocosta no esta suministrando una frecuencia adecuada la cual permita que los equipos trabajen adecuadamente, por el contrario pueden presentar daños debido a la mala calidad de la energía, por lo cual se le envió una carta a esta entidad manifestando la anomalía encontrada.

No se ha probado, en la mayor parte de las investigaciones que los campos magnéticos estén asociados a problemas de salud en el cuerpo humano, ya que se desconoce el mecanismo biológico por el cual los campos magnéticos podrían producir las malformaciones congénitas o enfermedades ya sea de tipo cancerígena, cerebral, o alteraciones del comportamiento humano. Sin embargo, es importante ser conscientes de la existencia de estos campos y de la contaminación que producen en nuestro alrededor, por lo que es mejor ser prudentes y evitar exponerse al máximo.

Hasta la fecha sólo se tienen hipótesis de trabajos, sujetos a estudio y comprobación, o estudios estadísticos en los cuales no se ha tenido en cuenta otros factores a los cuales las personas estudiadas podrían estar expuestas como sustancias químicas o gases tóxicos en su sitio de trabajo, pero hay que tener en cuenta que tampoco se ha demostrado que los campos magnéticos sean beneficiosos para el cuerpo humano; en general los medios de información tratan de exagerar las consecuencias, aunque los físicos señalan que las ondas de los campos magnéticos de frecuencia extremadamente baja son de tan bajo contenido energético que difícilmente podrían afectar la estructura biológica.

Entre los aspectos teóricos encontramos que la efectividad del blindaje se da en decibeles (dB), la efectividad de un material que se usa como blindaje magnético expresa la capacidad que tiene dicho material para atenuar las ondas de campo magnético hasta el punto de no interferir en los equipos que protegen, y esto se hace con el fin de escoger el material más adecuado, pero cuando tenemos físicamente instalado el blindaje, también se puede calcular la efectividad con la siguiente fórmula, $S = 20 \log (H_0/H_1)$, siendo H_0 y H_1 el valor del campo sin el blindaje y con el blindaje respectivamente, y de esta forma se obtiene el valor real de efectividad del blindaje y si cumple con la función prevista.

Otro aspecto importante es que a pesar que la norma exige que los equipos que se usan para medir campos magnéticos deben ser triaxiales, se usó un Gaussímetro monoaxial, pero al final en las mediciones solo interesaba encontrar el mayor valor de campo magnético para efectuar nuestros cálculos y sacar consideraciones con respecto a la salud. Para futuras investigaciones se recomienda el uso de medidores de campo magnético con sonda triaxial, cilíndrica, calibrado correctamente y tomar todas las precauciones que indica la norma IEEE 644-1994.

BIBLIOGRAFÍA

RAYMOND A. SERWAY. Física Tomo II, Cuarta edición. Mexico. McGraw HILL. 1997.

WILLIAM H. HAYT Y JACK E. KENMERLY. Análisis de Circuito en Ingeniería. Quinta Edición. McGraw HILL. 1997.

JOSEPH BALCELLS Y FRANCESC DAURA. Interferencias Electromagnéticas en Sistemas Eléctricos. Alfaomega Marcombo. 1992.

ANSI, IEEE Standard "Procedure for measurement of power frequency electric and magnetic field from AC power lines", ANSI-IEEE Std 644-1994, 1994.

IEC, "Measurement of low frequency magnetic and electric field with regard to exposure of human beings- Special requirements for instruments and guidance for measurements", IEC 61786, 1998.

Medida de emisiones electromagnéticas en buques oceanográficos. Universidad Politécnica de Cataluña.

<https://www-eel.upc.es/wwwdib/gcem/esp/investigacion.htm>

Blindaje y Apantallamiento.

http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/EMC/trabajos_01_02/blindajes_apantallamientos/Principal.htm.

FEYCHTING, M. y AHLBOM, A.: "Magnetic fields and cancer in children residing near Swedish high-voltage Power lines" *American Journal Epidemiology*, nº 7, pág 467-481. 1993.

Campos Electromagnéticos y Salud Humana. Autor: Dr. Orlando Morales Matamoros.

<http://www.edyd.com/omorales/index.html>.

