

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**INTERFERENCIA ELECTROMAGNÉTICA EN
LAS ANTENAS DE TELECOMUNICACIONES**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

Marco Tulio Herrarte Romero
Asesorado por el Phd. Ing. Enrique Edmundo Ruiz Carballo

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRÓNICO

GUATEMALA, JUNIO 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Julio Rolando Barrios Archila
EXAMINADOR	Ing. Julio César Solares Peñate
EXAMINADOR	Ing. Carlos Enrique Guzmán Salazar
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

INTERFERENCIA ELECTROMAGNÉTICA EN LAS ANTENAS DE TELECOMUNICACIONES

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, el 23 de enero de 2009.



Marco Tulio Herrarte Romero



Guatemala, 26 de MAYO 2011.

Ingeniero
Carlos Eduardo Guzmán Salazar
Coordinador Area de Electrónica
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería USAC.

Estimado Ingeniero:

Por este medio le informo que he revisado el trabajo de graduación titulado: INTERFERENCIA ELECTROMAGNÉTICA EN LAS ANTENAS DE TELECOMUNICACIONES, elaborado por el estudiante Marco Tulio Herrarte Romero.

El mencionado trabajo llena los requisitos para dar mi aprobación, e indicarle que el autor y mi persona somos responsables por el contenido y conclusiones de la misma.

Atentamente,

Ing. Enrique Edmundo Ruiz Carballo

ASESOR

Enrique E Ruiz C

INGENIERO ELECTRICIST.
COL. No 2225



Ref. EIME 36. 2011
Guatemala, 7 de JUNIO 2011.

FACULTAD DE INGENIERIA

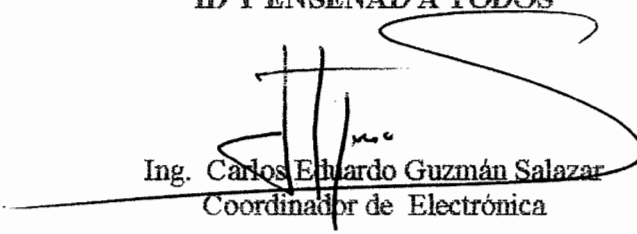
Señor Director
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

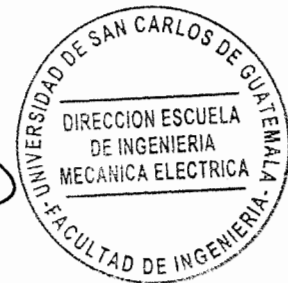
**Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
INTERFERENCIA ELECTROMAGNÉTICA EN LAS ANTENAS DE
TELECOMUNICACIONES, del estudiante Marco Tulio Herrarte
Romero, que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.**

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑADA TODOS


Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar
Coordinador de Electrónica

CEGS/sro





REF. EIME 15. 2012.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; Marco Tulio Herrarte Romero titulado: INTERFERENCIA ELECTROMAGNÉTICA EN LAS ANTENAS DE TELECOMUNICACIONES, procede a la autorización del mismo.


Ing. Guillermo Antonio Puentes Romero

GUATEMALA, 9 DE ABRIL 2012.





El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **INTERFERENCIA ELECTROMAGNÉTICA EN LAS ANTENAS DE TELECOMUNICACIONES**, presentado por el estudiante universitario **Marco Tulio Herrarte Romero**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, junio de 2013

/cc

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por darme la oportunidad de vivir y alcanzar mis metas a quien dedico mi carrera, mis logros y mis éxitos.
Mi madre	Silvia Esmeralda Romero Vides por apoyarme en todos mis objetivos, habiéndome educado con amor y ser mi mayor pilar en esta vida.
Mi asesor	Enrique Edmundo Ruiz Carballo por la estupenda ayuda y consejo brindado para culminar este trabajo de graduación.
Mis amigos	Julio David Morales Romero, José Andrés Grajeda, Héctor Rodolfo Morales Rabanales, Jorge Alejandro Meza Morales, Miguel Ventura Pérez, Pedro Fernando Morales Almazán, Rafael Barrios Chocooj y el resto con quienes compartí la alegría y emoción de ver un proyecto funcionando y las desveladas que nos tomaba hacerlo.
Maria José Solares	Por animarme y alentarme a terminar mi trabajo de graduación. ¡Gracias por todos los recordatorios!
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por haberme brindado la oportunidad de ser parte de esta casa de estudios.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
GLOSARIO	VII
RESUMEN.....	XXI
OBJETIVOS.....	XXIII
INTRODUCCIÓN.....	XXV
1. ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS.....	1
1.1. Origen y formación.....	1
1.1.1. Ecuaciones de Maxwell.....	2
1.1.2. Corriente de desplazamiento	5
1.2. El espectro electromagnético.....	7
1.2.1. Ondas de radio	9
1.2.2. Microondas	9
1.2.3. Radiación infrarroja.....	10
1.2.4. Ondas visibles.....	10
1.2.5. Radiación ultravioleta.....	11
1.2.6. Rayos X	11
1.2.7. Rayos gamma.....	12
1.2.8. Rayos cósmicos.....	12
1.3. El sonido.....	14
1.3.1. Intensidad del sonido	15
1.3.2. Tono.....	16
1.3.3. Timbre.....	17

