



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA ELÉCTRICA – TELECOMUNICACIONES

SIMULACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE UNA ANTENA LOOP CUADRADA A
12 MHZ PARA VERIFICACIÓN DE BLINDAJE ELECTROMAGNÉTICO DE
BAJO CAMPO.

TESINA
PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

PRESENTA:
ING. CARLOS RAFAEL POLLÁN MEDEL

TUTORA PRINCIPAL
DRA.FATIMA MOUMTADI
FACULTAD DE INGENIERÍA

Ciudad de México, mayo del 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

PENSAMIENTO

“ Un viaje de mil millas empieza con un primer paso ”.

Benjamin Franklin

JURADO ASIGNADO

Presidente: Dr. Gómez Castellanos Javier

Secretario: Dr. Martynyuk Oleksandr

1er. Vocal: Dra. Moumtadi Fátima

2do. Vocal: Dr. Ceballos Herrera Daniel Enrique

3er. Vocal: Dr. Matías Maruri José María

TUTORA DE TESIS:

Dra. Fatima Moumtadi

AGRADECIMIENTOS

A mi familia que siempre cree en mí en todos los momentos de mi vida profesional y personal.

A mis hijos Carlos Alejandro y Helen porque son mi motor, mi motivación, mi fuerza, mi alma.

A mi madre Norma Medel, que me formó como el hombre que soy, la vida me queda corta para regresarte todo lo que has hecho por mí.

A mi esposa Susana Cruz, por ser ese apoyo incondicional en mis días más grises. Por darme las fuerzas para seguir adelante, por darme tu amor puro y lindo.

A mi tutora Fatima Moumtadi por preocuparse en cada detalle de este trabajo, por darme guía y esperanzas para la culminación del mismo.

A mis amigos todos, por ser constantes y eternos.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por acogerme y convertirme en un mejor profesional.

A todos mis profesores de este excepcional Posgrado que compartieron su tiempo, paciencia y conocimientos para prepararme para el futuro.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico otorgado para poder realizar la Maestría.

Quiero dar mis más sinceros agradecimientos a todas las personas que de una forma u otra contribuyeron a la realización de este trabajo de investigación.

A todos

!!!!GRACIAS!!!!

RESUMEN

Esta tesina de investigación surge por la necesidad de descubrir las fallas de los blindajes electromagnéticos que protegen los equipos de Resonancia Magnética (RM). Dichas fallas causan que haya interferencias sobre estos equipos por lo que puede existir un funcionamiento incorrecto desde el punto de vista de interferencia electromagnética y pueden ofrecer resultados erróneos de diagnósticos. En este trabajo se realiza un estudio de las antenas loops y sus usos en las mediciones de campos magnéticos, así como los métodos y formas de evaluar un blindaje electromagnético según los estándares internacionales, además se analizan los métodos que usan las empresas que ofrecen dicho servicio. Para lograr este objetivo se propone la simulación y construcción de una antena magnética loop cuadrada, para enviar y recibir (otra antena con las mismas características que la transmisora) ondas de radio frecuencia (RF) a una frecuencia de 12 MHz, con el objetivo de evaluar el blindaje electromagnético de una sala de Imagenología por Resonancia Magnética (IRM) de 0.25 Teslas a 0.30 Teslas.

Para el diseño de la antena se utiliza el software de simulación CST Studio 2018. Mediante este programa se simulan 5 antenas loops cuadradas con diferentes dimensiones, para determinar cuál de ellas ofrece mejores resultados y seleccionar el tamaño correcto para su construcción. Una vez conocida la parte real y la parte imaginaria de la impedancia de la antena, se calcula el condensador necesario para obtener una antena resonante a la frecuencia deseada y el circuito de acople de impedancia para adaptarla a 50Ω . La antena se caracteriza en cuanto a frecuencia de resonancia, potencia de radiación, eficiencia, ganancia y patrón de radiación. Una vez realizadas las simulaciones deseadas se construyen las antenas usando un conductor de aluminio macizo de 8 mm de diámetro, dándole forma de loop cuadrado con un corte de 4 cm en el medio de uno de sus lados para la alimentación.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	9
Objetivo General	9
Objetivos Específicos	9
Motivación	9
Método.....	10
Antecedentes	11
CAPÍTULO 1. ANTENAS. LOOP CUADRADO	14
1.1 Definición de Antena.	14
1.2 Antenas Loops	15
1.2.1 Parámetros de radiación de un loop	16
1.2.2 Potencia radiada.	17
1.2.3 Resistencia de radiación	18
1.2.4 Resistencia de pérdida.....	18
1.2.5 Intensidad de radiación y directividad	19
1.2.6 Impedancia de entrada y circuito equivalente.	20
1.2.7 Capacitancia de resonancia	23
1.2.8 Zonas de radiación.....	24
CAPÍTULO 2. BLINDAJE ELECTROMAGNÉTICO EN IRM.....	26
2.1 Definición de blindaje electromagnético.	26
2.2 Tipos de blindajes	27
2.2.1 Sistemas de Blindajes Activos.	27
2.2.2 Sistemas de Blindajes Pasivos.	27
2.3 Efectividad de blindaje.....	28
2.4 Blindaje en salas de resonancia magnética.	30
2.5 Resonancia Magnética.	31
2.5.1 Funcionamiento.....	32
2.5.2 Resonancia magnética de bajo campo.	32
2.6 Verificación de blindaje electromagnético.	34
2.6.1 Fuente para medir aislamiento de cajas blindadas de RF.....	35
2.6.2 Analizador de prueba de blindaje de mano (JRE STA-1).....	36

2.6.3 Conjunto de verificación de prueba TVK.....	36
2.6.4 Sistema de medición de efectividad del blindaje.....	38
2.7 Estándares internacionales	39
2.7.1 Estándar MIL-STD 285.....	39
2.7.2 Estándar IEEE Std-299	40
2.7.3 Estándar EN 50147-1.....	43
2.7.4 Estándar NSA 94-106	45
CAPÍTULO 3: DISEÑO DE LAS ANTENAS LOOPS CUADRADAS.....	47
3.1 Simulación en el CST Studio Suite.....	48
3.1.2 Carta de Smith	50
3.2 Construcción de las antenas	53
3.2.1 Acoplamiento de Impedancia.....	56
3.2.2 Circuito de Matching.	57
CONCLUSIONES.....	64
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	65

INTRODUCCIÓN

Objetivo General

Simulación y construcción de una antena loop cuadrada sintonizada a una frecuencia de 12 MHz, para un sistema de verificación de blindaje electromagnético en salas de Resonancia Magnética de bajo campo.

Objetivos Específicos

- Construir la estructura de la antena, sintonizada a 12 MHz, apoyados en el software de simulación CST Studio 2018.
- Sintonizar y acoplar la impedancia de línea de corriente balanceadas (antena) a líneas de transmisión desbalanceadas (cable coaxial).

Motivación

Actualmente vivimos en un mar invisible de actividad electromagnética, tanto las creadas por el hombre como las producidas por fuentes naturales. El campo magnético terrestre, los rayos y las emisiones del espacio exterior son fuentes naturales. Teléfonos, comunicaciones por radio, microondas, radares y todo tipo de equipos eléctricos son ejemplos de fuentes construidas por el hombre. Todos los componentes electrónicos producidos en la actualidad deben ser compatibles electromagnéticamente con este entorno, y deben someterse a pruebas de compatibilidad electromagnética [1]. Los equipos médicos no están exentos de este fenómeno de interferencia electromagnética, por lo que es necesario un blindaje electromagnético que los proteja de este ambiente contaminante.

Para contrarrestar esto, se requiere que los equipos estén inmersos en un blindaje electromagnético (Jaula de Faraday) que pueda atenuar adecuadamente las fuentes potenciales de degradación de la imagen en RM. Para lograr esta protección electromagnética se utilizan varios materiales como cobre y madera para cubrir todas las áreas deseadas y de esta manera evitar el ingreso de ondas electromagnéticas [26].

En años recientes ha sido de particular interés el empleo de la IRM de bajo campo debido a prestaciones como: comodidad a los pacientes, acceso no restringido por volumen, protocolos de investigación, costo menor de instalación y de mantenimiento [3], entre otros. Por lo anterior, y dado el incremento de estos sistemas a nivel nacional, es necesario el desarrollo de herramientas para evaluar el correcto funcionamiento de dichos sistemas. Actualmente existen muchas empresas en todo el mundo que ofrecen servicios de creación y verificación de blindajes electromagnéticos. Otras simplemente venden el equipamiento necesario para el proceso de verificación. Generalmente la contratación de un personal capacitado con equipos especializados para esta tarea, así como la compra de los equipos para esta finalidad supone un costo elevado para cualquier entidad. En su mayoría, las empresas que prestan los servicios de blindaje lo hacen para altas frecuencias pues son las frecuencias que corresponden a IMR de alto campo. Además, todos los estándares internacionales y las empresas dedicadas a la comprobación de blindaje proponen para la verificación antenas loops circulares. Por eso se plantea trabajar la verificación de blindaje a los 12 MHz con antenas loops cuadradas, como una alternativa funcional, por lo que se convierte en la principal motivación de este trabajo.

Método

Este trabajo de tesis se va a desarrollar en dos etapas:

En la primera etapa se estudiará acerca de las antenas, enfocando especial atención a las antenas loops cuadradas, caracterizándolas en varios parámetros. También se realizará una búsqueda profunda acerca de los blindajes electromagnéticos, las formas de realizarlo, empresas que certifican blindaje, tipos de blindajes y las formas de verificar dicho blindaje. Posteriormente se analizarán los estándares que rigen la verificación de blindaje, así como métodos y equipos que se usan con dicha finalidad.

En una segunda etapa, se utilizará el software de simulación CST Studio 2018 para observar el comportamiento de las antenas loops cuadradas según sus dimensiones y así poder seleccionar el tamaño que ofrezca mejor desempeño. De esta manera tener suficientes datos para caracterizar dichas antenas en varios parámetros de interés.

Una vez determinada la forma y dimensiones de los transductores, se procederá a construir las antenas que se utilizarán como parte de un sistema para la verificación del blindaje en salas de IRM, tal como se muestra en la figura 1, teniendo en cuenta frecuencia de resonancia, patrón de radiación y distancia entre las dos antenas (transmisora y receptora). El material conductor con el cual se trabajará para la construcción de las antenas será aluminio macizo de 8 mm de diámetro y se medirán los parámetros utilizando un analizador de redes. Una vez hechas las antenas se comenzarán a realizar ajustes para lograr un acoplamiento de impedancias y lograr que las antenas se sintonicen a la frecuencia deseada. Eliminando la parte reactiva de la impedancia de entrada de la antena podemos lograr que la misma resuene los 12 MHz que es la frecuencia deseada.

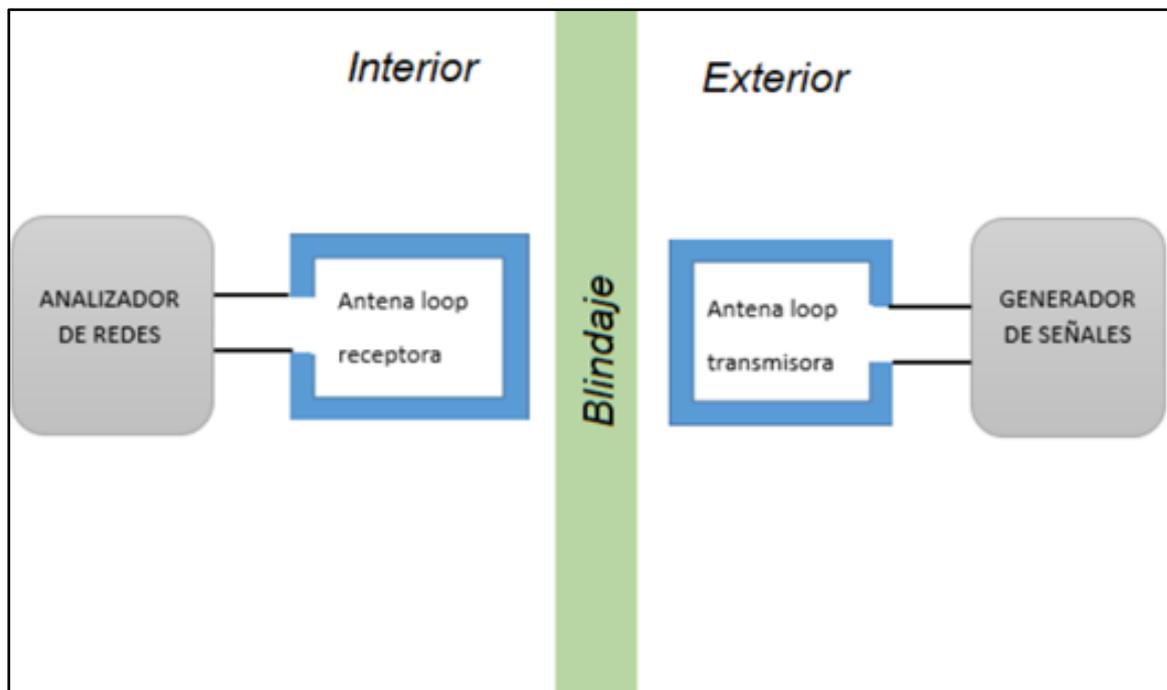


Figura 1: Sistema de Verificación de blindaje con antenas loops cuadradas.

Antecedentes

Durante la Segunda Guerra Mundial, el Departamento de Defensa de EUA (DoD) compró cajas blindadas para alojar sus equipos eléctricos / electrónicos. Inicialmente utilizaron lana de acero para sellar las costuras de los recintos cuando no cumplieron con sus requisitos de protección. La lana de acero se oxidó casi de inmediato y el Departamento de Defensa se convirtió en una compañía (Metal Textile) para obtener

alambre tejido para sellar las costuras con fugas. Metal Textile Company cambió su nombre a Metex. Varios empleados de la compañía Metex se fueron y formaron Tecknit. Así se formaron los primeros 2 fabricantes de juntas EMI. Ambas empresas utilizaron MIL-STD-285 para calificar sus productos [4].

Dichas empresas seguían el mismo procedimiento para medir la efectividad del blindaje, el mismo consistía en hacer una primera medición en el espacio libre entre las antenas transmisora y receptora, dicha medición se registraba y se efectuaba otra, pero de frente a un orificio del blindaje con una separación de ambas antenas de 1 m. La antena la receptora afuera del recinto y la transmisora dentro. La diferencia entre las dos mediciones es lo que se denomina efectividad del blindaje [4]. A partir de la década de 1950 comenzaron a emitirse nuevos estándares, a redefinirse otros y comenzó toda una carrera por obtener el mejor método de verificación de blindaje electromagnético. Entre los estándares más conocidos están:

- MIL-STD-285
- MIL-STD-285 redefinido por la comunidad de ingeniería de diseño.
- SAE, ARP-1173
- SAE, ARP-1705 Rev. B
- MIL-G-83528C
- IEEE Std 299-1997.
- EN 50147-1
- NSA 94-106

En Estados Unidos a finales de 1984 se publicó un reporte científico donde se utilizan antenas bicónicas como la EMCO 3104 (Tx) y la EMCO 3108 (Rx) para medir la atenuación de las frecuencias entre 20 MHz y 100 MHz, con el fin de verificar el blindaje electromagnético de una sala blindada. Las antenas se separan a 1m de distancia, una dentro del recinto y la otra afuera. Se utiliza un generador de señales para alimentar la antena Tx y como equipo receptor un analizador de espectros para mostrar la señal recibida. Este estudio también plantea el uso de otra antena (loop LP-105), espaciadas a 1m y 0.229 m (mejores resultados), con el objetivo común de verificar el blindaje; las

mediciones se realizan en varios puntos alrededor de la sala, donde se obtuvo una atenuación de 60 dB de la señal [5].

CAPÍTULO 1. ANTENAS. LOOP CUADRADO

1.1 Definición de Antena.

El uso de las antenas por el hombre ha ido en ascenso desde su invención hasta la actualidad. Hoy día forman parte de nuestra vida cotidiana en innumerables aplicaciones en dispositivos inalámbricos como impresoras, mouses, micrófonos, sensores, audífonos, etc. Podemos encontrar antenas de tamaños que varían desde centímetros (telefonía celular), hasta cientos de metros (observación astronómica). Las telecomunicaciones utilizan las antenas para un sinnúmero de aplicaciones, que van desde Access Points (Puntos de Accesos), routers, dispositivos IoT para ofrecer conexión Wifi, hasta establecer enlaces peer to peer (punto a punto) y la radiodifusión. Se utilizan en la radio, televisión, teléfonos móviles, routers inalámbricos, mandos remotos, etc., unas veces visibles y otras ocultas en el interior del propio dispositivo.

Existen varias definiciones de antena, entre las más conocidas se encuentra la expresada por la IEEE que plantea: “aquella parte de un sistema transmisor o receptor diseñada específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas” [6]. Otra definición según el Webster’s Dictionary: “es usualmente un dispositivo metálico (como una barra o un alambre) para radiar o recibir ondas de radio”. Según estas definiciones una antena es un conductor metálico que se convierte en un dispositivo radiante que emite y recibe ondas de radio. Una antena transmisora transforma energía eléctrica en ondas electromagnéticas, y una receptora realiza la función inversa, entonces podemos decir que la antena es un medio de transición entre una onda guiada y el espacio libre como se muestra en la figura 1.1 [7] y viceversa.

Se pueden clasificar dependiendo de varios factores como su geometría, su organización, sus características, su comportamiento, etc. Existen muchos tipos de antenas, varían de acuerdo a su forma y a su uso, o a lo que van a ser destinadas. Pueden ser redondas o cuadradas, pequeñas, largas o gigantescas. Pueden ser omnidireccionales cuando se requiera que la señal se radie en todas las direcciones, o en algunos casos direccionales cuando solo se desea enviar la señal en una dirección específica. Algunos ejemplos de las antenas más conocidas son: antenas de cable o hilo; antenas de aperturas o bocinas; antenas microstrip; antenas parabólicas; antenas de lentes, etc. [8]

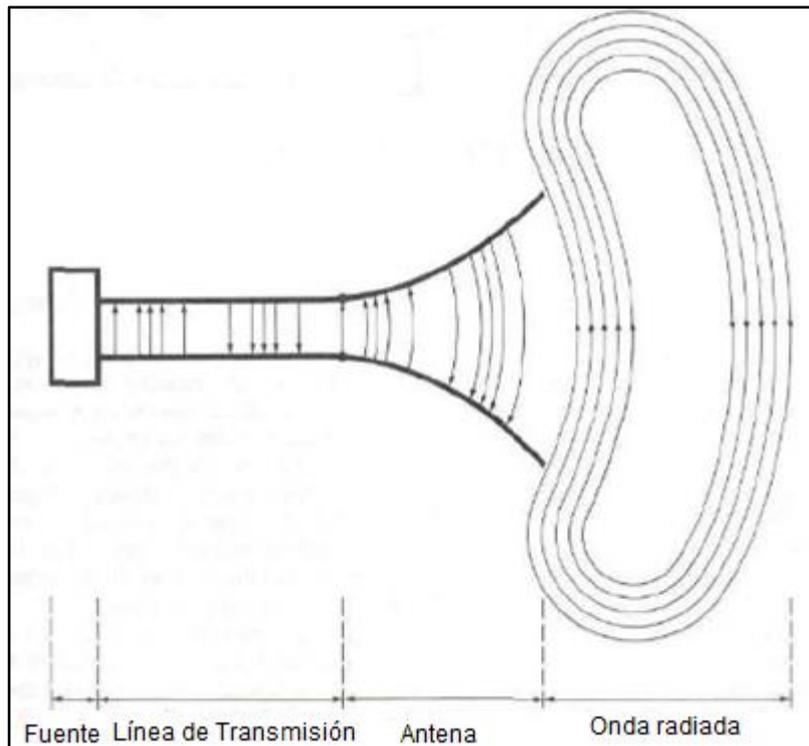


Figura 1.1: Antena como medio de transición [7].