Estándar del IEEE sobre métodos de medida de intensidad de campo electromagnético de ondas sinusoidales continuas de entre 30Hz y 30GHz .

http://catedra-coitt.euitt.upm.es/web_salud_medioamb/normativas/ieee/291.pdf

ANEXOS

ANEXO A

16 Copyright © 1995 IEEE All Rights Reserved

1. Medidores de campo magnético

1.1. Características generales de medidores de campo magnético

Los medidores de campo magnético consisten de dos partes, la sonda o elemento sensante de campo, y el detector, el cual procesa las señales de la sonda e indica el valor rms del campo magnético mediante un display análogo o digital. La sonda de campo magnético, consiste de una bobina con hilos blindados eléctricamente, esta se usa en combinación con un voltímetro como detector para inspeccionar medidas del tipo de frecuencia de campos magnéticos de líneas de potencia. También es posible utilizar tres bobinas orientadas ortogonalmente para medir simultáneamente los valores rms de las tres componentes espaciales y combinarlas para dar el resultado del campo magnético. Los medidores de campo magnético miden la componente oscilatoria (linealmente polarizada) o la rotativa (elípticamente o circularmente polarizada) del vector del campo que es perpendicular al área de la sonda.

Los Gaussímetros de efecto Hall que pueden medir densidades de flujo magnético de dc a varios cientos de Hertz son otra clase de dispositivos disponibles.

Sin embargo, las sondas de campo magnético mediante efecto Hall responden a la densidad de flujo total. Esto se debe a su baja sensibilidad y problemas de saturación del campo de la tierra, raras veces han sido usados para líneas de potencia. Por lo tanto no serán considerados aquí.

Hay muy pocos mecanismos para perturbaciones de campos magnéticos y errores en la medida cuando se compara con casos de campos eléctricos. La instrumentación considerada aquí consiste de una sonda en forma de bobina blindada y un detector blindado con un cable de conexión blindado también. La sonda puede ser sostenida con un guante dieléctrico corto sin que se afecte seriamente la medida. Los efectos de proximidad de dieléctricos y conductores no magnéticos pobres, son en general, insignificantes.

1.2. Teoría y características de operación

El principio de operación de una sonda de campo magnético del tipo bobina toma ventaja de la ley de Faraday (en forma diferencial)

$$\nabla \times \vec{E} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Usando el teorema de Stokes, se puede escribir como:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t}(BA)$$

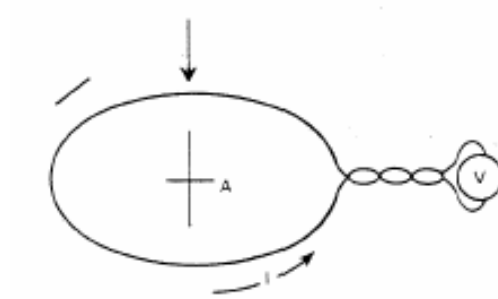
donde la integral en la izquierda es la integral de línea a lo largo de la curva que encierra la superficie de área A. Si la trayectoria de la integral es tomada como un lazo cerrado de un conductor de área A, y B es un campo uniforme cuasiestáticamente normal al área A, la integral lineal puede ser considerada como el voltaje, V, desarrollado en los extremos del lazo en respuesta al flujo magnético cambiante con el tiempo BA. Esto es:

$$V = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t}(BA)$$

y de la figura 1

$$V = -\omega B_0 A \cos \omega t$$

Figura 1

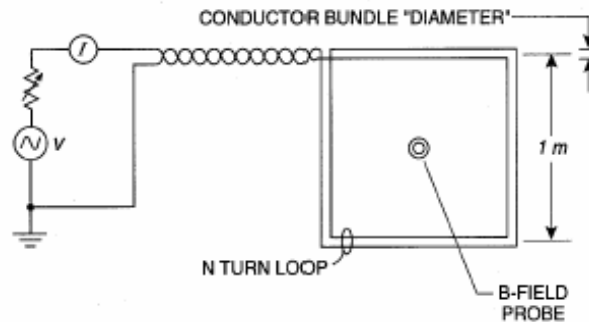


1.3. Calibración de medidores de campo magnético

1.3.1. Procedimiento de calibración

El medidor de campo magnético debe ser calibrado periódicamente con una frecuencia que es dependiente en parte de la estabilidad del medidor. La sonda de campo magnético debe ser localizada en el centro de un lazo simple con el plano de prueba coincidente con el del lazo. La figura 2 muestra una vista del esquema de la sonda, el lazo y el aparato asociado.