2.	ANTENAS.....	19
2.1.	Función de una antena	20
2.2.	Características de las antenas.....	22
2.2.1.	Patrón de radiación.....	22
2.2.2.	Ganancia.....	24
2.2.3.	Directividad	25
2.2.4.	Impedancia	26
2.2.5.	Polarización	27
2.3.	Tipos de antenas	30
2.3.1.	Antenas dipolo	31
2.3.2.	Antenas dipolo multielemento	31
2.3.3.	Antenas yagui	32
2.3.4.	Antenas panel plano	33
2.3.5.	Antenas parabólicas	34
2.3.6.	Antena de ranura	35
2.3.7.	Antenas microstrip	35
3.	INTERFERENCIA ELECTROMAGNÉTICA.....	37
3.1.	Interferencia.....	38
3.2.	Interferencia electromagnética (EMI).....	38
3.2.1.	Interferencia electromagnética intencionada.....	40
3.2.2.	Interferencia electromagnética no intencionada.....	40
3.3.	Causas de interferencia electromagnética.....	42
3.3.1.	Emisiones de banda estrecha.....	43
3.3.2.	Emisiones de banda ancha.....	44
3.3.3.	Fuentes naturales de EMI.....	45
3.3.3.1.	Máximo solar	45
3.3.3.2.	Mínimo solar	46

3.3.4.	Fuentes de EMI provocadas por el hombre	47
3.3.5.	Receptores de EMI	49
3.3.6.	Compatibilidad electromagnética (EMC).....	50
3.3.7.	Ruido	53
3.3.7.1.	Ruido térmico	54
3.3.7.2.	Ruido de intermodulación.....	55
3.3.7.3.	Diafonía (<i>crosstalk</i>).....	55
3.3.7.4.	Ruido de intermodulación.....	56
3.3.8.	Señal a ruido.....	57
3.3.9.	Teorema de Shannon	60
3.3.10.	Interferencia de radiofrecuencia.....	61
3.3.10.1.	Interferencia co-canal en el receptor	62
3.3.10.2.	Interferencia adyacente en el receptor	62
3.3.10.3.	Interferencia fuera de banda en el receptor...	63
3.3.10.4.	Emisiones de fundamental en el transmisor..	64
3.3.10.5.	Emisiones de armónicos en el transmisor	65
3.3.10.6.	Ruido de transmisión.....	65
3.3.10.7.	Intermodulación en el transmisor.....	66
4.	MÉTODOS DE REDUCCIÓN DE EMI.....	67
4.1.	Control de EMI.....	68
4.1.1.	Eliminación de la fuente de interferencia	70
4.1.2.	Blindaje	70
4.1.3.	Conexión a tierra.....	74
4.1.4.	Filtrado.....	76
4.1.5.	Elementos magnéticos para reducción de EMI y EMC	80
4.1.5.1.	Inductores	80
4.1.5.2.	Bobinas.....	81
4.1.5.3.	Transformadores.....	82

4.1.5.4.	Supresores de ruido de ferrita.....	83
4.1.6.	Aislamiento	86
4.1.6.1.	Aislamiento óptico.....	87
4.1.6.2.	Aislamiento electromagnético	88
4.1.6.3.	Aislamiento capacitivo	88
4.1.7.	Orientación y polarización en las antenas.....	89
4.1.7.1.	Comunicaciones de radiodifusión	89
4.1.7.2.	Comunicaciones tierra-aire-tierra.....	90
4.1.7.3.	Comunicaciones punto a punto.....	91
4.1.8.	Separación y posicionamiento de las antenas	92
4.1.8.1.	Peligros de la radiación de radiofrecuencia	97
4.1.8.2.	Consideraciones del terreno	98
4.1.8.3.	Consideraciones generales	98
4.1.9.	Técnica de difusión del espectro – <i>spread spectrum</i>	99
CONCLUSIONES		103
RECOMENDACIONES.....		105
BIBLIOGRAFÍA.....		107