1.2 Antenas Loops

Según todos los estándares de verificación electromagnética y estudios realizados para la medición de campo magnético, todos determinan que la antena loop ofrece resultados excelentes en este sentido. Dicha antena puede ser construida de forma muy sencilla y de materiales que están al alcance de todos, lo cual la hace una antena muy atractiva para este trabajo de investigación. Las antenas loops pueden tener varios diseños, como un rectángulo, un cuadrado, un triángulo, una elipse, un círculo, etc. La figura 1.2 muestra varios ejemplos de la antena mencionada. *“Debido a la simplicidad en el análisis y la construcción, el loop circular es el más popular y ha recibido la mayor atención. Se ha demostrado que un loop pequeño (circular o cuadrado) es equivalente a un dipolo magnético infinitesimal cuyo eje es perpendicular al plano del loop. Es decir, los campos radiados por un loop circular o cuadrado eléctricamente pequeño son de la misma forma matemática que los radiados por un dipolo magnético infinitesimal”* [7].

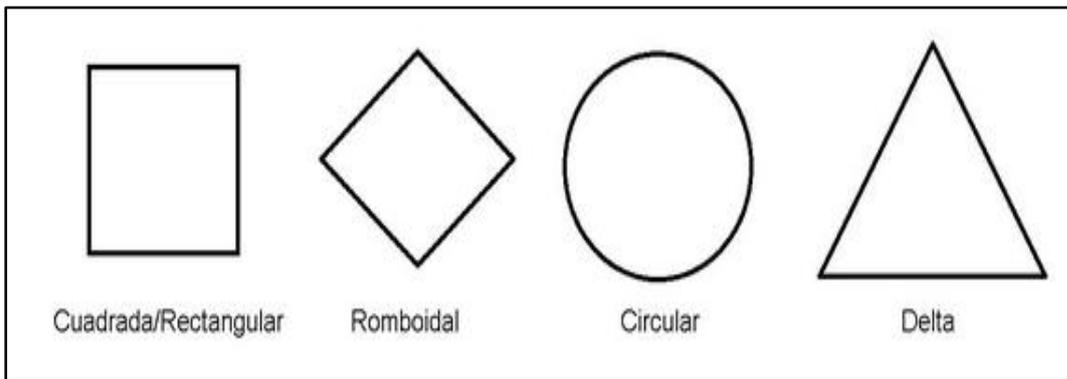


Figura 1.2: Tipos de antenas loops.

Las antenas loops generalmente se clasifican como eléctricamente pequeñas, que son aquellas cuya longitud total de la circunferencia (perímetro) suele ser inferior a aproximadamente una décima parte de una longitud de onda ($C < 0.1\lambda$) y eléctricamente grandes son aquellas cuya circunferencia es aproximadamente una longitud de onda de espacio libre ($C \sim \lambda$).

Los circuitos eléctricamente pequeños de una sola vuelta tienen una resistencia de radiación muy pequeña (comparable a su resistencia de pérdida). La resistencia de radiación se puede aumentar agregando más vueltas, aumentando su circunferencia o perímetro y/o agregando un núcleo ferromagnético de alta permeabilidad que elevará la intensidad del campo magnético y, por lo tanto, la resistencia de radiación [9]. Los loops de múltiples vueltas tienen una mejor resistencia de radiación, pero su eficiencia sigue siendo muy pobre, por lo que se usan predominantemente como antenas receptoras, donde las pérdidas no son tan importantes.

1.2.1 Parámetros de radiación de un loop

Las antenas loop también se usan como sondas para mediciones de campo magnético y como antenas direccionales para navegación de ondas de radio. El patrón de campo de antenas eléctricamente pequeñas de cualquier forma (circular, elíptica, rectangular, cuadrada, etc.) es similar al de un dipolo infinitesimal con un nulo perpendicular al plano del loop y con su máximo a lo largo del plano del loop. A medida que aumenta la longitud total del loop y su circunferencia (perímetro) se acerca a una longitud de onda de espacio libre, la distribución de corriente deja de ser uniforme y el patrón de radiación cambia y deja de ser omnidireccional. Se puede decir que para fines de análisis el loop puede

reemplazarse por un dipolo magnético lineal de corriente constante. Existe una diferencia entre ellos: para el dipolo, su densidad de potencia radiada en el campo cercano es capacitiva y para el loop es inductiva [7].

1.2.2 Potencia radiada.

La potencia entregada a una antena es la suma de la potencia radiada y las pérdidas que se produzcan en la misma. Para llegar a la fórmula de la densidad de potencia radiada, se parte de tener los campos magnéticos y eléctricos radiados por la antena loop, los cuales se pueden obtener en [7]. Los campos son:

$$Hr = j \frac{ka^2 I_0 \cos\theta}{2r^2} \left[1 + \frac{1}{jkr} \right] e^{-jkr} \quad (1.1)$$

$$E_\phi = \eta \frac{(ka)^2 I_0 \sin\theta}{4r} \left[1 + \frac{1}{jkr} \right] e^{-jkr} \quad (1.2)$$

Donde:

E_ϕ = campo eléctrico radiado por un loop

Hr = campo magnético radiado por un loop

r = radio del loop

a = lado del loop

Luego se obtiene la densidad de potencia compleja, la cual se integra sobre una esfera cerrada, solo su componente radial, así obtenemos la siguiente ecuación:

$$Pr = \iint W \cdot ds = \eta \frac{(ka)^4}{32} |I_0|^2 \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \left[1 + j \frac{1}{(kr)^3} \right] \sin^3\theta d\theta d\phi \quad (1.3)$$

Una vez integrada y reducida queda de la siguiente manera:

$$Pr = \eta \left(\frac{\pi}{12} \right) (ka)^4 |I_0|^2 \left[1 + j \frac{1}{(kr)^3} \right] \quad (1.4)$$

Tomando solo la parte real de la misma, que es la potencia de radiación de un loop cuadrado y viene dada por la siguiente ecuación:

$$Prad = \eta \left(\frac{\pi}{12} \right) (ka)^4 |I_0|^2 \quad (1.5)$$

Para valores pequeños de kr ($kr \ll 1$), el segundo término dentro de los corchetes en (1.4) es dominante, lo que hace que la potencia sea principalmente reactiva. En el campo lejano ($kr \gg 1$), disminuye el segundo término entre corchetes, lo que hace que la potencia sea

real. Podemos llegar a la conclusión que mientras para el dipolo infinitesimal la densidad de potencia radial en el campo cercano es capacitiva, para el loop pequeño es inductiva [7].

1.2.3 Resistencia de radiación

La resistencia de radiación permite que la antena radie al medio las ondas electromagnéticas y no se pierdan en forma de calor o sean devueltas al generador. Podemos obtener la expresión de la resistencia de radiación igualando la ecuación (1.5) al término $|I_0|^2 R_r/2$. Concretamente, la resistencia de radiación de un loop es:

$$R_r = \eta \frac{\pi}{6} (k^2 a^2)^2 = \eta \frac{2\pi}{3} \left(\frac{kS}{\lambda}\right)^2 = 20\pi^2 \left(\frac{C}{\lambda}\right)^4 \simeq 31,171 \left(\frac{S^2}{\lambda^4}\right) \quad (1.6)$$

Donde:

S = área de la antena

C= perímetro de la antena

λ = longitud de onda

La expresión (1.6) es válida para loops de varias configuraciones, como rectangular, circular, elíptico, etc. [7]. Hay que tener en cuenta que esta resistencia es para antenas loop sencillas (una sola espira), si tuviera más vueltas se tendría que incluir un factor N^2 , donde N es la cantidad de vueltas y quedaría de la siguiente manera:

$$R_r = \eta \left(\frac{2\pi}{3}\right) \left(\frac{kS}{\lambda}\right)^2 N^2 = 20\pi^2 \left(\frac{C}{\lambda}\right)^4 N^2 \simeq 31,171 N^2 \left(\frac{S^2}{\lambda^4}\right) \quad (1.7)$$

Esta es una forma de aumentar la resistencia de radiación y así aumentar la potencia radiada pero también aumenta las pérdidas. Los loops eléctricamente grandes se utilizan principalmente en matrices direccionales, como antenas helicoidales, matrices Yagi-Uda, matrices cuádruples.

1.2.4 Resistencia de pérdida

La resistencia de pérdida de un loop pequeño de una sola vuelta es, en general, mucho mayor que su resistencia de radiación, así la eficiencia de radiación correspondiente es muy baja y depende de la resistencia de pérdida. Por lo general, se supone que la resistencia de pérdida de un loop es igual a la resistencia de pérdida de un cable recto de

la misma longitud que el loop (circunferencia o perímetro) y de la misma distribución de corriente. Aunque esta suposición es adecuada para loops de una sola vuelta, no es válida para loops de varias vueltas. En un loop de varias vueltas, la corriente no se distribuye uniformemente alrededor del cable, sino que depende de la superficie y los efectos de proximidad [7]. En caso de una distribución de corriente uniforme, la resistencia de alta frecuencia se calcula como:

$$R_L = \frac{l}{p} R_S = \frac{l}{p} \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{2\sigma}} \quad (1.8)$$

R_L = resistencia de pérdidas

l : longitud del cable

p : perímetro de la sección transversal

R_s : resistencia de la superficie

ω = frecuencia angular

μ_0 : permeabilidad ($4\pi \cdot 10^{-7}$), en el espacio libre

σ : conductividad del material

1.2.5 Intensidad de radiación y directividad

Asociada a la potencia radiada P_{rad} (ecuación 1.5) hay una densidad de potencia media W_{av} . Esta tiene solo un componente radial W_r que está relacionado con la intensidad de radiación (U). La intensidad de radiación de un loop es la misma que la de un dipolo infinitesimal y viene dada por la siguiente expresión que se puede encontrar en [7]:

$$U = r^2 W_r = \frac{\eta}{2} \left(\frac{k^2 a^2}{4}\right)^2 |I_0|^2 \sin^2 \theta = \frac{r^2}{2\eta} |E_\phi(r, \theta, \phi)|^2 \quad (1.9)$$

El máximo valor de la intensidad se obtiene cuando $\theta = \frac{\pi}{2}$ y queda de la siguiente manera:

$$U_{\max} = U|_{\theta = \pi/2} = \frac{\eta}{2} \left(\frac{k^2 a^2}{4}\right)^2 |I_0|^2 \quad (1.10)$$

La directividad de una antena loop se puede obtener de igualar la ecuación anterior (1.10) y la (1.5) y quedaría expresada de la siguiente manera:

$$D_0 = 4\pi \frac{U_{\max}}{P_{\text{rad}}} = 3/2 \quad (1.11)$$

Podemos decir que la directividad de un loop pequeño es la misma que la de un dipolo eléctrico infinitesimal, pues sus patrones son idénticos [7]. La directividad (D) de una antena es una medida de la concentración de radiación en la dirección del máximo. El término ganancia está muy relacionado con la directividad de la antena, solo se diferencian en la eficiencia. [9].

1.2.6 Impedancia de entrada y circuito equivalente.

La impedancia de entrada de una antena se calcula teniendo en cuenta los coeficientes de reflexión en los bordes del terminal, los cuales se conectan a la línea de transmisión de impedancia característica conocida [10]. La impedancia de entrada de una antena se representa de la siguiente manera:

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (1.12)$$

Donde:

R_A = resistencia de la antena

X_A = reactancia de la antena

$X_A = R_r + R_l$

La impedancia puede representarse mediante un circuito equivalente de elementos agrupados similar al que se muestra en la figura 1.3.

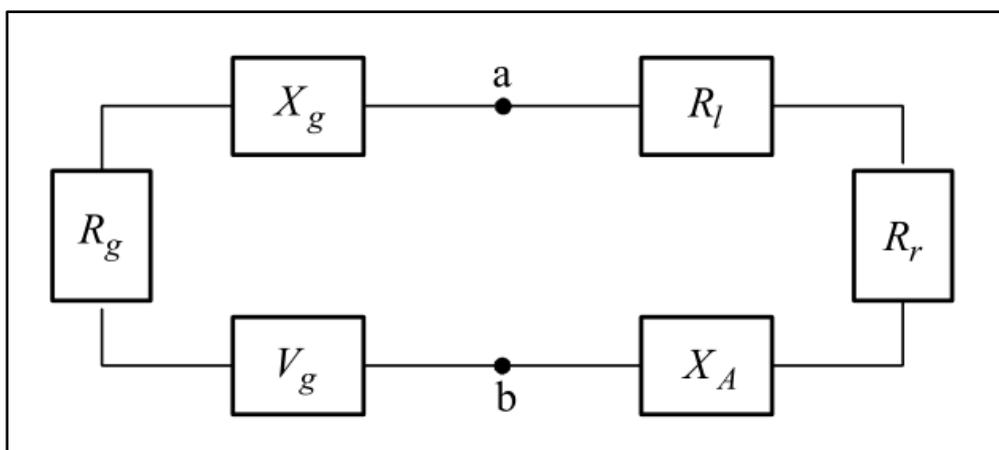


Figura 1.3: Circuito equivalente de una antena [10].

Donde:

Z_A = impedancia en los puntos a–b (Ω)
 R_A = resistencia en los puntos a–b (Ω)
 X_A = reactancia en los puntos a–b (Ω)
 R_g = resistencia del generador
 X_g = reactancia del generador

El circuito equivalente de un loop puede ser tanto para transmitir como para recibir. A continuación, se explicarán ambos modos:

Modo en transmisión:

“El circuito equivalente para la impedancia de entrada cuando el loop se usa como antena transmisora es el que se muestra en la figura 1.4. Su impedancia de entrada Z en está representada por [7]”:

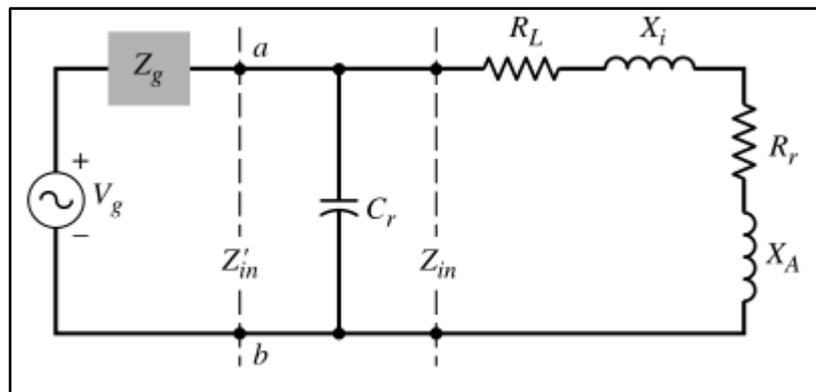


Figura 1.4: Circuito equivalente de una antena loop en modo Tx [7].

$$Z_{in} = R_{in} + j X_{in} = (R_r + R_L) + j (X_A + X_i) \quad (1.13)$$

C_r – capacitor de resonancia.

R_L - resistencia de pérdida de la antena loop.

R_r - resistencia de radiación.

X_A - reactancia inductiva externa del loop= ωL_A

X_i - reactancia interna de alta frecuencia del conductor del loop= ωL_i [7]

La impedancia de entrada de una antena depende de la frecuencia, por lo tanto, se corresponde con su carga en una determinada banda de frecuencia. También puede verse influenciado por la proximidad de los objetos. Las antenas cuyas dimensiones son menores que un décimo de su longitud de onda, presentan una reactancia-capacitiva o

reactancia-inductiva cuando sean dipolo/monopolo o una espira respectivamente, generalmente son malos radiadores pues tienen a una baja resistencia de radiación. Por esto es muy necesario conocer la inductancia que me genera el loop pues es muy necesario para cualquier ecuación de diseño. La reactancia inductiva (X_A) de un loop cuadrado se puede calcular usando la siguiente expresión, teniendo en cuenta que tenga lado (a) y radio del conductor (b) [7]:

$$L_A = 2\mu_0 \frac{a}{\pi} \left[\ln\left(\frac{a}{b}\right) - 0.774 \right] \quad (1.14)$$

La reactancia interna del conductor (X_i) de un loop cuadrado de una sola vuelta se puede encontrar usando la inductancia interna L_i del loop y se puede aproximar a [7]:

$$L_i = \frac{4a}{2\pi bw} \sqrt{\frac{w\mu_0}{2\sigma}} \quad (1.15)$$

l : longitud del loop

P: perímetro del loop

σ : conductividad del material

Modo en recepción:

“Los loops se usan a menudo como antena receptora o como sonda para medir la densidad de flujo magnético. Por lo tanto, cuando una onda plana incide sobre ella, como se muestra en la figura 1.5, se desarrolla un voltaje de circuito abierto en sus terminales” [7].

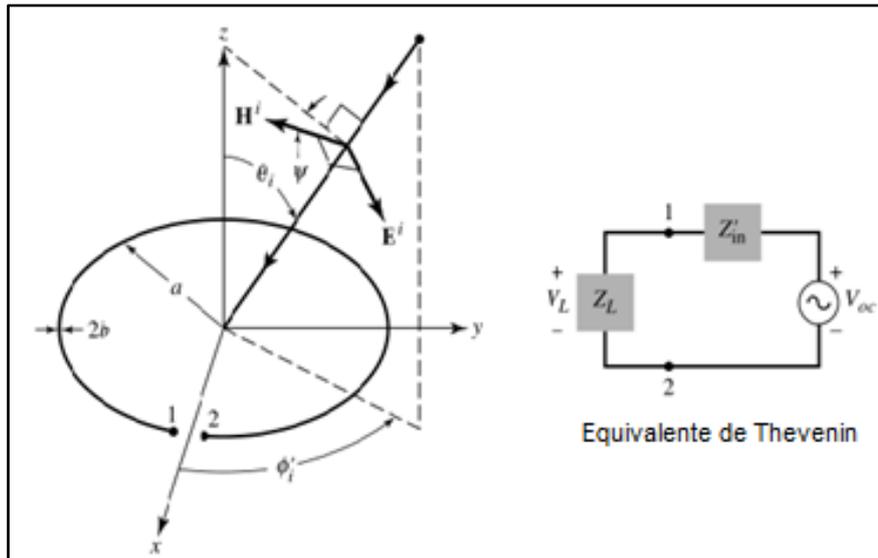


Figura 1.5: Circuito equivalente de una antena loop en modo Rx [7].

1.2.7 Capacitancia de resonancia

Existe un componente imaginario en la impedancia de entrada de una antena que aumenta las pérdidas de desajuste incluso si la parte real tiene el mismo valor que un cable (línea de Tx) sin pérdidas. Sin embargo, el componente imaginario siempre puede, al menos en principio, eliminarse conectando un elemento reactivo (capacitivo o inductivo) a través de los terminales del loop para hacer que la antena sea un circuito resonante. Por eso para el cálculo de la capacitancia se parte de la siguiente fórmula:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1.16)$$

Despejando C de la fórmula y considerando que $\omega = 2\pi f$ quedaría de la forma siguiente:

$$C = \frac{1}{\omega^2 L} \quad (1.17)$$

De esta manera podemos eliminar la parte reactiva del loop y tener solo la parte real y así poder tener un mejor desempeño de nuestra antena.