Figura 2



Las dimensiones del lazo deben ser al menos de 1 m x 1 m para una sonda con 10 cm de diámetro. El lazo puede ser escalado hacia arriba o hacia abajo para sondas más largas o más pequeñas, respectivamente, para mantener un nivel de uniformidad a través de la sonda. Es importante notar que la calibración del campo puede ser generado con otros sistemas de bobina que provean una uniformidad comparable que sea obtenible.

Debe hacerse una grafica de los valores de campo magnético calculados en el centro del lazo versus la corriente aplicada al lazo. Se debe indicar la incertidumbre en el calculo de campo magnético mediante un punto representativo con una barra vertical de error. Esta barra de error representa la incertidumbre en la medida de la corriente, en las dimensiones del lazo de calibración y en la no-uniformidad del campo ($<0.5\%$ para sonda de 10 cm), y debe ser menor a $\pm 3\%$.

Los medidores de campo con capacidad de autorango deben ser calibrados en cada rango no menos de tres puntos representativos que abarcan todo el rango. En los rangos más sensibles, uno de los puntos de calibración debe ser el 10% del máximo valor para el rango. En los rangos menos sensibles, uno de los puntos de calibración debe ser el 90% del máximo valor para el rango. La máxima medida de campo debe ocurrir cuando el eje de la sonda es rotada a $\pm 10\%$ del eje del lazo (eje z), y el máximo valor debe estar en la región aceptable de lecturas de campo. Las perturbaciones de la calibración pueden ocurrir debido a materiales ferromagnéticos próximos al lazo de calibración.

La temperatura y la humedad deben ser tomadas al momento de la calibración para permitir correcciones para estos parámetros si es necesario.

1.4. Inmunidad a interferencias

Las perturbaciones en la operación del medidor de campo magnético se deben a niveles anticipados de fuerzas de campos eléctricos ambientales bajo las líneas de potencia que deben ser cuantificadas por el fabricante y suministrada al usuario. Estas perturbaciones, expresadas en porcentaje, deben ser incorporadas a los reportes de medida si son significantes.

1.5. Parámetros que afectan la exactitud en la medida de campos magnéticos

El posicionamiento de la sonda, errores en la lectura, efectos de proximidad del observador u objetos, filtración eléctrica en el manejo de la sonda y la no-uniformidad del campo producen impactos por negligencia. Por otro lado, el escudo eléctrico de la sonda es esencial para evitar corrientes inducidas por campos eléctricos en el ambiente.

Los efectos de temperatura en el detector y el movimiento desbalanceado del medidor pueden ser posibles fuentes de incertidumbre.

ANEXO B

1. Especificaciones técnicas de equipos de medida

1.1. Gaussimetro

RANGO			RESOLUCION		
GAUSS	TESLA	Am	GAUSS	TESLA	Am
200 G	20 mT	16 kAm	0.1 G	0.01 mT	0.01 kAm
2 kG	200 mT	159 kAm	1 G	0.1mT	0.1 kAm
20 kG	2 T	1591 kAm	10 G	1 mT	1 kAm

Exactitud (Incluye la sonda):

Modo dc: $\pm 2\%$ de la lectura

Modo ac: $\pm 3.5\%$ de la lectura (20 – 10000 Hz)

Exactitud con cambio de temperatura: $\pm 0.02\% / ^\circ\text{C}$

Blindaje de sonda contra campos magnéticos externos: 80 dB a 30 mT (300G)

1.2. Osciloscopio

EJE VERTICAL	
Sensibilidad	1 mV – 5 V/DIV
Exactitud	5 mV – 5 V/DIV \leq 3%, 1 mV – 2 mV/DIV \leq 5%
Frecuencia de ancho de banda	5 mV – 5 V/DIV – 20 MHz
Tiempo de crecimiento	5 mV – 5 V/DIV – 17.5 nseg
Impedancia de entrada	1 M ohm \pm 2%

EJE HORIZONTAL	
Tiempo de recorrido	0.1 μ seg – 0.5 seg/DIV
Exactitud	\pm 3%