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Representación gráfica de una onda electromagnética	3
2.	Diagrama de condensador polarizado de placas paralelas.....	5
3.	Representación gráfica del espectro electromagnético	7
4.	Longitud de onda en el espectro electromagnético.....	8
5.	Compresión y rarefacción de las ondas sonoras	15
6.	Propagación de una onda entre antena transmisora y receptora	21
7.	Patrones de radiación	23
8.	Características de radiación de las antenas	24
9.	Antena como adaptador de impedancias.....	27
10.	Representación de la polarización trazada por el campo eléctrico	28
11.	Representación en 3D de una polarización circular	29
12.	Elementos que componen una antena yagui	32
13.	Reflexión en una antena parabólica.....	34
14.	Interferencias intencionadas y no intencionadas	41
15.	Elementos que intervienen en un problema de EMI	43
16.	Máximo y mínimo solar	47
17.	Fuentes de EMI naturales y provocadas por el hombre.....	48
18.	Estructura de la compatibilidad electromagnética	52
19.	Ruido blanco codificado en FLAC y MP3 respectivamente.....	54
20.	Diafonía entre dos líneas de transmisión	56
21.	Errores provocados por ruido de impulso en una señal digital.....	57
22.	Señal original sin ruido y con ruido	59
23.	Blindaje de tinta conductora de plata	72

24.	Cable con blindaje de aluminio	73
25.	Conexión a tierra en una torre de telecomunicaciones	75
26.	Configuración de condensador de paso	77
27.	Circuito L con inductor a un lado.....	78
28.	Circuito PI con dos condensadores rodeando un inductor.....	78
29.	Circuito T con un inductor a cada lado del condensador	79
30.	Inductor toroidal LPT-4545.....	81
31.	Transformador serie LPE.....	83
32.	Supresores de ruido de ferrita.....	83
33.	Circuito equivalente de impedancia de ferrita en el sistema	85
34.	Circuito con aislamiento óptico	88
35.	Vista superior de una antena polarizada verticalmente	92
36.	Espectro de señal no modulada y señal modulada de 40MHz	100

TABLAS

I.	Valores aproximados del espectro electromagnético.....	13
II.	Parámetros básicos entre distintos tipos de antenas.....	36
III.	Clasificación de las fuentes de EMI provocadas por el hombre.....	49
IV.	Distancias de separación en antenas receptoras	94

GLOSARIO

Ahusado	Que gradualmente disminuye su tamaño de una punta de un objeto a la otra.
Amplitud modulada (AM)	Modulación en el que la amplitud de una onda portadora varía de acuerdo con alguna característica de la señal de entrada.
Antena	Dispositivo eléctrico utilizado para enviar o recibir ondas electromagnéticas.
Antena omnidireccional	Antena que irradia energía en todo su contorno en todas direcciones.
ASK	Siglas en inglés de <i>amplitud shift keying</i> , que en español se traduce a modulación por desplazamiento de amplitud, la cual es una forma de modulación que representa datos digitales, como variaciones en la amplitud de una onda portadora.
Atenuar	Disminuir la amplitud de una señal electrónica.

Azimuth	Distancia horizontal angular desde una dirección de referencia, normalmente el punto norte del horizonte, hasta el punto en un círculo vertical a través de un cuerpo celeste que intersecta el horizonte, generalmente se mide en sentido horario.
Banda ancha	Transmisión de datos simétricos que permite enviar diversos paquetes de información de manera simultánea para aumentar la velocidad de transmisión efectiva.
Banda estrecha	Describe un canal en el que el ancho de banda del mensaje no excede significativamente el ancho de banda coherente del canal. Se considera generalmente para cubrir las frecuencias 300-3400 Hz.
Bluetooth™	Tecnología de red inalámbrica que utiliza frecuencias de onda corta de radio para interconectar teléfonos celulares, computadoras portátiles y otros dispositivos electrónicos inalámbricos.
Bucle	Forma de repetición de una declaración, un número indeterminado de veces en un circuito cerrado.

Campo eléctrico	Campo de fuerza creado por la atracción y repulsión de cargas eléctricas, las cuales son la causa del flujo eléctrico, y se mide en voltios por metro (v/m).
Campo magnético	Campo de fuerza creado como consecuencia del movimiento de cargas eléctricas. La fuerza o intensidad de un campo magnético se mide en Gauss (G) o Tesla (T). Los campos magnéticos son producidos por corrientes eléctricas, que pueden ser corrientes macroscópicas en los cables o corrientes microscópicas asociadas a los electrones en las órbitas atómicas.
Carga eléctrica	Cantidad de electricidad no contrarrestada que hay en un objeto, la cual puede ser positiva o negativa. Consiste en un exceso o en una falta de electrones.
Condensador	Dispositivo eléctrico caracterizado por su capacidad para almacenar carga eléctrica.
Corriente de desplazamiento	Corriente que se desplaza en el vacío, espacio libre, o en un dieléctrico, donde existe la presencia de campo eléctrico que cambia o varía con el tiempo.