1.2.8 Zonas de radiación

“Las características de los campos eléctrico y magnético están dadas por la fuente y el medio en el que se encuentra, y la distancia entre la fuente y el punto de observación. Si el punto está muy cercano a la fuente, las propiedades de los campos dependen básicamente de la fuente. Si el punto está muy alejado de la fuente, entonces las propiedades de los campos dependen principalmente de su medio de propagación” [1]. Existen varias zonas de radiación según muestra la figura 1.6, en dependencia de la distancia del elemento radiante a un punto de observación.

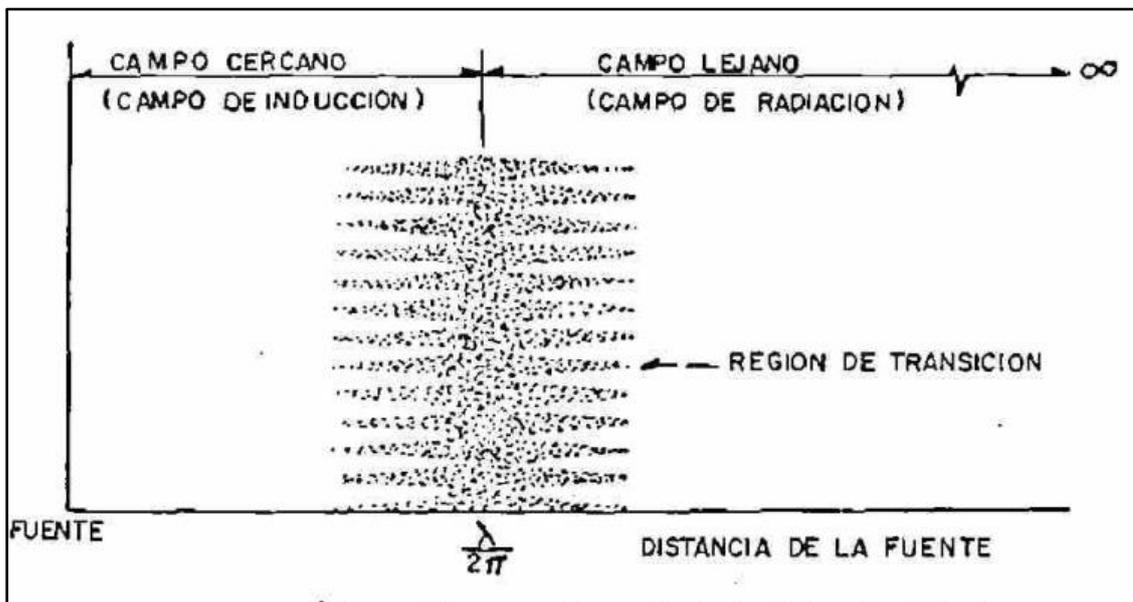


Figura 1.6: Zonas de radiación [1].

Campo cercano:

Esta es la región más cercana a la antena donde el campo es reactivo. Para su mejor análisis se supone que esta zona es una esfera con la antena en su centro y con un radio que se calcula con la siguiente expresión:

$$r \approx 0.62 \sqrt{\frac{D^2}{\lambda}} \quad (1.18)$$

Donde:

r= radio de la antena

D= la parte de mayor dimensión de la antena

Campo cercano (Región de Fresnel):

Esta es una región intermedia donde el campo de radiación es más significativo pero la distribución del campo angular todavía depende de la distancia desde la antena. Para la mayoría de las antenas, se supone que la región de Fresnel está encerrada entre dos superficies esféricas.

$$r \approx 0.62 \sqrt{\frac{D^2}{\lambda}} \leq r \leq 2 \frac{D^2}{\lambda} \quad (1.19)$$

La zona de Fresnel tiene importancia solamente para antenas cuyas dimensiones sean mayores comparadas con su longitud de onda, como las antenas reflector [12].

Campo lejano (Región de Fraunhofer):

Podemos esta zona como *"la región del campo de una antena donde la distribución del campo angular es esencialmente independiente de la distancia desde la antena. Si la antena tiene una dimensión máxima D , la región de campo lejano se considera comúnmente que existe a distancias mayores que $2 \frac{D^2}{\lambda}$ de la antena, siendo λ la longitud de onda"* [7]. La distancia viene definida por la siguiente fórmula:

$$r \geq 2 \frac{D^2}{\lambda} \quad (1.20)$$

CAPÍTULO 2. BLINDAJE ELECTROMAGNÉTICO EN IRM

Actualmente el blindaje electromagnético es usado por varios sectores, como el militar, el de las industrias privadas, en las comunicaciones, en la medicina, etc. El tipo de blindaje a utilizar depende del propósito o uso del equipo que se quiere proteger. El grado exacto de blindaje depende de varios factores como: distancia de los equipos, sensibilidad y tipo de equipo [13]. La sociedad actual es muy consumidora de equipos electrónicos, la mayoría de los mismo son emisores de ondas electromagnéticas, las cuales interfieren en el correcto funcionamiento de otros equipos a su alrededor. Por eso es tan necesario que exista un blindaje que proteja dichos equipos de estas interferencias electromagnéticas.

2.1 Definición de blindaje electromagnético.

Existen varias definiciones de blindaje electromagnético, una de las más acertadas es: “Se define como elemento de blindaje a un material conductor colocado entre dos regiones específicas. Tal material controlará la propagación de ondas de los campos eléctrico y magnético de una región a otra” [1]. El objetivo fundamental de un blindaje es impedir el paso de las ondas electromagnéticas, ya sea para que no salgan o no entren de un lugar específico, ambos casos se muestran en la siguiente figura 2.1.

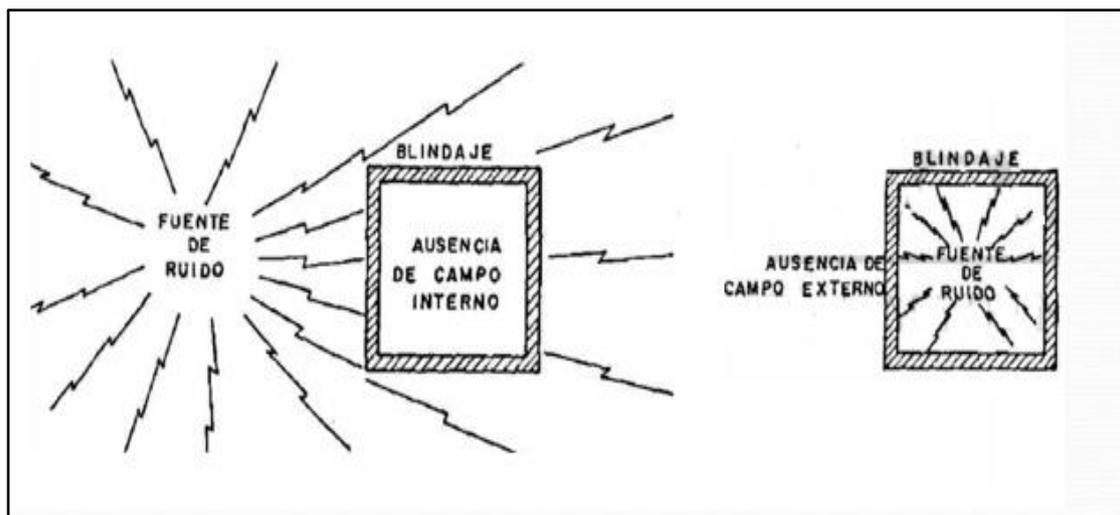


Figura 2.1: Formas de aplicar blindaje electromagnético [1].

2.2 Tipos de blindajes

La protección electromagnética es una práctica necesaria debido a la contaminación electromagnética en el ambiente. Por eso los blindajes han ido evolucionando y perfeccionándose para satisfacer la demanda actual. Existen varios tipos de soluciones de blindaje, tales como los Sistemas de Blindajes Activos y los Sistemas de Blindajes Pasivos [2].

2.2.1 Sistemas de Blindajes Activos.

Esta forma de blindaje es bastante innovadora, utiliza sensores de campo magnético, que constantemente recopilan información de los niveles de campo magnético ambientales, estos datos se almacenan en un servidor para luego ser procesados. En dependencia de la información que se obtenga, se accionan unas bobinas compensadoras de campo, las cuales neutralizan las ondas electromagnéticas no deseadas. De esta manera se obtiene un blindaje autónomo, o sea de forma activa [2].

2.2.2 Sistemas de Blindajes Pasivos.

Esta forma de blindar es la tradicional, la cual usa materiales para cubrir el área deseada y no permitir el ingreso de interferencias electromagnéticas. Dos de las principales soluciones de blindaje pasivo que ofrece la industria son los sistemas “Recintos modulares o de abrazaderas”, y los “Recintos estructurales de acero soldado”. El segundo mencionado, debido a la complicación en la construcción, hay que montarlos en lugar deseado (in situ).

A parte de los dos sistemas mencionados anteriormente otra variante de blindaje es el “Sistema de Papel de Aluminio” que es una variante de “lámina simple”, que actualmente es ampliamente utilizado en pequeñas compañías alrededor de todo el mundo [2]. Otras variantes de blindaje son aquellos en los cuales el revestimiento se construye dentro de los muros del local, estos son los llamados “Blindajes Arquitectónicos”. “Hoy en día estos se dividen en:

- Blindajes con papel de aluminio.
- Recintos blindados con hojas de Cobre.
- Recintos blindados con aleaciones de Cobre.
- Sistema de blindaje de juntas tipo sándwich” [2].

2.3 Efectividad de blindaje.

Cada material ofrece una atenuación diferente, depende de sus propiedades, así como de las propiedades de la onda electromagnética y del ambiente que se propaga, como también de la distancia de la fuente al recinto, la fuerza del campo magnético que queremos mantener afuera (o a dentro), por eso para realizar un buen blindaje se necesita tener en cuenta todos estos factores. La excelencia de un blindaje está en que no haya aperturas por donde penetren las ondas electromagnéticas del exterior. Pero lamentablemente todos los blindajes necesitan algunas aperturas para el paso de cables eléctricos, ventilación, puertas, ventanas, tuberías etc. Por estos orificios las ondas electromagnéticas afectarán a los equipos dentro del blindaje. *“Las líneas de campo que ingresen a través de los orificios del blindaje, tendrán un efecto en las cargas al interior, pero si ningún objeto conductor se sitúa en las vecindades del orificio, las líneas de campo eléctrico se doblarán y terminarán en el blindaje”* [2]. En la siguiente figura se muestra lo anteriormente dicho, mostrando la eficacia del blindaje para el interior del recinto

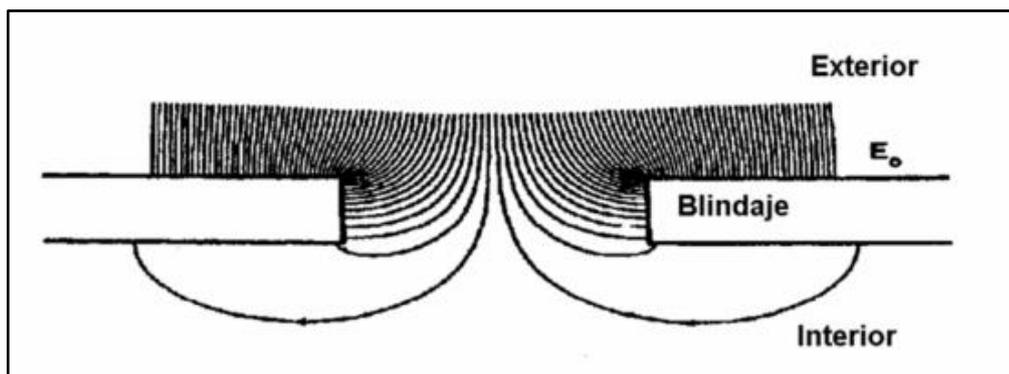


Figura 2.2: Líneas del campo eléctrico en una apertura en un blindaje [2]

Cuando un blindaje reduce o elimina la intensidad del campo eléctrico y/o magnético, podemos decir que es un blindaje efectivo, dicha efectividad se puede expresar mediante la siguiente fórmula:

$$S = 10 \log_{10} \left(\frac{\text{densidad de potencia incidente}}{\text{densidad de potencia transmitida}} \right) \quad (2.1)$$

El resultado de la fórmula se puede definir como una pérdida pues S es siempre positiva. La densidad de potencia (W/m) también se puede expresar como el producto de E (V/m) por H (Amp/m); en función de estos términos la efectividad se define además de la siguiente manera:

$$S = 10 \log_{10} \left(\frac{E_0 H_0}{E_1 H_1} \right) \quad (2.2)$$

S= efectividad de blindaje (dB)

E0, H0=valores de intensidad de los campos al exterior del blindaje.

E1, H1= valores de intensidad de los campos dentro del blindaje.

Hay que tener en cuenta las pérdidas que ocurren en una onda cuando interactúa con una superficie conductora. Básicamente son dos tipos de pérdidas en una onda electromagnética: la pérdida por reflexión, y la pérdida por absorción o penetración. Por reflexión es cuando parte de la onda es reflejada por las interfaces entre aire y metal. Por absorción ocurre cuando una parte de la onda transmitida es atenuada al penetrar en el material, ambas se pueden ver en la siguiente figura.

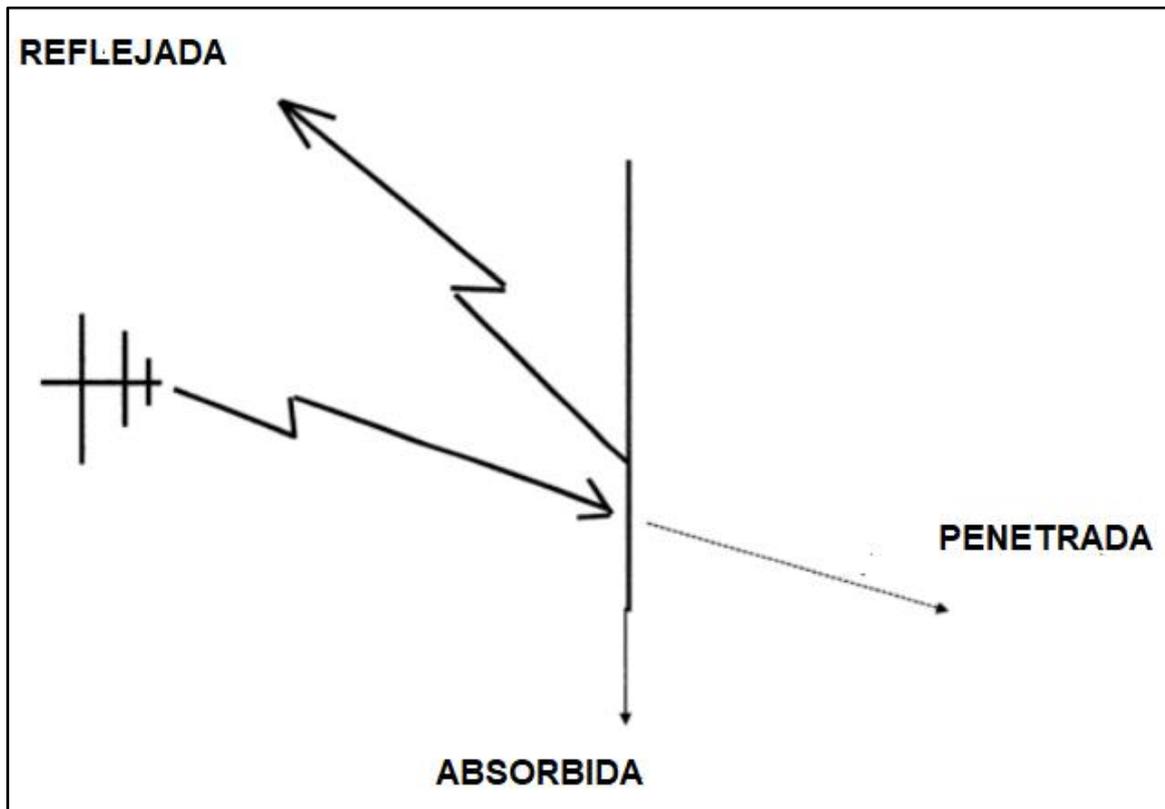


Figura 2.3: Pérdidas por absorción y reflexión de una onda electromagnética [14]

2.4 Blindaje en salas de resonancia magnética.

El ruido electromagnético en el ambiente es una fuente de degradación de la calidad de las imágenes en la Imagenología por Resonancia Magnética (IRM). Actualmente existen diversos dispositivos que emiten intencional o accidentalmente energía de RF al ambiente, lo que ocasiona que no exista un sitio libre de ruido para la instalación de equipos de IRM. Los blindajes en las salas de RM evitan el ingreso de ondas electromagnéticas que puedan causar mal funcionamiento de los equipos. La interferencia electromagnética puede ser conducida o radiada según el medio que se utilice para transmitir la misma. Si es radiada, es aquella que utiliza el aire para irradiarse por el espacio; si es conducida es aquella que se propaga por los cables, ya sea del sistema eléctrico o del sistema de comunicaciones (ver la tabla 2.1). Ambas interferencias tienen como elemento común que generan contaminación electromagnética [2].

Tabla 2.1: Fuentes de interferencia conducida [13].

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

Como podemos apreciar casi todas estas fuentes de interferencias afectan la frecuencia de 12 MHz, que es la frecuencia con la cual se diseñarán las antenas para verificar el blindaje en una sala de resonancia magnética de bajo campo y como se muestra hay mucha interferencia en esa frecuencia causada por fuentes muy comunes en cualquier sala de IRM.

2.5 Resonancia Magnética.

La naturaleza no invasiva de la resonancia magnética la convierte en una técnica muy demandada para diagnosticar una amplia variedad de enfermedades. La imagenología por resonancia magnética (MRI) es una herramienta poderosa debido a su flexibilidad y sensibilidad a una amplia gama de propiedades de los tejidos (duros y blandos) [17]. Es el método por excelencia para el diagnóstico de padecimientos mediante imágenes, gran parte por su naturaleza inocua, así como por la facilidad y exactitud de diagnóstico. “*Un sistema de resonancia magnética puede ofrecer información funcional, como la hemodinamia del sistema cardiovascular o el funcionamiento del cerebro en tiempos de adquisición cercanos a 20 milisegundos. Igualmente es capaz de generar información relativa a la difusión y perfusión de tejidos, como los del cerebro*” [18].

El diseño en IRM es esencialmente determinado por el tipo y la forma del imán principal del sistema, existen los de tipo cerrado, túnel o abiertos. El imán es básicamente el corazón del sistema, además, entre más intenso es, el campo magnético generado será mayor, provocando así, una mejor obtención de la señal y disminuyendo el ruido generado. Las unidades con las que se mide el campo son llamadas “unidades Gauss”, las cuales representan la medida de las líneas generadas por el campo.

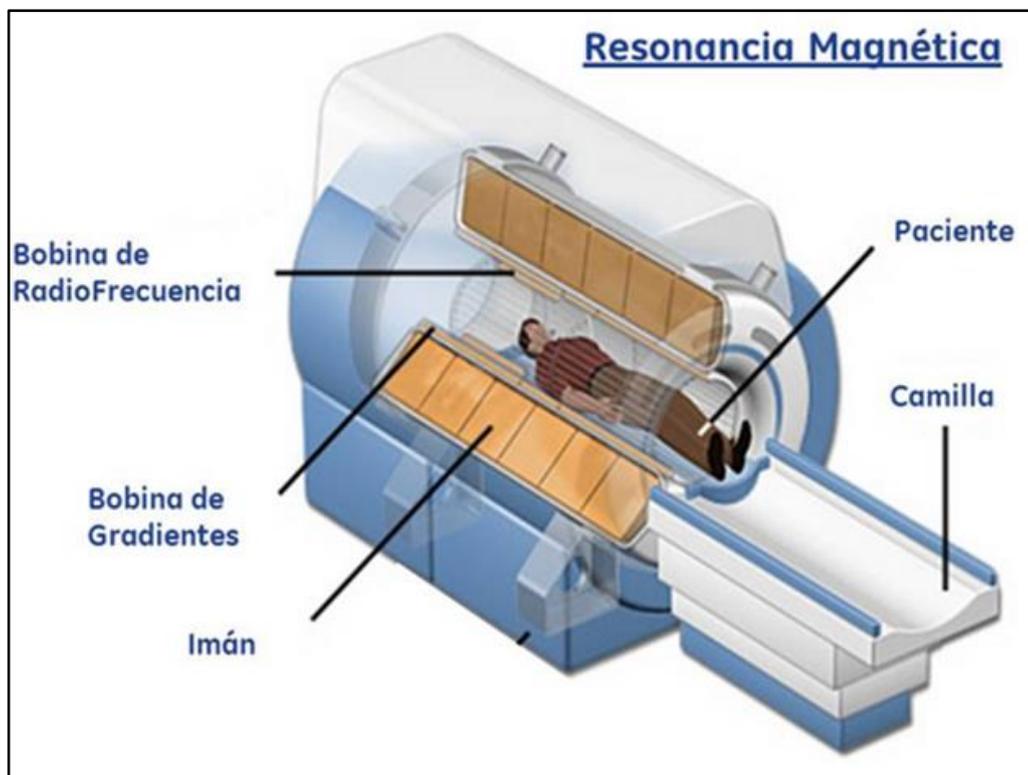


Figura 2.4: Equipo de resonancia magnética [19].

2.5.1 Funcionamiento.

El principio de funcionamiento de la RM es el uso de un potente imán que excita a los protones a alinearse con el campo magnético generado por el imán y dejen de estar alineados con el campo magnético del cuerpo humano. El paciente se expone a pulsos de radiofrecuencia, los cuales alteran la orientación de los protones y estos giran fuera de equilibrio. Una vez se detenga el pulso de RF los protones vuelven a alinearse con el campo magnético, y esa energía liberada es lo que permite que se formen las imágenes. En dependencia de la cantidad de energía liberada se puede determinar el tipo de tejido, creando contrastes en la resolución de las imágenes.

Los pulsos de radiofrecuencia (RF) son generados por una bobina del transmisor que rodea la totalidad o una parte del cuerpo, generalmente se construye junto con el imán. Cuando ocurre el fenómeno de resonancia, es porque los protones dentro del paciente subieron a otro nivel de energía, modificando así, la magnetización del paciente. Esto pasa cuando los protones precesados logran sincronizarse con el pulso de RF, produciendo así que los protones apuntando hacia cada lado de forma aleatoria, se vayan cancelando y sólo sobrevivan las fuerzas magnéticas que, están “en fase”, como si los protones precesarán a pasos, apuntando hacia la misma dirección al mismo tiempo, sumándose. Como resultado, se disminuye la magnetización longitudinal (a lo largo del eje z) y se obtiene un vector magnético en dirección a los protones de precesión (apuntando sobre el plano x-y), por lo que se llama “magnetización transversal [17].

2.5.2 Resonancia magnética de bajo campo.

Un equipo de resonancia magnética (RM) es, en esencia, un potente imán. La diferencia de los campos se refiere a su potencia, que se mide en Teslas. Por encima de una potencia de 1 ó 1,5 Teslas, ya se puede hablar de RMs de 'alto campo'. La resonancia de alto campo ofrece alguna ventaja respecto a la de bajo campo en cuanto a la resolución de las imágenes. Los aparatos de resonancia clásicos tenían 0,5 Teslas, y ya van quedando pocos de ellos. Para detectar algunas enfermedades no es necesario tener tanta resolución en las imágenes por lo que este tipo de resonancias son una variante económica e igual de acertada para muchos hospitales y clínicas. La RM de alto campo es en su mayoría superior a 1.5 Teslas y la de bajo campo tienen un campo magnético menor a 0,5 Teslas [21].



Figura 2.5: Tipos de resonancia según intensidad de campo magnético (B_0).

Teniendo en cuenta lo anterior descrito podemos analizar cómo llegar a nuestra frecuencia de interés (12 MHz). Para eso hay que tener en cuenta la frecuencia de Larmor, que es la frecuencia que se aplica en la resonancia para que los protones salgan de su estado de equilibrio. La fórmula de la frecuencia de Larmor relaciona la intensidad del campo magnético (B_0) con dicha frecuencia, la misma se expresa:

$$\omega_0 = \gamma B_0 \quad (2.3)$$

Donde:

ω_0 = frecuencia de Larmor

γ = constante giromagnética (Hz/Gauss)

B_0 = intensidad de campo magnético (Gauss)

Se tomó un valor medio entre 0.1 y 0.5 T para calcular la frecuencia de Larmor, en este caso fue 0.28T que corresponde a bajo campo. Los protones de hidrógeno son los de interés para este cálculo (cada átomo tiene una γ diferente), además de la B_0 , la ecuación quedaría de la siguiente manera:

$$\omega_0 = \gamma B_0$$

$$\omega_0 = 4257 \text{ Hz/Gauss} \times 0,28\text{T}$$

$$\omega_0 = 11,92 \text{ MHz}$$

$$\omega_0 \approx 12 \text{ MHz}$$

Donde:

$\gamma = 4257 \text{ Hz/Gauss}$ (constante del hidrógeno)

$0.28\text{T} = 2800 \text{ Gauss}$

Mediante este cálculo podemos obtener la frecuencia de interés de este trabajo, que fue determinada por la intensidad del campo magnético del imán y de los protones de hidrógeno. Es de suma importancia esta frecuencia pues “los equipos de IRM son construidos para trabajar con campos magnéticos fijos, y esta frecuencia es la que se va a utilizar para excitar a los protones de hidrógeno, siendo que el campo magnético externo es fijo, para que entre en resonancia debe utilizarse la frecuencia correspondiente a la intensidad del campo” [37].

2.6 Verificación de blindaje electromagnético.

Actualmente todos vivimos en un mar invisible de actividad electromagnética, tanto las creadas por los humanos como las producidas por fuentes naturales. El campo magnético terrestre, los rayos y las emisiones del espacio exterior son fuentes naturales. Teléfonos, comunicaciones por radio, microondas, radares y todo tipo de equipos eléctricos son ejemplos de fuentes hechas por el hombre. Todos los componentes electrónicos producidos en la actualidad deben ser compatibles electromagnéticamente con este entorno y deben someterse a pruebas de compatibilidad electromagnética (EMC). Hoy día existen muchas empresas en todo el mundo que ofrecen servicios de creación y verificación de blindajes electromagnéticos. Otras simplemente venden el equipamiento necesario para la verificación. Pero generalmente la contratación de un personal capacitado con equipos especializados para esta tarea o simplemente la compra de los equipos para esta finalidad supone un costo elevado para cualquier entidad. A continuación, se mostrarán varios equipos para la verificación de blindaje que ofrecen algunas empresas en América y el resto del mundo.

2.6.1 Fuente para medir aislamiento de cajas blindadas de RF.

JRE HPSS-1 es una fuente de señal para medir el aislamiento de recintos de prueba blindados de RF. Posee una fuente de alta potencia de 250 - 500 mW que funciona a 2.45 GHz y permite medir el aislamiento por encima de 120 dB. Esta frecuencia es ideal ya que se encuentra dentro del rango de frecuencia de la mayoría de los analizadores de espectro de bajo costo y también permite el uso de una pequeña antena Yagi la cual posee un conector SMA hembra, que es ideal para detectar cualquier fuga alrededor del blindaje de la caja. Tiene un costo de 995 USD y se muestra en la próxima figura:



Figura 2.6: JRE HPSS-1 [22].

2.6.2 Analizador de prueba de blindaje de mano (JRE STA-1).

JRE STA-1 es un analizador de prueba de blindaje de mano por sus siglas en inglés. Es un equipo que verifica fácilmente el aislamiento adecuado de los recintos de prueba blindados de RF. Posee todos los ajustes preconfigurados, nada que ajustar o configurar, sintonizado a una frecuencia central de 2,45 GHz y span de 2 MHz y un rango dinámico en la pantalla de 115 dB. La sensibilidad es de hasta -115 dBm e identifica fácilmente las fugas más pequeñas. Tiene una batería de iones de litio e incluye antena Yagi direccional y tiene un costo de 495 USD.



Figura 2.7: JRE STA-1 [23].

2.6.3 Conjunto de verificación de prueba TVK

Este kit de herramientas está compuesto por el analizador de espectro de mano STA-1 y la fuente de señal de RF HPSS-1. El mismo produce una señal de alta potencia, 250-500 mW a 2.45 GHz. Usa una batería interna de li-ion de alta capacidad que permite un funcionamiento completamente independiente por lo que no hay necesidad de ninguna fuente de alimentación externa o de alimentar con energía al gabinete de prueba, por lo que la barrera de aislamiento del gabinete está libre de obstáculos.

El precio de este kit es de 1295 USD. Este kit de herramientas para la verificación del blindaje las fabrica y comercializa la empresa norteamericana JRE Test.



Figura 2.8: Conjunto de verificación JRE TVK [24].

Al igual que JRE Test, Panashield es otra empresa norteamericana que brinda servicios de verificación de blindaje en los rangos de frecuencia de 200 MHz a 1 GHz, pero a menudo se pueden extender hasta 10 KHz y hasta 10 GHz, 18 GHz o incluso 40 GHz. Otra de las grandes empresas élites en la verificación de blindaje electromagnético se encuentra la empresa argentina Dalde, que certifica jaulas de Faraday, diagnósticos de jaulas defectuosas y resolución de problemas de fugas. También brinda servicio y mantenimiento a puertas e interfaces, la refacción y adaptación de jaulas existentes durante los cambios de equipo [25]. Miden y certifican blindajes en frecuencias de 10, 21 y 100 MHz, de acuerdo con el protocolo exigido por el fabricante del equipo de RM [25]. Tekemi, empresa chilena, es otro ejemplo de empresa dedicada a la verificación de blindajes electromagnéticos. Ofrece verificación de blindaje de campo magnético de baja frecuencia en el rango de frecuencias de 0.1-200Hz. Y también ofrece verificación de radiofrecuencia en el rango de 10Mhz – 130MHz [26] y muchos servicios más.

2.6.4 Sistema de medición de efectividad del blindaje

SEMS por sus siglas en inglés, es un equipo que verifica la efectividad del blindaje de un recinto, que mide la eficacia de la protección en entornos locales que trabaja en el rango de frecuencias de 10 KHz a 300 MHz. Consiste en una antena transmisora y una receptora, un software SEMS para la PC, 1 maletín de transporte, 2 cargadores y cable de interfaz de PC RS232 (figura 2.9), además de un certificado de calibración estándar de conformidad con las normas internacionales: MIL-STD-285, IEEE STD 299, EN 50147-1, NSA 65-6. Unas de las ventajas de SEMS es que no se necesitan cables para conectar las antenas pues lo hacen de forma inalámbrica. Fue diseñado por MPB que es una empresa italiana que radica en Roma. Todas las mediciones se almacenan dentro del receptor y luego son descargadas con el software.



Figura 2.9: Sistema SEMS [27].

El precio de este conjunto es de 8500 euros, y cada accesorio mostrado en la figura 2.10 tiene un precio independiente. Ejemplo el loop L4 que está sintonizado en el rango de frecuencia de interés de este trabajo (12 MHz), tiene un costo de 685 euros. Este sistema no requiere cable de alimentación debido a que tiene baterías recargables de 6 horas de duración y solo necesita 1 operador para manejar el sistema pues éste se sintoniza solo vía inalámbrica. Lo relevante de este sistema es su capacidad de poder usar varios tipos de antenas según la frecuencia que se desea medir. La siguiente figura 2.10 muestra los diferentes acoplamientos que se le puede hacer al sistema.

Fig	Código	Descripción
4	L1	Antena loop de 2-18 MHz
5	L2	Antena loop de 10 KHz-4 MHz
6	L3	Antena loop detector de fugas
7	L4	Antena loop de 2-128 MHz
8	B1	Antena bicónica 60-300 MHz
9	D2	Antena dipolo de 40-300 MHz
10	R2	Antena de barra 1-128 MHz
11	KAL KIT	Kit atenuador 4x30 Db
12	Enlace óptico	Enlace óptico de 10m de fibra
13	Enlace óptico	Enlace óptico de 20m de fibra
14	NMR-01	Trípode no magnético

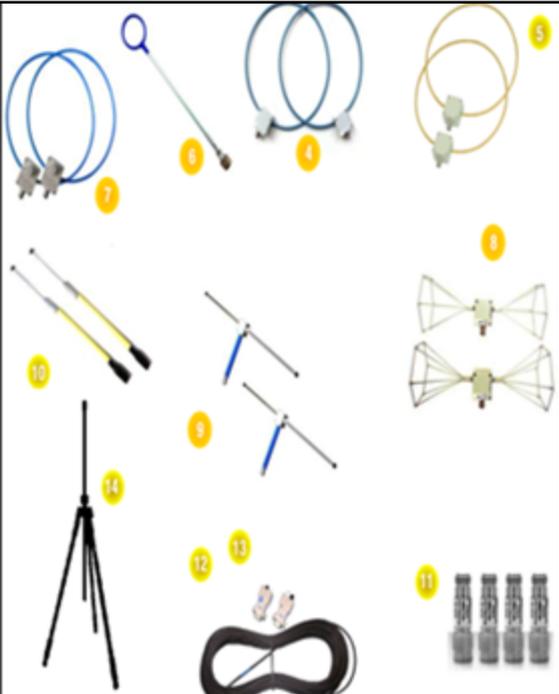


Figura 2.10: Acoplamientos para el sistema SEMS [27].

A diferencia de los sistemas tradicionales, que miden la efectividad del blindaje solo en unos pocos puntos de frecuencia, el SEMS realiza la prueba completa continuamente y en todo el rango de frecuencia. Otra innovación y desarrollo, en comparación con los sistemas de prueba tradicionales, es la sincronización de las unidades TX y RX. Las dos unidades se comunican entre sí gracias a una tecnología inalámbrica, que es muy útil para automatizar, acelerar la prueba y minimizar cualquier error.

2.7 Estándares internacionales

2.7.1 Estándar MIL-STD 285

Primer estándar relacionado con blindaje electromagnético emitido por el DoD de EE.UU para verificar la efectividad del blindaje electromagnético con fines militares a mediados de 1956. El mismo plantea realizar una prueba de nivel de referencia en el espacio libre (fuera del recinto) para campos magnéticos, campos eléctricos y de ondas planas con las antenas de transmisión y recepción a 1 metro de distancia. Cubre un gran espectro de frecuencias desde 10kHz hasta 10GHz. Este estándar proporciona todos los elementos a tener en cuenta para realizar una prueba de efectividad de blindaje, dígame

las antenas a utilizar, las distancias en la medición y la distancia entre los elementos, los equipos a utilizar, las frecuencias, los tipos de cables, etc. También define conceptos importantes en la medición del blindaje tales como atenuación, atenuador, nivel de referencia, etc. Las antenas propuestas a utilizar son loops redondos de cobre de una sola vuelta para medir la atenuación del campo magnético. Para medir la atenuación del campo eléctrico se propone el uso de antenas de varilla de 41 pulgadas de largo y para la atenuación de las ondas planas se proponen antenas dipolos.

La antena transmisora se coloca dentro del recinto frente a $\frac{1}{2}$ metro de la pared y se coloca la antena receptora a $\frac{1}{2}$ metro de la pared exterior del recinto. Con una lectura secundaria tomada, la diferencia en las dos lecturas se llama "efectividad de blindaje" del recinto bajo prueba [29]. Como fue el primer estándar, fue rápidamente difundido y aplicado en todo el mundo como referente de verificación de blindaje (aunque haya tenido sus errores). Actualmente no está vigente [32].

2.7.2 Estándar IEEE Std-299

Como su nombre lo indica fue emitido por la IEEE por los años 1960 y define un procedimiento de verificación para Jaulas de Faraday. Terminando el año 1997 sufrió varias modificaciones importantes, nutriéndose del MIL-STD 285 para dichos cambios. Esta revisión modificó el alcance de este estándar, permitiendo ahora el procedimiento en recintos más pequeños, lo cual permitió que fuera más económico, sin embargo, la minuciosidad y la precisión de la prueba se mantuvieron. En este estándar se proporcionan procedimientos y técnicas de medición uniformes para determinar la efectividad de los recintos (igual o mayor a 2m) de blindaje electromagnético a frecuencias de 9 kHz a 18 GHz (ampliables a 50 Hz y 100 GHz, respectivamente). Los tipos de recintos cubiertos incluyen, entre otros, estructuras de un solo escudo o de doble escudo de varias construcciones, como desmontables atornilladas, soldadas o integrales con un edificio; y hecho de materiales como chapa de acero, chapa de cobre o aluminio, pantalla, tela metálica, papel de aluminio o telas de protección [30].

Este documento plantea que el estándar MIL-STD-285 con el paso de los años ha disminuido aplicabilidad con la llegada de los cambios tecnológicos, aunque su premisa fundamental aún se mantiene, que plantea que el efecto de blindaje es proporcionar una pérdida de inserción a la influencia externa. Aquí se plantea que la efectividad del blindaje es la relación de la señal recibida (desde un transmisor) sin el blindaje, a la señal recibida

dentro del blindaje, o sea la pérdida de inserción cuando el blindaje se coloca entre la antena Tx y la antena Rx. Los procedimientos detallados se dividen en tres rangos (tabla 2.2 muestra los tres rangos de frecuencias), denotados como baja frecuencia, resonancia y alta frecuencia. Se requieren procedimientos y equipos separados y distintos en cada uno de estos rangos. Estas son frecuencias recomendadas por el estándar, pero puede ser cualquier frecuencia de interés para realizar la verificación [30].

Tabla 2.2: Rangos de frecuencias [30].

Frecuencia estándar	Tipo de antena	Procedimiento de cláusula
Bajo rango		
Loop pequeño		
9–16 kHz		5.6
140–160 kHz	↓	↓
14–16 MHz	↓	↓
Rango resonante		
20–100 MHz	Bicónica	5.7
100–300 MHz	Dipolo	↓
Alto rango		
0.3–0.6 GHz	Dipolo	5.8
0.6–1.0 GHz	↓	↓
1.0–2.0 GHz	Corneta	↓
2.0–4.0 GHz	↓	↓
4.0–8.0 GHz	↓	↓
8.0–18 GHz	↓	↓

El nivel de referencia producido por la fuente en ausencia del blindaje se obtendrá por medición directa con el loop receptor separado del loop transmisor por 0.6 m de borde a borde más el espesor de la barrera de protección, que es la misma distancia total de antena a antena que se utilizará cuando interviene una barrera de protección. Ambas antenas loop estarán en el mismo plano (coplanar). Durante todas las mediciones de baja frecuencia, un loop (típicamente el loop de Tx) se mantendrá en una posición fija y el segundo loop (generalmente el loop de Rx) se reorientará y desplazará para buscar una medición en el peor de los casos; el valor máximo de la lectura del detector se utilizará

para determinar la efectividad del blindaje [30]. Dicho procedimiento utiliza el siguiente diseño que se muestra en la figura 2.11.