Corriente eléctrica	Medida de la cantidad de carga eléctrica transferida por unidad de tiempo. Representa el flujo de electrones a través de un material conductor.
<i>dBi</i>	Abreviatura de decibelio isotrópico, es una medida que se utiliza para medir la ganancia de una antena en referencia a una antena isotrópica teórica.
Decibelio	Unidad utilizada para expresar la intensidad de una onda de sonido, lo que equivale a 20 veces el logaritmo decimal del cociente de la presión producida por la onda de sonido a una presión de referencia. Se abrevia como dB o db.
Demodulación	Acto o proceso por el cual una onda de salida o señal, se obtiene teniendo las características de la señal u onda modulada original.
Dipolo	Par de cargas eléctricas o polos magnéticos, de igual magnitud, pero de signo opuesto o polaridad, separados por una pequeña distancia.
Electrostático	Cargas eléctricas estacionarias en el que no fluye corriente.

EMC	Siglas en inglés de <i>electromagnetic compatibility</i> , lo cual en español se traduce a compatibilidad electromagnética.
EMI	Siglas en inglés de <i>electromagnetic interference</i> , lo cual significa interferencia electromagnética en el idioma español.
Espurio	Falta de autenticidad y validez en esencia u origen, siendo falso y careciendo de genuinidad.
FLAC	Siglas en inglés de <i>free lossless audio codec</i> , que en español se traduce a codificador-decodificador de audio libre de pérdida, el cual es un formato de codificación de audio sin pérdida de calidad.
Frecuencia	Número de repeticiones por unidad de tiempo de una forma de onda completa, a partir de una corriente eléctrica.
Frecuencia modulada (FM)	Modulación en el que la frecuencia instantánea de una onda portadora se produce a partir de la frecuencia central en una cantidad proporcional al valor instantáneo de la señal de modulación.

Frecuencia intermedia

Frecuencia a la cual una frecuencia de onda portadora se desplaza como un paso intermedio en el proceso de transmisión o recepción, creándose mediante la mezcla de la señal portadora con un oscilador local.

FSK

Siglas en inglés de *frequency shift keying* (modulación desplazamiento de frecuencia), es una forma de modulación de frecuencia en la que la onda moduladora desplaza la frecuencia de salida entre los valores predeterminados correspondientes a las frecuencias de fuentes correlacionadas.

GHz

Abreviatura de giga hertz, que equivale a 1 000 000 000 hertz y que puede ser descrito como mil millones de ciclos por segundo, siendo ésta una unidad de medida para las frecuencias de las ondas.

Guía de onda

Dispositivo utilizado como conductor o transmisor direccional que controla la propagación de una onda electromagnética de modo que la onda se ve obligada a seguir una trayectoria definida por la estructura física de la guía, como un conducto, tubo metálico, cable coaxial, o hebra de fibras de vidrio, entre otros.

IF	Siglas en inglés de <i>intermediate frequency</i> , que en español se traduce a frecuencia intermedia.
Impedancia	Medida de la oposición total al flujo de corriente en un circuito de corriente alterna, consta de dos componentes, la resistencia óhmica y reactancia, generalmente representados en notación compleja como $Z = R + iX$, donde R es la resistencia óhmica y X es la reactancia.
Inducción magnética	Producción de una fuerza electromotriz debido a la variación del flujo magnético, consistiendo en la aparición de una corriente eléctrica en un conductor cuando éste atraviesa perpendicularmente un campo magnético.
Infrarrojo	Parte del espectro invisible que es colindante con el extremo rojo del espectro visible y que comprende la radiación electromagnética de longitudes de onda de 800 nm y 1 mm.
Isotrópico	Característica de los cuerpos que poseen las mismas características físicas en todas las direcciones.

ILO	Siglas en inglés de <i>local oscillator</i> , que en español se traduce a oscilador local.
Longitud de onda	Medida en la dirección de propagación de una onda, entre dos puntos sucesivos de la onda que se caracterizan por la misma fase de oscilación en ciclos consecutivos de la onda.
Magnetismo	Fuerza de atracción o repulsión que actúa entre los materiales magnéticos como el hierro, la cual ejerce fuerza sobre cargas eléctricas en movimiento o sobre alambres que las conducen como corriente eléctrica.
Masa coronal	Masa solar que durante el período de máxima actividad solar, el plasma inicialmente contenido en las líneas cerradas del campo magnético coronal, es eyectado hacia el espacio interplanetario.
MHz	Abreviatura de mega hertz lo que equivale a 1 000 000 hertz y que puede ser descrito como un millón de ciclos por segundo, siendo ésta una unidad de medida para las frecuencias de las ondas.