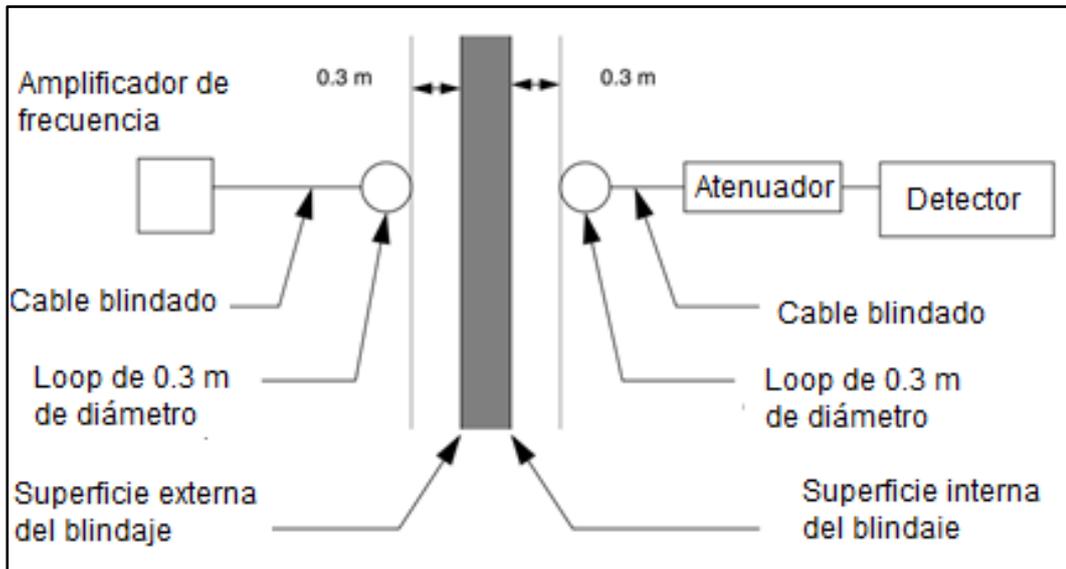


Figura 2.11: Esquema para verificación de blindaje propuesto por Std-299 [30].

Este estándar también plantea la forma de calcular la efectividad del blindaje (SE por sus siglas en inglés) para cada rango de frecuencias planteado en la tabla 2.2. Las relaciones matemáticas para el cálculo del blindaje se muestran en la tabla 2.3. Donde H_1 es el campo magnético en ausencia del recinto (lectura de referencia); y H_2 es el campo magnético dentro del recinto.

Tabla 2.3: Relaciones matemáticas de blindaje [30].

Rango de frecuencias	Cantidades de medidas	Unidades	Efectividad del blindaje (dB)
Unidades lineares			
9 kHz–20 MHz	H_1, H_2	$\mu\text{A/m},$ μT	$S_H = 20 \log_{10} \frac{H_1}{H_2}$
Extendible desde 50 Hz	V_1, V_2	μV	$S_H = 20 \log_{10} \frac{V_1}{V_2}$
20–300 MHz	E_1, E_2	$\mu\text{V/m}$	$S_E = 20 \log_{10} \frac{E_1}{E_2}$
1.7–18 GHz	P_1, P_2	watts	$S_P = 10 \log_{10} \frac{P_1}{P_2}$
Extendible hasta 100 GHz			

2.7.3 Estándar EN 50147-1

Esta norma se aplica a las mediciones de atenuación de blindaje de recintos blindados (cámaras, habitaciones) en el rango de frecuencia de 9 kHz \pm 40 GHz. El objetivo de esta norma es establecer un procedimiento de medición común para validar la efectividad de blindaje de un recinto blindado. Esta norma es un estándar europeo emitido por el CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardization), y es el equivalente al IEEE Std 299 emitido por EUA. La atenuación del apantallamiento puede calcularse solo en casos ideales. El factor más significativo es que la envolvente apantallada sea homogénea y esté compuesta de materiales cuyas propiedades se definan en todos los aspectos [31]. El cálculo de la atenuación es presentado para los campos eléctricos (2.4) y magnéticos (2.5) con las siguientes expresiones:

$$a_s = 20 \log (E_0/E_1) \quad (2.4)$$

$$a_s = 20 \log (H_0/H_1) \quad (2.5)$$

Donde:

a_s = atenuación del blindaje en dB.

E_0 y H_0 = intensidad el campo eléctrico y magnético sin apantallamiento entre las antenas de Tx y Rx (nivel de referencia).

E_1 y H_1 = intensidad del campo eléctrico y magnético con apantallamiento entre las antenas de transmisión y recepción (nivel de interés para cálculo de blindaje).

El esquema propuesto por el estándar se muestra en la figura 2.12:

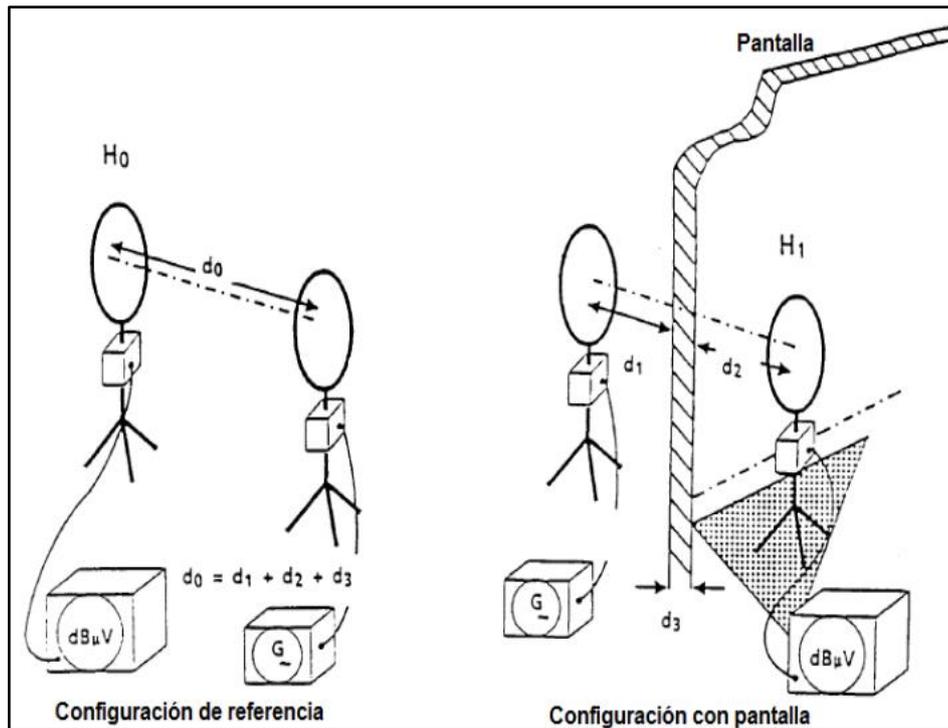


Figura 2.12: Esquema para verificación de blindaje propuesto por EN 50147-1 [31].

Se recomienda el uso de los dipolos sintonizables o de banda ancha, monopolos con planos de tierra para mediciones de campo eléctrico y ondas planas, y antenas de bocina para ondas planas a frecuencias de microondas y para las mediciones de campo magnético se recomienda el uso de antenas loops. Las medidas se tomarán en varias posiciones alrededor del recinto como se indica en la especificación del recinto. En general, estas mediciones se realizan antes de la instalación del blindaje. Si el nivel de ruido ambiental es lo suficientemente bajo, todas las pruebas deben realizarse con el receptor afuera de la cámara y el transmisor dentro de la misma [31]. La distancia entre las antenas, tamaño de estas, rango de la fuente de señal, se muestra en la figura 2.13. Para las mediciones de campo eléctrico se sustituyen las antenas loops por antenas monopolos.

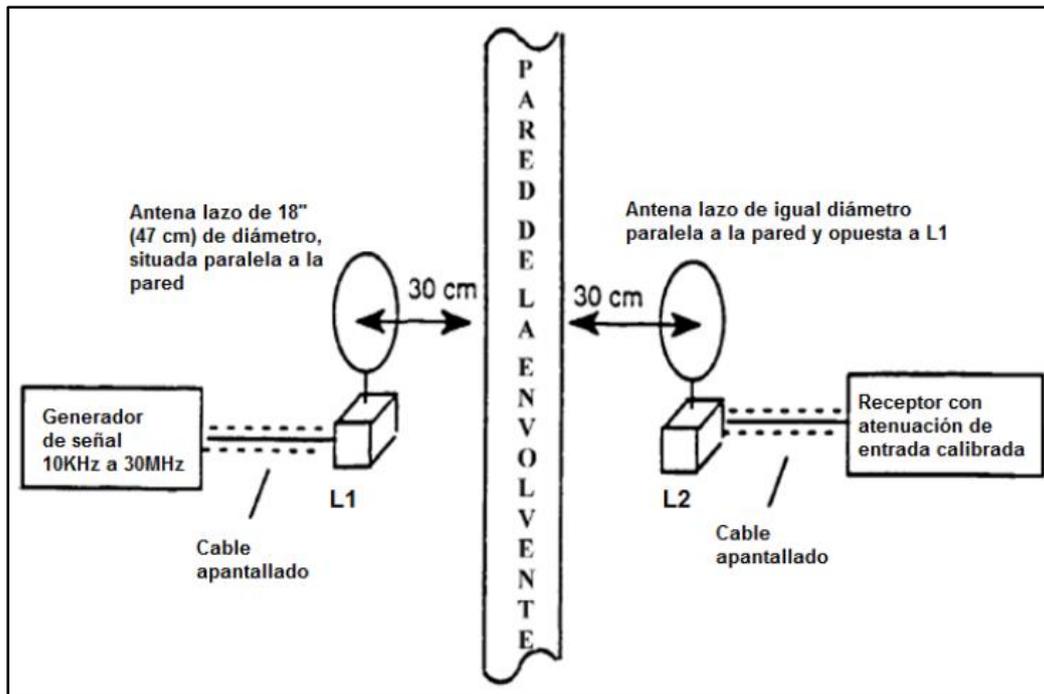


Figura 2.13: Configuración de prueba para medición de campo magnético (eléctrico)[31].

2.7.4 Estándar NSA 94-106

Este estándar fue emitido por la NSA (National Security Agency), y es el sucesor del NSA 65-6. Cubre los requisitos generales para la instalación y el rendimiento de recintos blindados que atenúan la radiación electromagnética. Los requisitos se aplican a todas las instalaciones asociadas y auxiliares provistas además del recinto protegido. El documento proporciona instrucciones completas sobre la compra y prueba de cajas modulares y la protección de los equipos de comunicaciones utilizados en la transmisión de información de inteligencia. Las pruebas de atenuación de campo magnético y eléctrico se realizarán con las antenas ubicadas directamente opuestas entre sí y separadas una distancia de 61 centímetros (24 pulgadas) más el grosor de la pared (ver figura 2.14). La atenuación de campo magnético se medirá a 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz y 1 MHz. La atenuación del campo eléctrico se medirá a 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz, 1 MHz y 10 MHz. La prueba de atenuación de la onda plana se realizará con la antena transmisora colocada al menos a 6 metros de la superficie del gabinete (cuando sea práctico) y la antena receptora colocada a no menos de 5,1 centímetros (2 pulgadas) de la pared. La atenuación de la onda plana se medirá a 100 MHz, 400 MHz, 1 GHz y 10 GHz. Las mediciones, para todas las pruebas, se tomarán con las antenas orientadas para la intensidad máxima de la señal recibida. Las pruebas de atenuación se realizarán alrededor de todo el marco de la puerta, los conductos de

aire, los filtros y a través de cualquier junta o penetración accesible. Además, la magnitud y la ubicación del nivel máximo de señal que emana del recinto se determinará probando al menos cuatro ubicaciones [33]. La selección de los lugares de prueba debe incluir no solo paredes, sino también el piso y el techo. Las pruebas se realizarán, como mínimo, cada 180 pies cuadrados de superficie.

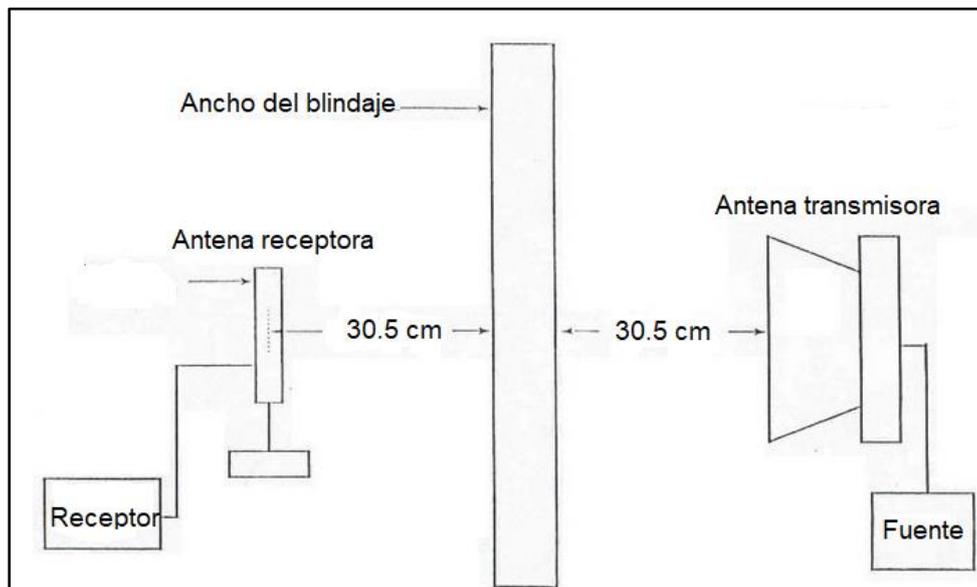


Figura 2.14: Configuración de prueba para medición de campo eléctrico y magnético [33].

El nivel de atenuación más bajo obtenido de todas las pruebas se registrará como la atenuación del recinto. Si es posible, todas las pruebas deben realizarse con el receptor afuera y el transmisor dentro del gabinete [33]. Los métodos de prueba son esencialmente los mismos que los de MIL-STD 285 / IEEE Std-299, con dos excepciones notables. En la prueba magnética, la orientación de la antena loop no es colineal sino planar y el receptor está ubicado fuera del recinto. La ubicación externa se eligió para simular el modelo clásico de que el emisor está dentro del recinto y el receptor de escucha está fuera del recinto [32].

CAPÍTULO 3: DISEÑO DE LAS ANTENAS LOOPS CUADRADAS.

Después de un vasto estudio de todos los estándares que rigen la verificación de blindajes electromagnéticos, podemos llegar a la conclusión que en la mayoría se utiliza o se propone el uso de antenas loops circulares para la medición de campo magnético en el rango de intensidad electromagnética propuesto en este trabajo. Dichas antenas loops son muy usadas por su versatilidad, su buen desempeño en bajas frecuencias y su bajo costo de construcción. *“La antena loop, sin importar su forma geométrica (circular, cuadrada) es equivalente a un dipolo magnético infinitesimal cuyos ejes son perpendiculares al plano de la antena, ya que los campos radiados por una antena de lazos circular o cuadrada tienen la misma forma matemática que un dipolo magnético infinitesimal”* [7]. Teniendo en cuenta este importante análisis, es que se propone la construcción de un loop cuadrado como alternativa para la medición de campo magnético.

Las antenas loop se pueden clasificar según el tamaño de la circunferencia del conductor. Si la circunferencia es aproximadamente una longitud de onda, la antena se considera eléctricamente grande, si es mucho menor que una longitud de onda se considera eléctricamente pequeña [11]. Con una antena pequeña se consigue un patrón omnidireccional, aunque esto implica una alta reactancia y una resistencia de radiación pequeña. Contrariamente una antena de mayor tamaño provee una resistencia de radiación mucho mayor, pero hay que tener en cuenta que la distribución de corrientes a lo largo del loop deja de ser uniforme [9]. Por todo lo anterior descrito se decidió hacer la simulación y construcción de loop cuadrado eléctricamente pequeño.

Para el material de la antena se consideraron varios materiales teniendo en cuenta: conductividad, costo, maleabilidad, resistencia, oxidación, etc. El seleccionado fue el aluminio debido a que es liviano, económico, ligero, resistivo a la corrosión, además de ser un excelente conductor de calor y electricidad. Es un material impermeable e inodoro, no magnético ni tóxico y es muy dúctil y 100% reciclable. El óxido del aluminio protege al material de una oxidación continua, a diferencia de lo que ocurre con otros metales que continúan el proceso de oxidación. Se va a considerar para la construcción de la antena que la misma sea eléctricamente pequeña, o sea, que sus dimensiones (perímetro) sean menores que un décimo de su longitud de onda ($l < 0.1\lambda$).

Ya se tienen tres criterios importantes para la construcción de la antena. El primero es que tiene que ser un loop cuadrado; todos los estándares proponen un loop circular, pero como se mencionó anteriormente no importa si un loop es cuadrado o circular, ambos son equivalentes a un dipolo magnético infinitesimal cuyos ejes son perpendiculares al plano de la antena [7]. Además, se puede sustituir un loop circular (de radio a) por un loop cuadrado (de lado d) siempre y cuando las áreas de ambos sean iguales ($d^2 = \pi a^2$) [11]. El segundo criterio es que tiene que ser una antena eléctricamente pequeña, o sea, que sus dimensiones sean menores que un décimo de su longitud de onda ($l < 0.1\lambda$). Basándonos en la frecuencia de trabajo (12 MHz) podemos saber la longitud de onda de nuestra antena. Empleando la siguiente fórmula:

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (3.1)$$

Donde

c = velocidad de la luz ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$)

λ = longitud de onda

f = frecuencia de trabajo (12 MHz)

$$12 \times 10^6 = \frac{3 \times 10^8}{\lambda}$$

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{12 \times 10^6}$$

$$\lambda = 25 \text{ m}$$

Resolviendo esta sencilla expresión podemos llegar al valor de longitud de onda de nuestra antena, la misma es de 25 m. Para que se cumpla el parámetro deseado para la antena, la dimensión total (perímetro) de la misma debe ser menor que 2.5 m. Para seleccionar la dimensión exacta de la antena se utilizará el software CST Studio Suite 2018, que nos permitirá comparar el desempeño de varias antenas de diferentes tamaños y así elegir la indicada. El tercer criterio es la selección del material conductor, que como ya se analizó, se seleccionó el aluminio por todas sus características y propiedades.

3.1 Simulación en el CST Studio Suite

Como apoyo para el diseño de la antena se utilizó el simulador comercial CST Studio Suite 2018. Este programa se emplea para el análisis, diseño y optimización de componentes y sistemas a través del espectro electromagnético. *“El programa permite modelar y simular antenas brindando resultados muy acertados de cualquier antena y el*

campo magnético al cual trabaja con relación a la situación que sea, tomando en cuenta posibles factores que pudieran afectar de alguna manera la operación del dispositivo” [34]. Para el trabajo se utilizó este software para simular varias dimensiones de la antena loop cuadrada, y ver cuál de estas dimensiones ofrece mejores resultados. Las longitudes del loop simuladas fueron de 31, 40, 50, 56 y 62 cm de lado, se tomaron estas dimensiones para cumplir con los requerimientos antes mencionados de diseño. En la tabla 3.1 se muestran las diferentes longitudes simuladas de la antena loop cuadrada. También se muestran algunos valores que sirvieron como determinante para seleccionar el mejor tamaño para la antena.

Tabla 3.1: Resultados de simulaciones en el CST 2018 de varias dimensiones de la antena.

Lado (cm)	Perímetro	Impedancia	VSWR	Eficiencia de Rad. (dB)	Ganancia (dB)
31	120	0.083735+j70.585938	1787.2	-20.58	-18.92
40	156	0.112974+j97.344711	2120.1	-17.32	-15.67
50	196	0.147474+j129.054605	2597.8	-14.45	-12.80
56	220	0.168295+j148.956784	2933.9	-12.96	-11.32
62	244	0.189158+j169.583018	3305.1	-11.59	-9.959

Dentro de los parámetros están la impedancia, la razón de onda estacionaria (VSWR), la eficiencia de radiación y la ganancia. Como se puede observar los mejores resultados los ofreció la antena de dimensiones de 62 cm de lado. Aún con este tamaño todavía se cumple el criterio de que sea una antena eléctricamente pequeña. Dicha antena ofrece mayor ganancia, mejor eficiencia de radiación, aunque su parte imaginaria sea la mayor de todas, pero es comprensible pues es la de mayor dimensión. La parte reactiva de la impedancia tiene un valor mostrado en la tabla 3.1, por lo cual es necesario cancelarla para poder tener una antena resonante. El diseño de la antena se realizó en el CST Studio Suite 2018 (figura 3.1).

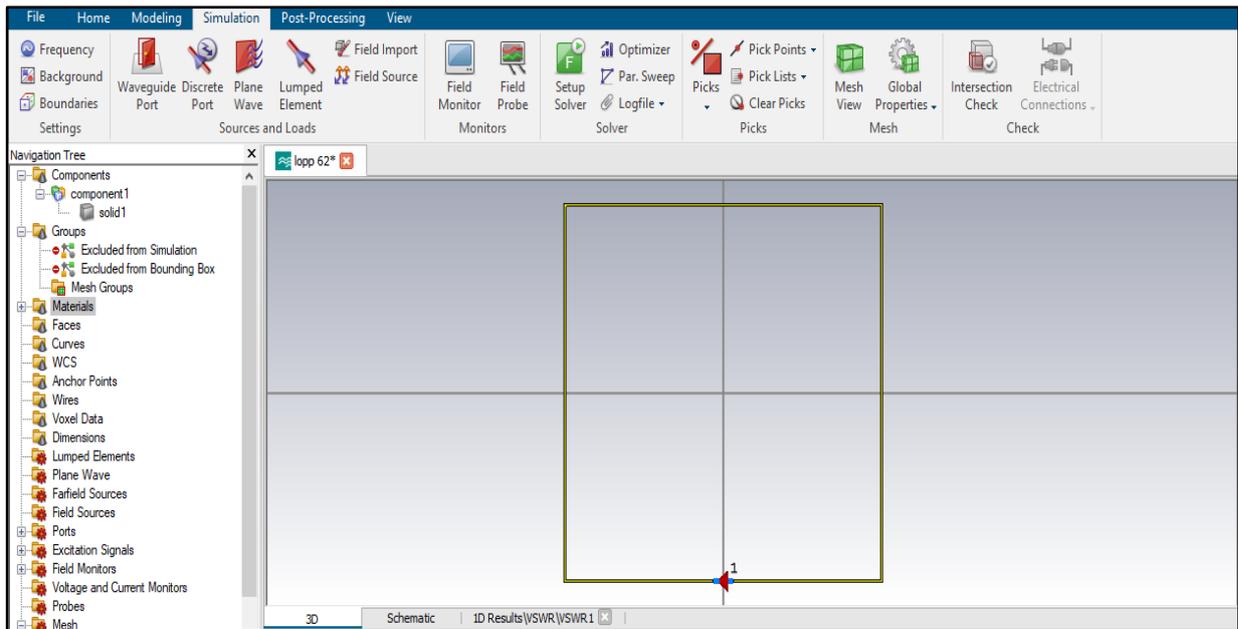


Figura 3.1: Diseño de antena loop cuadrado de 62 cm de lado en el CST Studio 2018.

3.1.2 Carta de Smith

En la figura 3.2 se representa la Carta de Smith de nuestra antena, donde se muestra que la antena no está adaptada y su parte reactiva es inductiva (parte imaginaria positiva) por encontrarse en la parte superior de dicha carta.

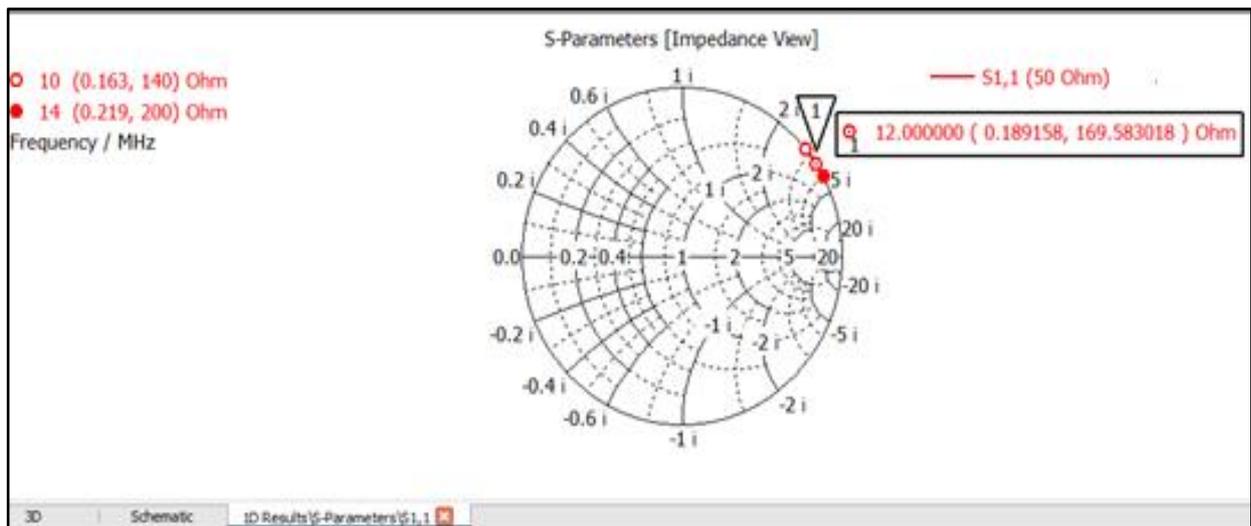


Figura 3.2: Carta de Smith de loop cuadrado de 62 cm en el CST Studio 2018.

Una vez que se consiga la cancelación de la parte reactiva de la antena, es necesario utilizar un sistema de alimentación balanceado para que no haya una descompensación de las tensiones y corrientes a lo largo de la antena que supondría un comportamiento no deseado. Para evitar esto y poder convertir sistemas no balanceados en sistemas balanceados, se hace uso de los denominados “Baluns”. El término Balun proviene de “Balanced to Unbalanced” y es un transformador de balanceado a no balanceado.

Para poder usar un cable coaxial como línea de transmisión para alimentar nuestra antena se requiere un Balun, esto es debido a que la geometría del cable coaxial los convierte en líneas desbalanceadas, ya que el conductor interno del coaxial está a un potencial respecto a tierra distinto al del conductor externo. Esto puede generar una corriente en la superficie externa del coaxial diferente a la de los brazos de la antena y a del núcleo del coaxial y no hay balance de corrientes. Un ejemplo muy conocido es el Balun bazooka.

En las siguientes figuras se mostrarán la parte real y la parte imaginaria de la impedancia de entrada del loop de 62 cm.

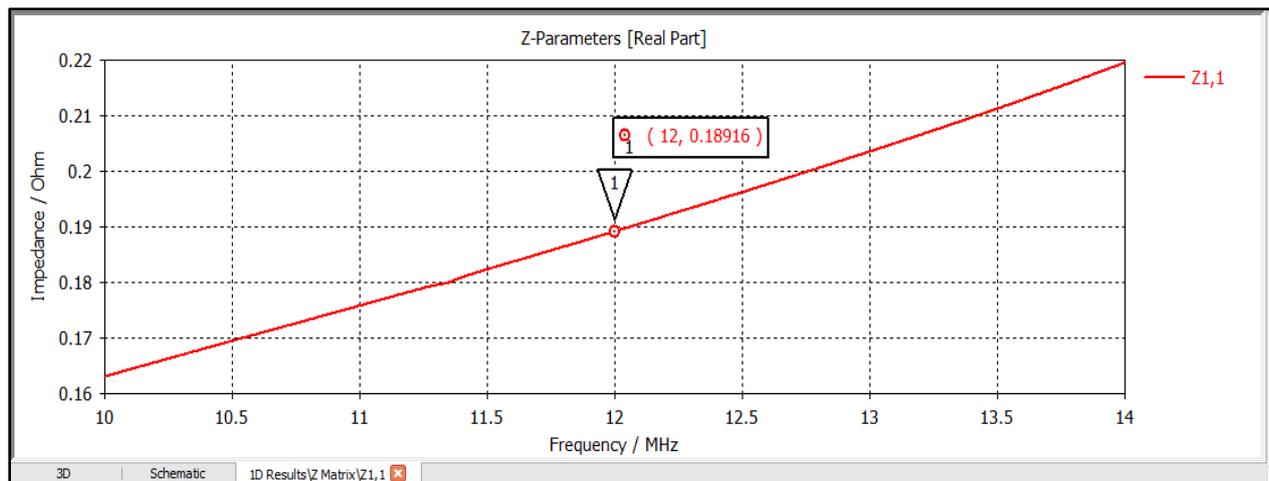


Figura 3.3: Parte Real de la impedancia del loop de 62 cm a 12 MHz.

Como se puede apreciar a los 12 MHz se tiene una impedancia (parte real) muy baja, eso era de esperarse por tratarse de un loop que son pobres radiadores. La próxima imagen 3.4 muestra la parte reactiva de la antena, que en este caso es de 169.58 Ω , que es un valor bastante grande y que hay que eliminarlo para poder tener nuestra resonancia a la frecuencia deseada.

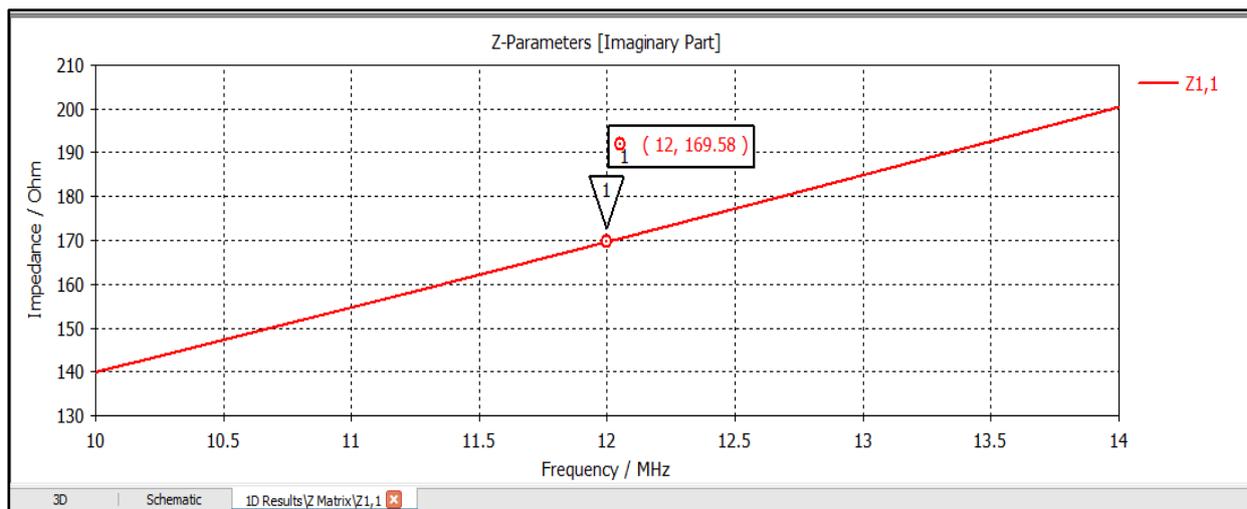


Figura 3.4: Parte Imaginaria de la impedancia del loop de 62 cm a 12 MHz.

Una antena loop es un circuito LC sintonizado a una frecuencia particular. Para lograr que la antena esté en resonancia (corrientes y tensiones máximas), la impedancia inductiva (X_L) tiene que ser igual a la impedancia capacitiva (X_C) para exista total transferencia de potencia según el Teorema de Moritz von Jacobi. Según las simulaciones anteriores, la antena tiene una parte real muy pequeña, de 0.1896Ω , y su parte imaginaria es de 169.58Ω , como no es cero no habrá resonancia, para cancelar dicha parte reactiva primero se necesita saber el valor de la inductancia de la antena, para luego eliminarla con reactancia capacitiva y así poder tener la parte reactiva en cero y sea una antena puramente resistiva. Para el cálculo de la inductancia se usa la siguiente expresión:

$$Z = j\omega L \quad (3.1)$$

Donde:

Z = Impedancia de un inductor

$\omega = 2\pi f$

L = Valor de la inductancia

Sustituyendo los valores conocidos de frecuencia e impedancia, podemos decir que nuestra antena tiene un valor de inductancia de $2.25 \mu\text{H}$. Para conseguir una resonancia a 12 MHz es necesario cancelar dicha inductancia con un capacitor. Este valor de $2.25 \mu\text{H}$ es la inductancia generada por la antena, ahora se procede a calcular la capacitancia. A partir de los valores conocidos de frecuencia (12 MHz) e inductancia ($2.25 \mu\text{H}$), se emplea la ecuación (3.2) para determinar la misma.

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.2)$$

Despejando C de la fórmula y considerando que $w = 2\pi f$ quedaría de la forma siguiente:

$$C = \frac{1}{W^2 L} \quad (3.4)$$

$$C = \frac{1}{(2\pi \times 12 \times 10^6)^2 \times 2.25 \times 10^{-6}}$$

$$C = \frac{1}{1.28 \times 10^{10}}$$

$$C = 78 \text{ pF}$$

En la figura 3.5 se observa una simulación de nuestra antena a los 12 MHz en el CST Studio 2018. Se pueden observar datos como ganancia, patrón de radiación, eficiencia de radiación entre otros datos de interés.

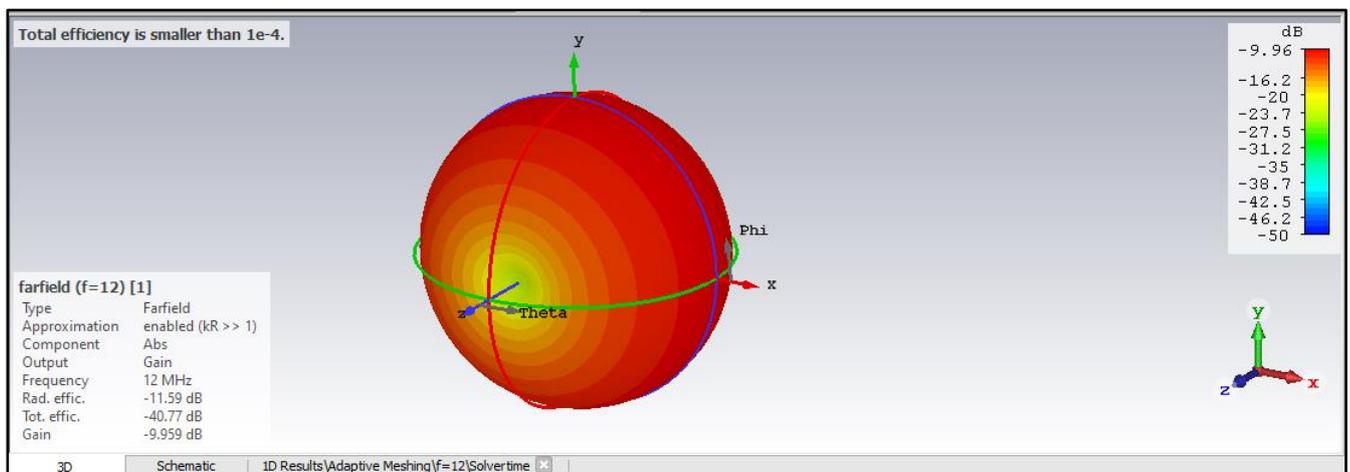


Figura 3.5: Campo magnético de la antena en campo lejano representado en el CST Studio.

3.2 Construcción de las antenas

Para la construcción de las antenas se compraron dos barras de conductor de alambre desnudo de aluminio de 8 mm de diámetro y 3366 mm de largo en la Distribuidora Metales Díaz. Cada barra se utilizó para la construcción de una antena, quedando 2 barras de 248 cm de largo cada una, cumpliendo así la condición propuesta ($l < 0.1\lambda$). Las barras se

doblaron en 4 lados iguales de 62 cm, con un corte de 4 cm para la alimentación en el centro de unos de sus lados. Para el doblaje de las antenas se usó la dobladora manual Swagelok, que dobla el tubo con alta calidad y se pueden hacer curvas simples, con cambio de plano [35]. En la próxima figura 3.6 se muestra la dobladora utilizada:

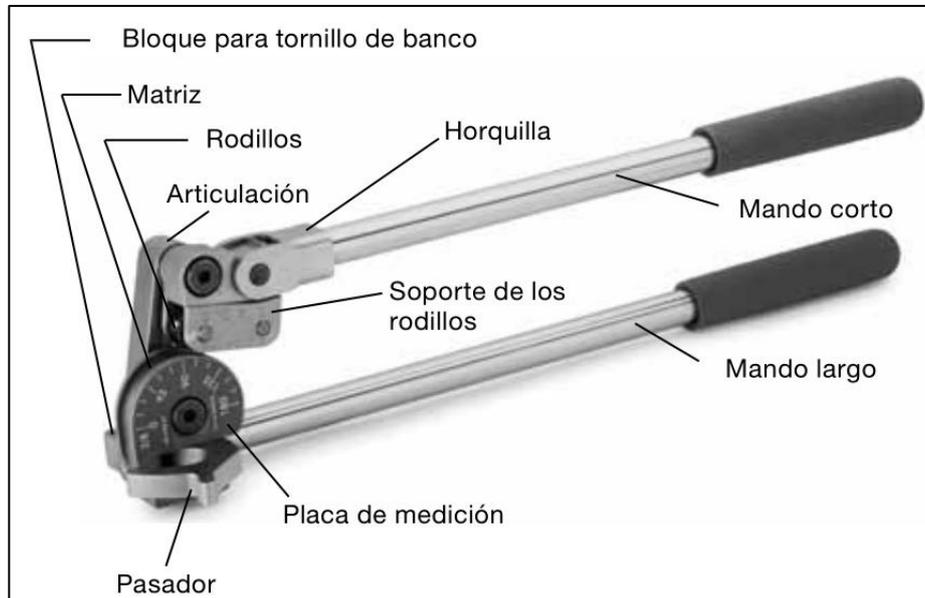


Figura 3.6: Dobladora de tubo manual Swagelok [35].

El uso de esta dobladora requiere de gran cuidado pues puede partir el material si se le aplica mucha fuerza, también hay tener mucho detalle para el doblaje pues el mismo puede ocurrir en el lugar incorrecto del material. Para que la construcción de las antenas quedara de forma óptima se descargó y estudió el manual de uso de dicha dobladora, el cual se adjunta en los anexos de este trabajo para futuras consultas. Las figuras 3.7 y 3.8 muestran el resultado final de la construcción de las antenas loops.