Modulación	Proceso de colocar la información contenida en una señal, generalmente de baja frecuencia, sobre una señal de alta frecuencia, siendo el proceso una alteración sistemática de una onda portadora de acuerdo con el mensaje (señal modulada).
Monopolo magnético	Partícula hipotética física con un sólo polo magnético.
MP3	Formato de audio derivado de MPEG-1 capa de audio 3, el cual consiste en un algoritmo de compresión con pérdida, que elimina ciertas frecuencias que el oído humano no puede escuchar.
Onda electromagnética	Forma de propagación de la radiación electromagnética a través del espacio, compuesto por una onda eléctrica o campo eléctrico, y una onda magnética o campo magnético. Los campos están en movimiento dinámico y las ondas se encuentran en fase a 90° una de la otra.
Permeabilidad magnética	Capacidad de un medio o sustancia de atraer y permitir el paso de los campos magnéticos a través de sí.

Permitividad

Propiedad de un material de polarizarse en respuesta a un campo eléctrico aplicado.

PLL

Abreviatura de *phase-locked loop* que en español significa bucle de fase cerrado, el cual es un circuito electrónico que compara una frecuencia de entrada y fase, a una señal de referencia, generando luego una tensión proporcional a la diferencia entre la entrada y la referencia.

PSK

Siglas en inglés de *phase shift key*, que en español se traduce a modulación por desplazamiento de fase, consiste en una técnica simple de modulación digital que utiliza dos diferentes ángulos de fase para 0 y 1.

QAM

Siglas en inglés de *quadrature amplitud modulation*, lo cual en español se traduce a modulación de amplitud por cuadratura, es una técnica de modulación que emplea la modulación en fase y la modulación de amplitud.

Radar	Dispositivo que se utiliza para determinar la presencia y la ubicación de un objeto midiendo el tiempo en que el eco de una onda de radio vuelve, y la dirección en la que regresa.
Radiación electromagnética	Combinación de campos magnéticos y eléctricos oscilantes, que se propagan a través del espacio transportando energía de un lugar a otro.
Radiofrecuencia	Gama de frecuencias electromagnéticas por encima del rango audible y por debajo de la luz infrarroja (de 10 kHz a 300 GHz).
RF	Abreviatura en inglés de <i>radio frequency</i> , que en español se traduce a radio frecuencia.
SSB	Siglas en inglés de <i>single side band</i> que en español se traduce a Banda Lateral Única, es un tipo de modulación AM en donde se suprime una de las bandas laterales superior o inferior de una frecuencia portadora para ahorrar potencia.
Supresión	Eliminación de un componente de una emisión variable, como la eliminación de una frecuencia o grupo de frecuencias de una señal.

Taxonomía	Ciencia o técnica de clasificación sistemática de leyes o principios.
<i>Thyratron</i>	Cualquiera de varios tipos de válvulas termoeléctricas utilizadas como interruptor de alta velocidad, compuestas de un tubo de electrones o cátodo caliente, que contiene gas de baja presión o vapor de metal, en el que una o más rejillas controlan el inicio del flujo de corriente.
Transductor	Dispositivo capaz de transformar una magnitud física en una señal eléctrica.
Transitorio	Período de transición determinado para cambiar las condiciones del estado de un elemento.
Ultravioleta	Banda invisible de radiación en el extremo superior del espectro de luz visible. Con longitudes de onda de 10 a 400 nm, la luz ultravioleta (UV) se inicia al final de la luz visible y termina a principios de rayos-X.
V/M	Unidad estándar de la fuerza del campo eléctrico, el cual está dado por voltios por metro.

WiFi

Nombre de una tecnología de red inalámbrica que utiliza ondas de radio para ofrecer una alta velocidad de red y conexiones a Internet.

WLAN

Siglas en inglés de *wireless local area network*, que en español se traduce a red de área local inalámbrica, la cual es una red de comunicaciones que proporciona conectividad a los dispositivos inalámbricos dentro de un área geográfica limitada.

RESUMEN

Para poder entender el significado de interferencia electromagnética, primero es necesario comenzar por entender cómo se propagan las ondas electromagnéticas en los diferentes medios de transmisión y guías de onda, para posteriormente aplicar el concepto de interferencia en las antenas de telecomunicaciones, que es el punto central de este trabajo de graduación.