Figura 3.7: Construcción de una antena loop cuadrada de aluminio.

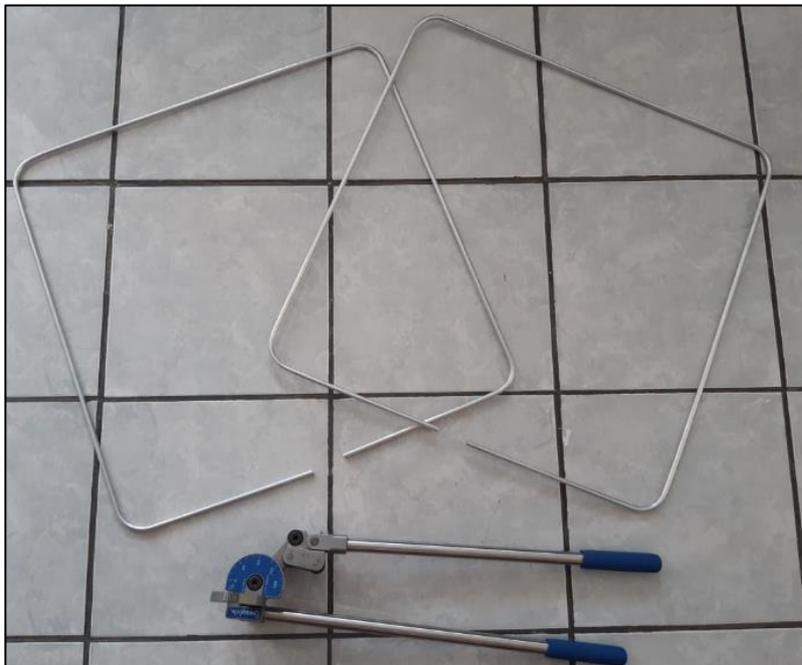


Figura 3.8: Antenas loop cuadradas de aluminio de 62 cm de lado.

3.2.1 Acoplamiento de Impedancia.

La impedancia de una antena depende de varios factores tales como la frecuencia de operación, la geometría, el método de excitación, etc. La impedancia es un valor complejo, que está compuesto por una parte real (resistencia de antena) y una parte imaginaria (reactancia). Podemos definir la impedancia de una antena en un punto, como la relación entre los campos eléctricos y magnéticos en ese punto; alternatively, en un par de terminales, se define como la relación entre el voltaje y la corriente a través de esos terminales [7]. El acoplamiento de impedancia es el proceso de eliminar las pérdidas por desacoplamiento. Es minimizar el coeficiente de reflexión, reducir la potencia reflejada por la carga (la antena) y maximizar la potencia entregada a la antena (generador de señales). Esta es una de las tareas fundamentales para hacer que una antena irradie y, por lo tanto, es uno de los temas más importantes en la teoría de antenas. Para hacer un circuito de acoplamiento de impedancia (Matching), se desea que el valor de la impedancia de la antena sea de 50Ω debido a que la mayoría de los equipos de prueba tienen una impedancia de ese mismo valor.

Una vez calculados los parámetros de la antena hay que saber cuál es la impedancia de entrada (Z_L) de la misma para poder hacer el matching y lograr la máxima transferencia de potencia. Para eso es necesario conectar la antena a un analizador de redes para poder hacer mediciones bidireccionales de los parámetros S_{11} , S_{21} , S_{12} y S_{22} en componentes pasivos, así como su impedancia de entrada, etc. El analizador de redes vectoriales (VNA), que se empleó fue Rohde & Schwarz, que es uno de los equipos de medición de RF y microondas más esenciales en el mundo, además de ser el equipo ocupado para este trabajo, ubicado en la Facultad de Ciencias de la UNAM. Un analizador de red vectorial de Rohde & Schwarz es la herramienta perfecta para analizar componentes pasivos y activos, como filtros, amplificadores, mezcladores y módulos multipuerto.

Los analizadores de red tienen tiempos de medición cortos debido a los sintetizadores rápidos, anchos de banda de IF amplios y alto rango dinámico, posee además un asistente de medición para una fácil configuración de mediciones multipuerto y balanceadas, calibración automática con unidad de calibración. Realiza un amplio barrido de potencia para el análisis de señales grandes y pequeñas en un barrido. Son fáciles de configurar, fáciles de calibrar, fáciles de medir. El analizador trabaja con un rango de frecuencia de 100 KHz a 4.5 GHz [36].

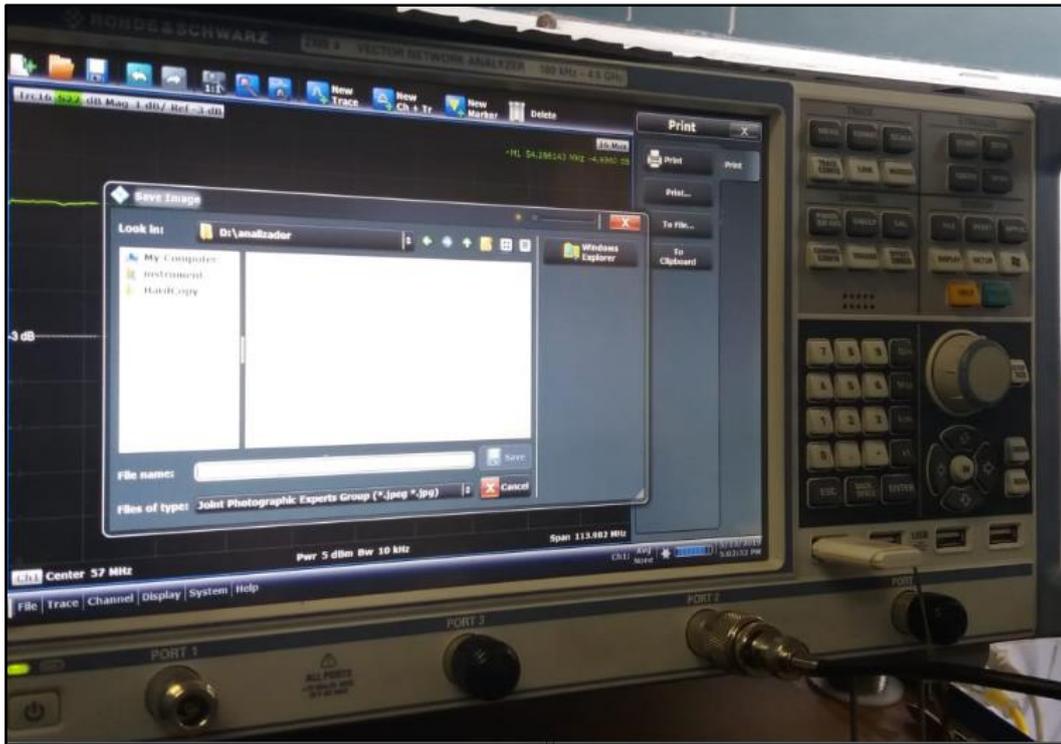


Figura 3.9: Analizador de redes Rohde & Schwarz usado para este trabajo.

3.2.2 Circuito de Matching.

Para la medición de la antena en el analizador de redes se diseñó un circuito impreso con el cálculo de la capacitancia que se hizo anteriormente, $C = 78 \text{ pF}$ con el objetivo de lograr una medición exitosa sin tener que manipular el elemento radiante y así no introducir errores ni ruido en la medición. Además, es una ventaja tener dicha placa pues permite tener bien ubicados y fijos los componentes electrónicos para realizar el matching de la antena. Para cumplir con estos requerimientos se empleó una placa fenólica para circuito impreso, un taladro marca Dremel y una solución para grabar circuitos impresos (cloruro férrico). Se utilizó un conector SMA hembra PCB de ángulo recto para fijarlo a la placa impresa y así ofrecer mejor estabilidad a la hora de medir la antena en el analizador de redes. Los conectores SMA son muy económicos y su impedancia característica es de 50Ω , pudiendo llegar a una relación de onda estacionaria (VSWR) igual a 1:1.5. Estas características permiten que no se pierda el acople de impedancia de la antena con el generador de señales y así mantener la máxima transferencia de potencia.

La figura 3.10 muestra como quedó la placa con las perforaciones necesarias para comenzar a colocarle los componentes y el resto de los elementos utilizados.

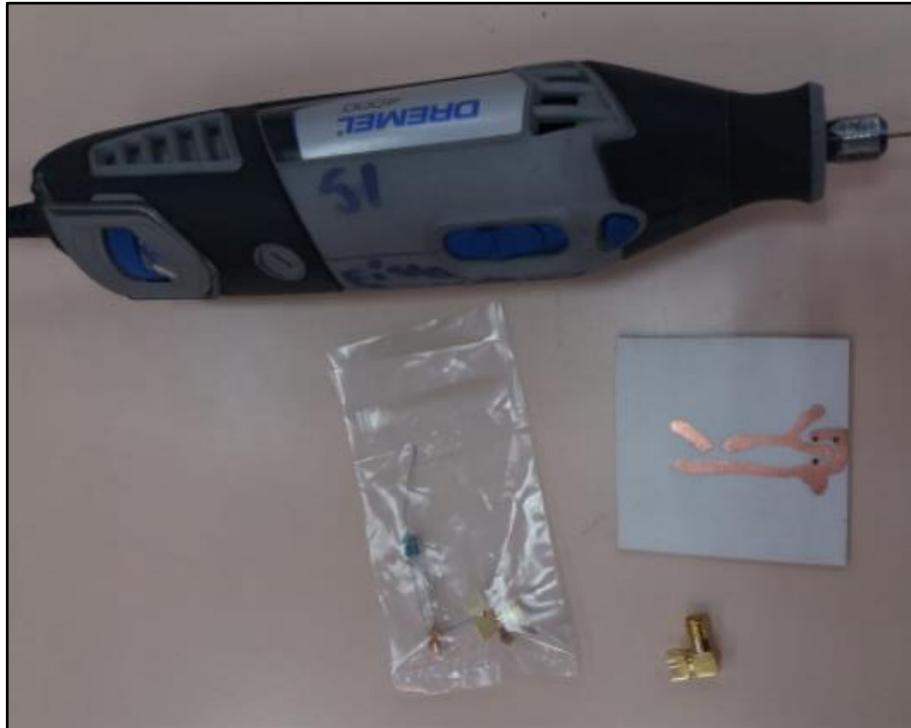


Figura 3.10: Placa impresa y componentes para el circuito matching de la antena.

La figura 3.11 muestra el resultado final del circuito. La antena se fijó luego de cortar minuciosamente la mitad del conductor de forma horizontal y posteriormente perforarlo con el taladro Dremel, quedando dos aberturas en los bordes de la antena. Luego se emplearon unos tornillos para fijar la antena a la placa fenólica. Para asegurar el contacto de la antena con el circuito se amarraron sendos alambres conductores a las cabezas de los tornillos y se soldaron a la placa. Además, se puso un puente (de un alambre conductor) en serie por si fuera necesario más adelante seguir aumentando la capacitancia de la antena.

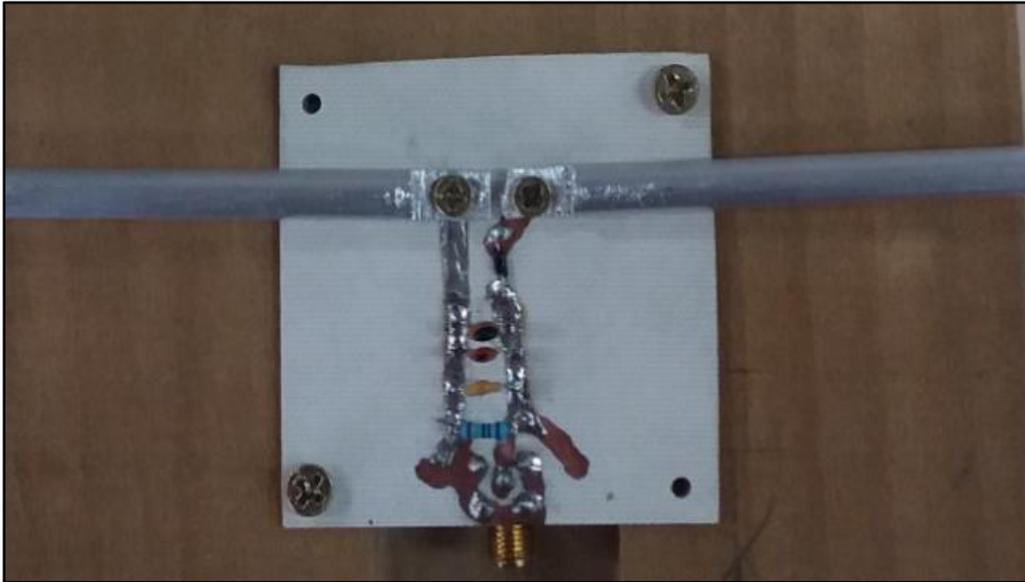


Figura 3.11: Placa impresa y componentes para el circuito matching de la antena.

Una vez creadas todas las condiciones para la conexión de la antena, la misma se conectó al Rohde & Schwarz y se comenzaron a medir los parámetros. En la siguiente figura 3.12 se muestra la frecuencia de resonancia a la que está respondiendo la antena.

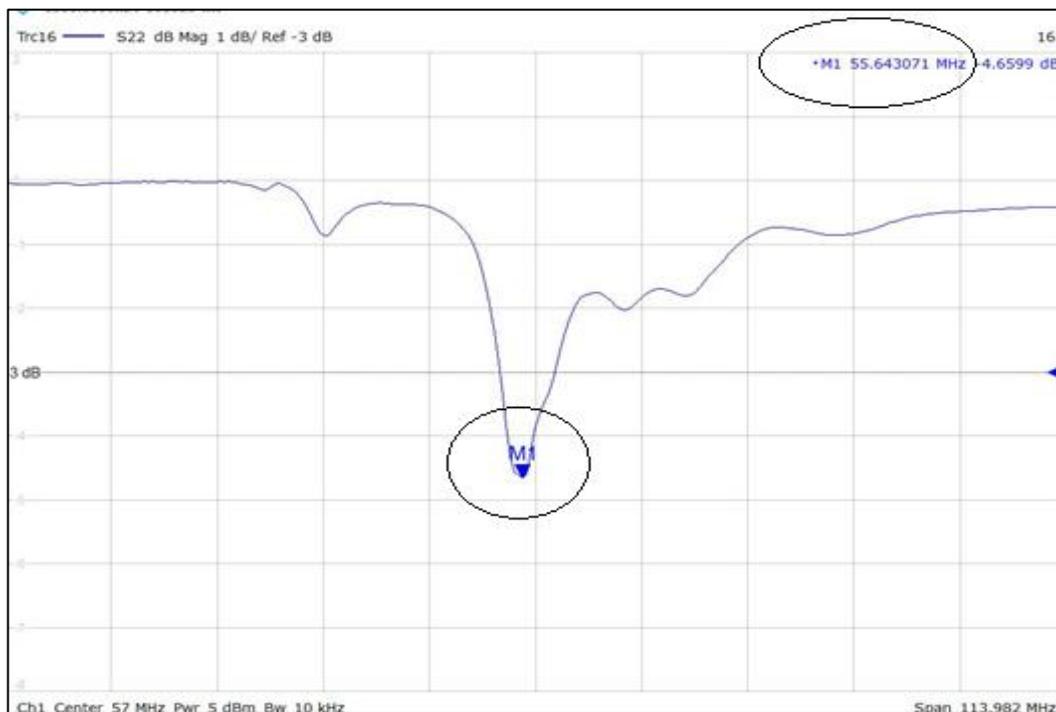


Figura 3.12: Medición de la antena en el Rohde & Schwarz.

Se puede observar la frecuencia (circulada en negro) a la que está respondiendo la antena (55.6 MHz), que es un valor muy superior a la frecuencia en la que se realizaron los cálculos (12 MHz). Además, se observan las fluctuaciones de la gráfica que significan que la antena está respondiendo a varios modos (frecuencias de resonancia), es decir hay mucho ruido, por lo que se debe ajustar la misma para que solo responda a los 12 MHz. Aunque se puede observar que la señal está por debajo de los 3dB, en ese sentido nuestra antena está correcta. Para poder ajustar la antena a una frecuencia de resonancia, se debe evaluar su comportamiento sobre la Carta Smith, devolviendo los valores de impedancia de la antena, compuestos por la resistencia y la reactancia ($Z = R + jX$), e inductancia sobre la antena. Pues estas dos propiedades son las que van a determinar que un sistema entre en resonancia.

La carta de Smith utiliza dos diagramas; el primero representa el plano complejo del coeficiente de reflexión y el segundo representa las Impedancias o Admitancias Normalizadas. La figura 3.13 muestra como la antena está devolviendo mucha señal al generador, es decir que no tiene una impedancia de 50 ohmios por lo cual no hay acoplamiento. La impedancia que mide el analizador es de ($Z_L = 18,268 - j24,251$), como podemos ver, la reactancia (parte imaginaria), no es igual a cero por lo que no hay máxima transferencia de potencia y la reactancia de la antena es capacitiva por encontrarse en la parte inferior de la Carta de Smith y se puede identificar por el signo negativo de la parte imaginaria. Como se puede apreciar existen diferencias entre las simulaciones en el software CST Studio y las mediciones reales con el analizador de espectros. Nuestra antena está respondiendo a una frecuencia superior por lo que muestra valores de impedancia de la antena diferente a los obtenidos durante la simulación, aunque es entendible por la frecuencia a la cual está respondiendo.

Dados estas mediciones hay que realizar varios cambios para obtener los resultados deseados. Primeramente, hay que disminuir la frecuencia a la que está respondiendo la antena, esto lo podemos realizar teniendo en cuenta la relación que existe entre la capacitancia e inductancia con la frecuencia. El valor de capacitancia calculado fue de $C = 78 \text{ pF}$, por lo que se debe poner un valor superior a este para garantizar que la frecuencia se establezca fija en los 12 MHz o al menos lo más cercana a este valor. La parte real de la impedancia de la antena 18,268 ohmios hay que llevarlos a los 50 ohmios para que exista acople de impedancia.

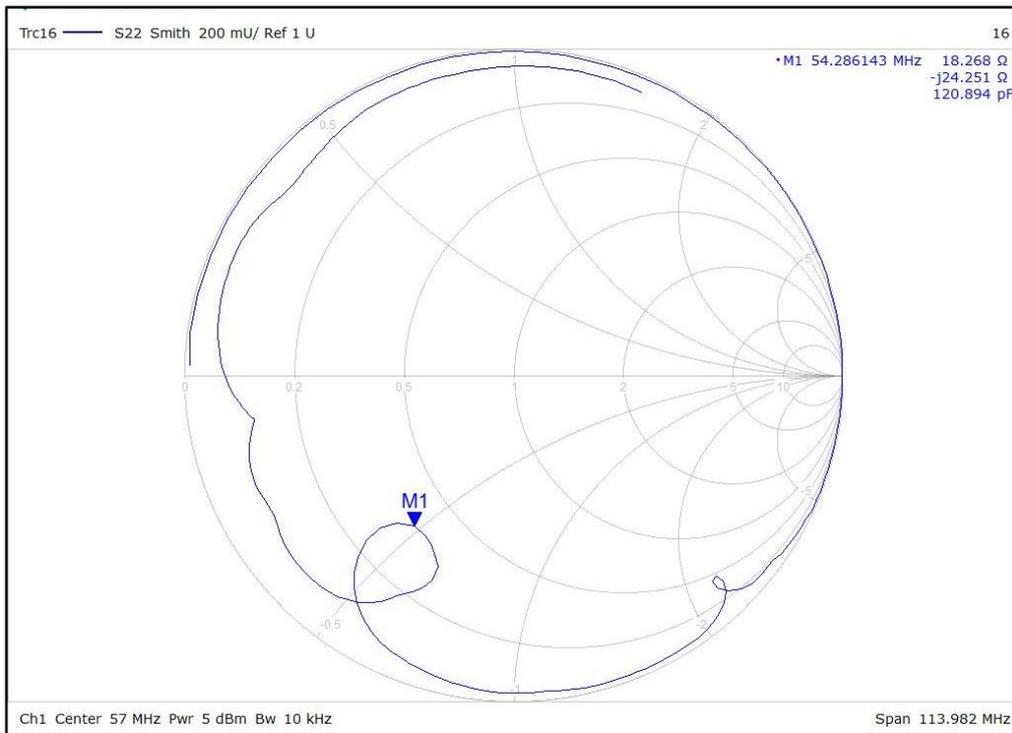


Figura 3.13: Impedancia de la antena representada en la Carta de Smith.

Para bajar la frecuencia se sustituyó el puente en serie por un capacitor de 10 pF y se eliminó la resistencia que, aunque limitaba el factor Q contribuía al aumento de la frecuencia y se agregó otro capacitor de 100 pF. El circuito quedó como lo muestra la figura 3.14. La frecuencia de resonancia si disminuyó demostrando que el aumento de la capacitancia contribuye a disminuir la frecuencia.

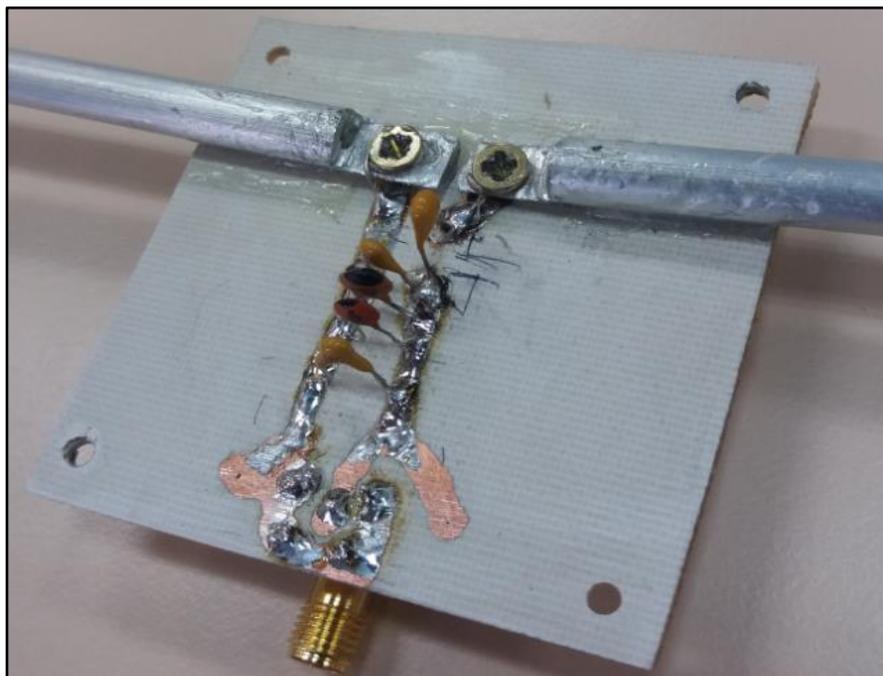


Figura 3.14: Circuito matching final de la antena.

Con los cambios realizados se puede apreciar que ya los valores de frecuencia oscilan por los 15 MHz que están muy cercanos al valor deseado de 12 MHz (ver figura 3.15), aunque todavía no es el óptimo.

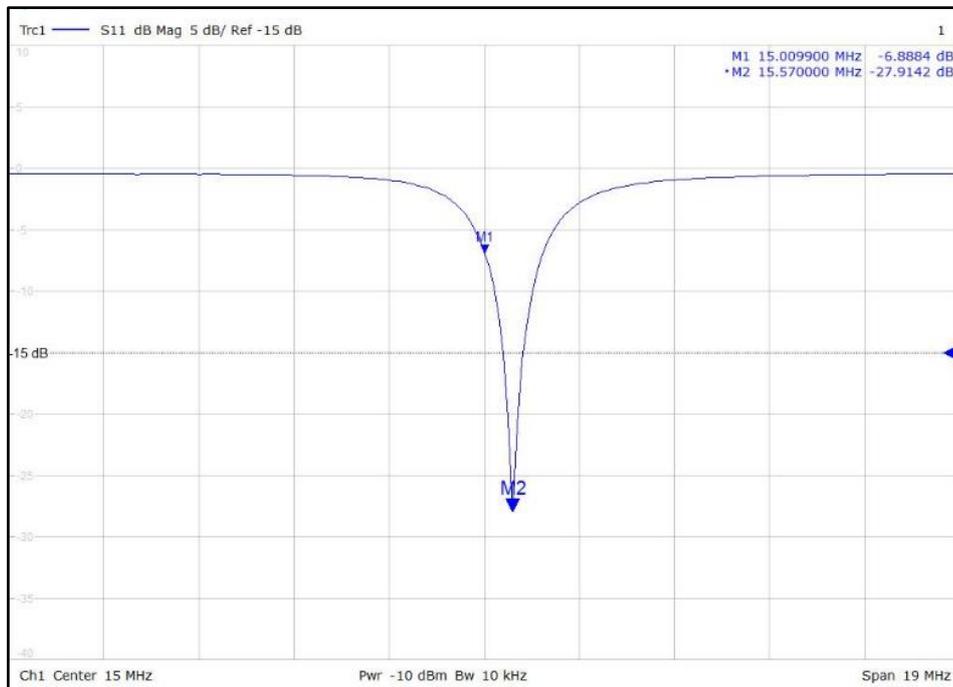


Figura 3.15: Medición de la antena con 188 pF.

La figura anterior nos muestra nuestra antena respondiendo a una frecuencia muy cercana a la deseada para este trabajo investigativo. Finalmente agregando 22 pF más se pudo obtener respuesta a 12.2398 MHz, (ver figura 3.16).

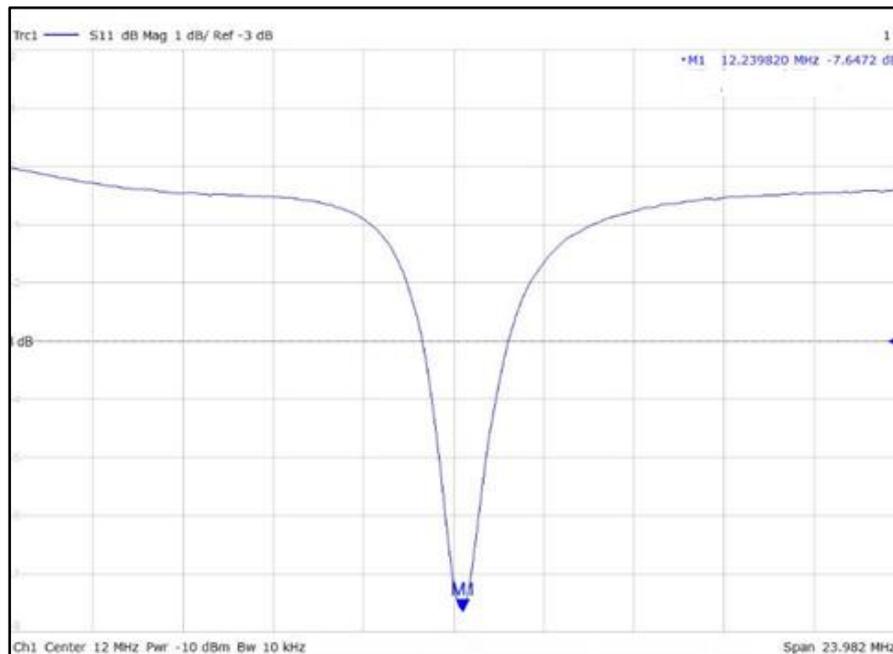


Figura 3.16: Antena loop respondiendo a los 12 MHz.

La antena responde bien a los 12 MHz, tiene una parte real de 49.728 ohmios, muy cerca de los 50 ohmios deseados para que exista acople perfecto de impedancia, aunque presenta una parte reactiva inductiva, o sea que no está en completa resonancia. Pero para los fines que se utilizaría y la distancia entre la antena transmisora y la receptora, que es de 1m según todos los estándares internacionales que rigen la verificación de blindaje electromagnético, esta antena está apta para su uso y lograría buenos resultados.

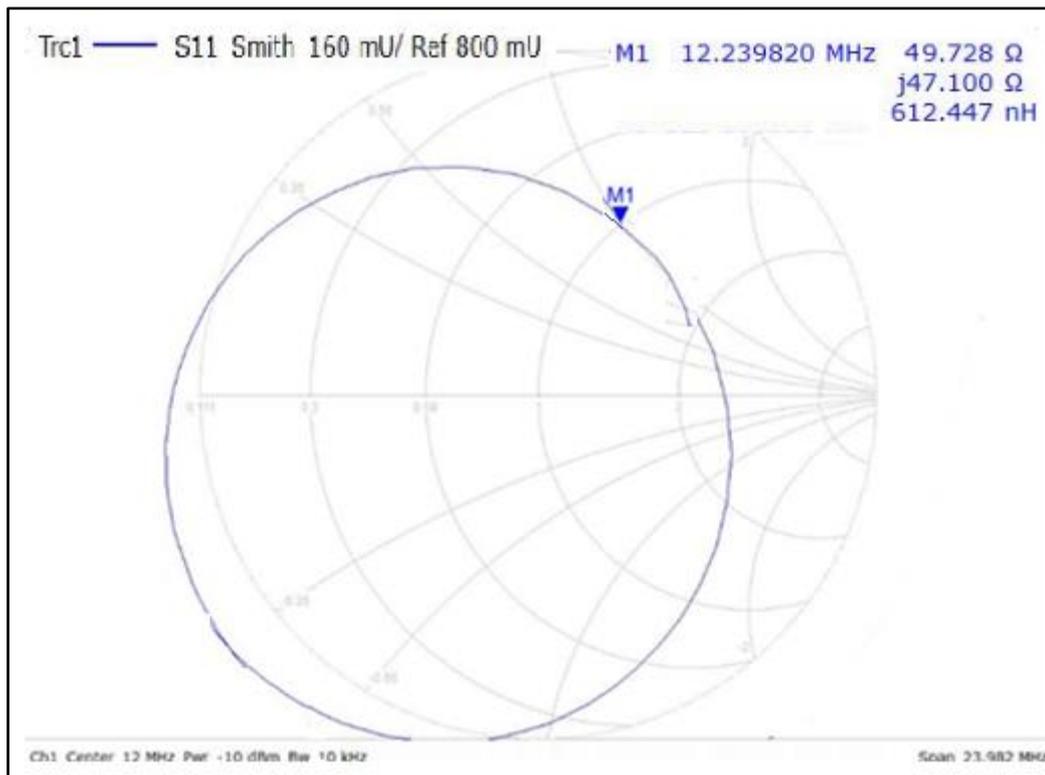


Figura 3.17: Carta de Smith para 12 MHz.

Logrando el acople de la antena y la sintonización a los 12 MHz, se han alcanzado los objetivos propuestos en este trabajo. Esta antena es una variante efectiva para las antenas loops circulares en la medición de campo electromagnético. Es recomendable realizar mediciones en un ambiente controlado, libre de interferencias, para el desempeño de dicha antena en otros parámetros. Luego se recomienda realizar una propuesta de protocolo para la medición de campo magnético en una sala de resonancia magnética.

CONCLUSIONES

La tecnología de verificación de blindaje electromagnético necesita patrones de directividad omnidireccionales para poder encontrar las fallas en el blindaje, además requiere antenas loops eléctricamente pequeñas para un mejor desempeño. Después de la culminación de este trabajo investigativo podemos deducir las siguientes conclusiones:

- Se logró analizar todos los estándares internacionales que rigen la verificación de blindaje electromagnético para determinar puntos comunes en cuanto a tipos de antenas, distancias de medición y rango de frecuencias.
- Se investigó que existen pocas empresas que brindan el servicio de verificación de blindaje de bajo campo para salas de resonancia magnética.
- Se concluyó que el servicio de verificación de blindaje electromagnético es costoso a nivel mundial y requiere de personal capacitado.
- Se comprobó que las antenas loops cuadradas son una alternativa funcional para la verificación de blindajes electromagnético de bajo campo.
- Se logró simular y construir una antena loop cuadrada resonante a los 12 MHz para verificación de salas de resonancia magnética de bajo campo.
- Se propone continuar las mediciones reales de la antena en una sala semi-anechoica para ver el resultado de esta en un ambiente controlado.
- Se propone realizar un protocolo de verificación de blindaje de bajo campo para el uso de las antenas loops cuadradas.
- Se recomienda usar dichas antenas in situ en una clínica u hospital que tenga salas de resonancia para ver el funcionamiento de las antenas.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] **Hernández, Manuel Reta.** *Tesis “Verificación de efectividad de blindaje Electromagnético por teorema de Reciprocidad”*. California, E.U.A , 1 de Agosto de 1992.
- [2] **Pérez, Felipe Ignacio Ríos.** *Tesis “Análisis y modelación de blindaje electromagnético para sala de microscopio electrónico de transmisión (T.E.M.)”*. Santiago de Chile, marzo de 2009.
- [3] **A. Noel Palacio, S. Mecho Meca, L. Berrocal, V. Muñoz Martínez, M. Villarreal Salcedo, L. Ramos Amador.** *Potencial diagnóstico y limitaciones de la RM de bajo campo en músculo-esquelético*. 31 Congreso Nacional SERAM, 2012.
- [4] **Kunkel, George.** *“Historical Methods of Testing EMI Gaskets”*. IEEE, 2014.
- [5] **Birtha, L. Hooks. Y Daniel W. Aughinbaugh.** *Electromagnetic Shielding Measurements-NMR.I Enclosure*. University of Alabama at Birmingham, 21 de diciembre 1984.
- [6] **145-1973, Revision of ANSI/IEEE STD.** *IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas*. IEEE.
- [7] **Balanis, C.** *“Antenna Theory, analysis and design”, Third edition*. 2005
- [8] **Pérez, Jaime Anguera y Antonio.** *Teoría De Antenas, “Guía de estudio”*. 2008.
- [9] **Milligan, Thomas A.** *“Modern Antenna Design. Second Edition”*. New Jersey,2005.
- [10] “Página web **Nikolova, Natalia K.** *“Introduction into Antenna Studies”*. Accedida septiembre 20, 2019. Disponible en <http://www.antentop.org/cont002.htm>.
- [11] **John D. Kraus, Ronald J. Marhefka.** *“Antennas for All Applications” Third Edition*. Tata McGraw-Hill , 1997.
- [12] **Ángel Cardama, Lluís Jofre, Jose Manuel Rius y Sebastián Blanch.** *“Antenas”. Segunda edición*. Ediciones UPC, septiembre del 2002.
- [13] **Hemming, Leland H.** *“Architectural Electromagnetic Shielding Handbook”*. New York. IEEE, 1992.
- [14] **Gnecco, Louis T.** *“Design of Shielded Enclosures: Cost-Effective Methods to Prevent EMI”*. 2000.
- [15] **Frederick M. Tesche, Michel V. Ianoz, Torbjörn Karlsson.** *“EMC Análisis Methods and Computacional Models”*. Canada. Wiley- Interscience, 1997.
- [16] **Abiega, Alberto de.** *“Proyecto de ejecución implantación de resonancia magnética Hospital Universitario Donostia”*. Junio, 2018.
- [17] **O, Rodríguez A.** *Principles of magnetic resonance imaging”*. Revista Mexicana Física, junio 2004.

- [18] **Alfredo Odón Rodríguez-González, Ricardo Amador-Baheza, Rafael Rojas-Jasso, Fernando Alejandro Barrios-Álvarez.** “*Antenas superficiales para imágenes por resonancia magnética*”. Revista Médica del IMSS, junio de 2005.
- [19] “Página web **Apuntes de electromedicina**”. Accedida octubre 9, 2019. Disponible online en: <https://www.pardell.es/resonancia-magnetica.html>.
- [20] **Liang ZP, Lauterbur Paul C.** “*Principles of magnetic resonance imaging: a signal processing perspective*”. New York, USA : SPIE Press and IEEE Press, 2000.
- [21] **Ping Song, He Gao, Baojun Zhao, Aiguo Zhang, Feng Liu.** “*Classification of different walnut varieties using low-field nuclear magnetic resonance technology and cluster analysis*”. Noviembre 2019
- [22] “Página web JRE Test”. Accedida diciembre 3, 2019. Disponible online en: <https://jretest.com/product/jre-hpss-1>
- [23] “Página web JRE Test”. Accedida diciembre 6, 2019. Disponible online en: <https://jretest.com/product/jre-sta-1>
- [24] “Página web JRE Test”. Accedida diciembre 6, 2019. Disponible online en: <https://jretest.com/product/jre-tvk>
- [25] “Página web Blindajes Electromagnéticos Dalde”. Accedida diciembre 9, 2019. Disponible online en: <http://www.dalde.com.ar>
- [26] “Página web Tekemi”. Accedida diciembre 9, 2019. Disponible online en: <https://www.tekemi.com>
- [27] “Página web MPB we Electronic”. Accedida enero 10, 2020. Disponible online en: <http://www.gruppompb.uk.com>
- [28] **Rajamani, V. and Bunting, C.F.** “*Validation of modal/MoM in shielding effectiveness studies of rectangular enclosures with apertures*”. International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2005.
- [29] “**Military standard. Attenuation measurements for enclosures, electro-magnetic shielding, for electronic test purposes, Method of.**” Washington : US Government PrintingOffice, 25 Junio de 1956. MIL-STD 285.
- [30] “**Standard Method for Measuring the Effectiveness of Electromagnetic Shielding Enclosures**”. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 9 Diciembre 1997. IEEE Std-299.
- [31] “**Anechoic chambers. Part 1. Shield attenuation measurement**”. European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC), Enero 1997. BS EN 50147-1.
- [32] **Salvatore Celozzi, Rodolfo Araneo, Giampiero Lovat.** “*Electromagnetic Shielding*”. Roma : Electrical Engineering Division – DIAEE. University of Roma "La Sapienza", 2008.
- [33] “**National Security Agency. Specification for shielded enclosures**”. National Security Agency, Fort George G. Meade, 24 Octubre 1994. NSA 94-106.

- [34] “Página web CST Studio Suite”. Accedida febrero 18, 2020. Disponible online en: [https:// www.cst.com](https://www.cst.com).
- [35] “Página web Swagelok—TM Swagelok Company”. Accedida febrero 20, 2020. Disponible online en: [https:// www.swagelok.com.mx](https://www.swagelok.com.mx).
- [36] “Página web Rohde & Schwarz”. Accedida febrero 20, 2020. Disponible online en: <https://www.rohde-schwarz.com>.
- [37] **Wilver rodolfo domínguez solares.** Trabajo de graduación: *“diseño e implementación de técnicas de mantenimiento preventivo, correctivo y predictivo para equipos de imágenes médicas obtenidas por resonancia magnética”*. Guatemala, junio 2013.