De igual manera, es necesario estudiar y comprender qué es una antena, cómo funciona, para qué sirve y de qué manera se ve afectada en la radiación electromagnética de agentes externos al sistema.

Los equipos de telecomunicaciones son cada vez más versátiles y eficaces, pero debido a que es demasiada la demanda y competencia por abarcar el mercado, éstos se ven limitados al tener que operar rodeados de otros equipos y señales que de una u otra forma, generan interferencia. Cabe mencionar también, que en algunas regiones aún se siguen utilizando equipos con tecnología obsoleta, los cuales al no tener compatibilidad con la nueva tecnología, provocan interferencias entre los equipos, creando así una incompatibilidad electromagnética.

Al entender mejor el significado de interferencia electromagnética en las antenas de telecomunicaciones, sus fuentes, causas y efectos, se puede establecer una conclusión sobre las diversas formas para evitarla, minimizar su impacto en los sistemas afectados y validar las diferentes propuestas para reducir su incidencia.

Básicamente se busca la manera de que todos los equipos de telecomunicaciones operen de manera óptima, sin recibir, ni entregar, ningún tipo de interferencia entre los muchos otros equipos eléctricos, mecánicos, electrónicos, etc. que se encuentren cerca del perímetro de funcionamiento entre ellos.

OBJETIVOS

General

Estudiar los efectos de la interferencia electromagnética en las antenas de telecomunicaciones.

Específicos

1. Estudiar la radiación electromagnética y aprender a diferenciar el ruido de la interferencia.
2. Analizar el comportamiento de los equipos afectados por la interferencia electromagnética.
3. Conocer la función de los equipos de telecomunicaciones, para identificar el problema.
4. Analizar la estructura básica de las razones y el por qué de la interferencia electromagnética.
5. Estudiar los métodos utilizados, para la minimización del problema.
6. Analizar y comprender el estudio del comportamiento de la interferencia en las antenas de telecomunicaciones.

7. Entender las propuestas y soluciones planteadas dentro del ambiente de las telecomunicaciones.

INTRODUCCIÓN

Desde los primeros años de la aparición del ser humano sobre esta tierra, el hombre ha tenido la necesidad de comunicarse, valiéndose de diferentes formas para hacerlo; pictogramas, métodos no verbales, señales de humo, etc. hasta que aprendió y desarrolló un lenguaje estructurado para darse a entender con los demás.

De igual manera, conforme avanza y evoluciona la tecnología, los seres humanos se ven involucrados directa o indirectamente en utilizar los recursos tecnológicos de esta era, que de alguna forma simplifican el modo de vida a medida que avanza la tecnología, siendo más dependientes de ella cada día. Tal es el caso de los equipos de telecomunicaciones que se utilizan para comunicarse con el mundo exterior a través de su infraestructura.

La electrónica, que en conjunto con otras ciencias, ha desarrollado sistemas que ayudan a resolver tareas complejas y fundamentales para las diferentes actividades diarias, como la comunicación con otras personas a través de dispositivos telefónicos, el Internet, correo electrónico, etc.

Gracias a los sistemas de telecomunicaciones, el hombre ha optimizado sus recursos y elevado sus oportunidades de tener un contacto más personalizado con el mundo, utilizando, por ejemplo, los equipos de teleconferencias, videoconferencias, Internet inalámbrico de alta velocidad (HSDPA), etc.

Debido a la expansión en la demanda de las comunicaciones electrónicas; los medios utilizados, así como los recursos tecnológicos, se ven afectados por la constante lluvia de emisiones electromagnéticas que se propagan en el espacio libre o a través de conductores, afectando de forma directa o indirecta los equipos empleados en las telecomunicaciones, tal es el caso de las antenas que se utilizan como transmisoras o receptoras de los mensajes de comunicación electrónica y que pueden verse afectadas ante cualquier tipo de ruido que provoque interferencia en forma de señal no deseada.

No obstante, las telecomunicaciones están desarrollándose de una manera exponencial, abarcando un campo enorme en el mercado, por lo que valdría la pena preguntarse, ¿quién no tiene un teléfono celular actualmente?

Debido a que las comunicaciones electrónicas se desplazan en forma de campos eléctricos y magnéticos variantes en el tiempo, éstas a su vez están expuestas desde la fuente hasta el destino, a energías externas no deseables que pueden traslaparse con otros sistemas de comunicaciones, volviéndose así un reto cada vez más complicado en la búsqueda de soluciones, para evitar la interferencia en el tan ya saturado medio de propagación.

1. ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

El electromagnetismo se define como la combinación de campos eléctricos y magnéticos alternos, creados por cargas aceleradas que se propagan a partir de dichas cargas a la velocidad de la luz en forma de ondas electromagnéticas o radiación. El medio ambiente terrestre se encuentra ampliamente afectado por diversos tipos de radiación, como son las ondas de energía, ondas de radio, microondas, infrarrojo, visible, ultravioleta, rayos X y rayos gamma.

1.1. Origen y formación

El mayor logro de la física teórica en el siglo XIX, probablemente fue el descubrimiento de las ondas electromagnéticas, cuyos fenómenos relacionados con el magnetismo y la electricidad fueron estudiados en gran parte en dicho siglo. La primera pista fue una inesperada conexión entre los fenómenos eléctricos y la velocidad de la luz.

Básicamente una onda electromagnética se forma, fundamentalmente, por las vibraciones existentes entre los campos magnéticos y eléctricos que la conforman.

Fue Hans Christian Orsted, quien a principios de 1820 se enteró que el magnetismo puede ser causado por cargas eléctricas en movimiento o corriente, cuando observó la aguja de un compás reaccionar ante una corriente que fluía a través de un alambre colocado cerca de él.

Luego, los descubrimientos realizados por Michael Faraday y Joseph Henry en 1830, sobre la inducción electromagnética en donde está involucrado el concepto de campo magnético cambiaron el espacio en el cual las fuerzas magnéticas eran observadas, mostrando que un campo magnético que varía en el tiempo – como el producido por una corriente alterna (C.A.) – puede conducir una corriente eléctrica y viceversa. De esa manera surgió la gran interrogante, ¿Sería posible que el espacio libre soportara un movimiento de onda alterno entre ambos, campo magnético → corriente eléctrica → campo magnético → corriente eléctrica →...?

Hubo entonces un bloqueo, dicha onda no podría existir en el espacio vacío, porque el espacio vacío no tiene cables de cobre y no podría llevar las corrientes necesarias para completar el ciclo anterior.

James Clerk Maxwell, resolvió el acertijo en 1861 proponiendo que las ecuaciones de la electricidad necesitaban un término más, representando una corriente eléctrica que puede viajar por el espacio vacío, pero sólo para oscilaciones muy rápidas.

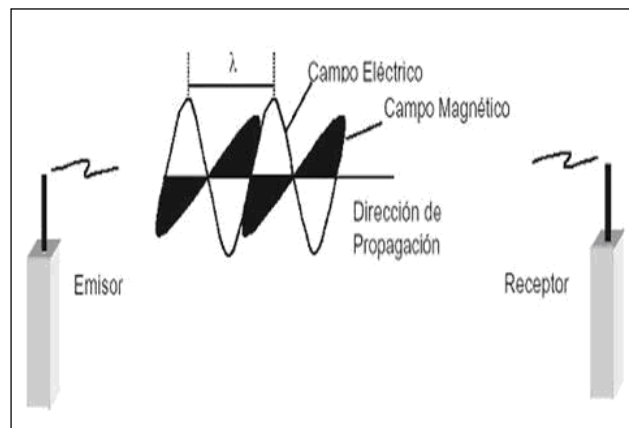
Con el término añadido, denominado como corriente de desplazamiento, las ecuaciones de la electricidad y el magnetismo permitieron a una onda existir, propagándose a la velocidad de la luz.

1.1.1. Ecuaciones de Maxwell

Las ecuaciones de Maxwell describen los campos eléctricos y magnéticos derivados de las diferentes distribuciones de las cargas eléctricas y corrientes, y cómo dichos campos varían en el tiempo.

En la figura 1 se puede observar la existencia y alternación entre un campo magnético y un campo eléctrico, siendo éstos ortogonales entre sí, propagándose desde una antena emisora hacia una receptora.

Figura 1. **Representación gráfica de una onda electromagnética**



Fuente: elaboración propia, con programa Snagit 11 Editor.

La propia contribución de Maxwell es sólo el último término de la última ecuación, se hizo evidente por primera vez que los campos eléctricos y magnéticos variables podían alimentarse unos a otros, dichos campos podrían propagarse indefinidamente a través del espacio, lejos de las cargas variables y corrientes donde se originaron. Maxwell nombró al nuevo término como corriente de desplazamiento.

Las cuatro ecuaciones fundamentales de Maxwell son:

- Ley de Gauss para campos eléctricos: el flujo del campo eléctrico saliente sobre un área encerrando un volumen, es igual a la carga neta encerrada.

$$\int \vec{E} \cdot d\vec{A} = q / \epsilon_0.$$

- Ley de Gauss para campos magnéticos: no existe carga magnética, lo que significa que no hay monopolos.

$$\int \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0.$$

- Ley de Faraday de la inducción magnética: el cambio total de tensión de un circuito, es generado por un campo magnético variable roscado a través del circuito.

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -d/dt \left(\int \vec{B} \cdot d\vec{A} \right).$$

- Ley de Ampere más la corriente de desplazamiento de Maxwell: un campo eléctrico variante en el tiempo, forma un campo magnético.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \left(I + \frac{d}{dt} \left(\epsilon_0 \int \vec{E} \cdot d\vec{A} \right) \right).$$

Siendo el término $\mu_0 \epsilon_0 \frac{d\phi E}{dt}$ la corriente de desplazamiento.

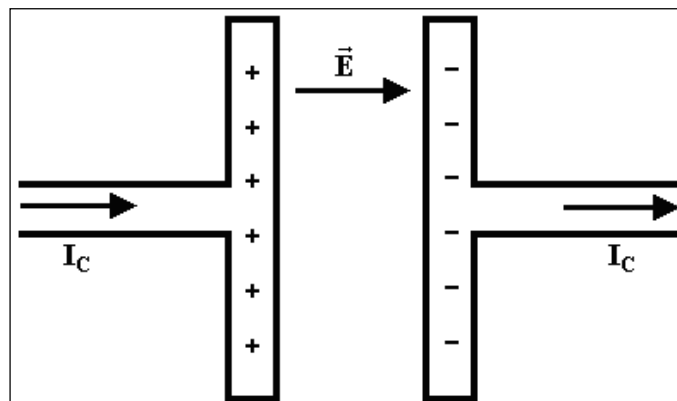
1.1.2. Corriente de desplazamiento

La ley de Ampere predice la existencia de un campo magnético de una forma muy precisa, pero Maxwell se percató de que aún faltaba una pieza.

Basándose en las leyes de la conservación de la energía, Maxwell notó que un condensador está formado por dos placas conductoras separadas por una distancia entre ellas, y mientras el condensador se carga, éste acumula carga positiva en una placa y carga negativa en la otra placa, pero sin el paso de ninguna corriente entre las placas. Esto indicaría que no existe un campo magnético en ese punto.

Un condensador es esencialmente, una brecha en un circuito, pero debido a su naturaleza, el circuito sigue estando completo. En la figura 2 se puede observar un condensador de placas paralelas separadas por una distancia, polarizado por la dirección de la corriente en donde E representa el campo eléctrico existente entre las placas.

Figura 2. Diagrama de condensador polarizado de placas paralelas



Fuente: elaboración propia, con programa Paint.

Sin embargo, otro circuito cerrado podría ser seleccionado para el mismo punto que pasa a través de uno de los cables conectados al condensador – la ley da libertad de escoger el propio circuito cerrado – y dado que la corriente fluye en el cable, la ley indicaría claramente que ahí había un campo magnético en ese punto. Es evidente que esto no podía ser, así que algo tenía que faltar.

Maxwell nombró al término faltante corriente de desplazamiento, a pesar de que en realidad no es una corriente en absoluto, sino que es el campo eléctrico cambiante en el condensador. Desde que la carga se está acumulando en las placas del condensador, hay un campo eléctrico entre las placas.

Maxwell completó la ecuación ahora llamada la ley de Ampere-Maxwell, introduciendo el siguiente término:

$$\mu_0 \varepsilon_0 \frac{d\phi E}{dt}$$

Donde:

μ_0 = permeabilidad magnética en el vacío

ε_0 = permitividad del vacío

ϕE = flujo de campo eléctrico

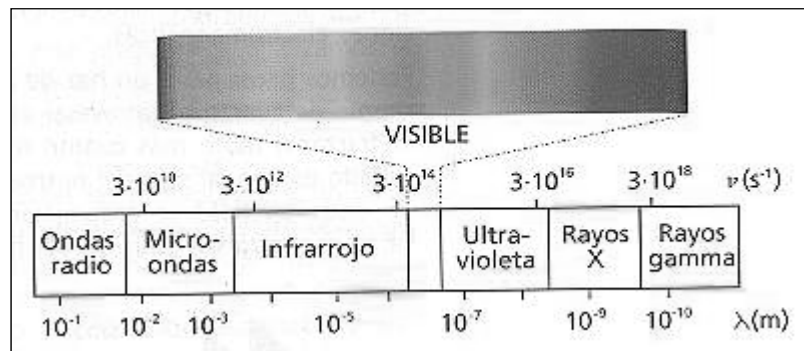
Con su última adición a la ley de ampere, y la formulación de las otras tres leyes, Maxwell completó la teoría de la electricidad y el magnetismo. Sorprendentemente, utilizando sólo las cuatro ecuaciones anteriormente descritas, es posible explicar todos los fenómenos conocidos en una escala macroscópica. Las ecuaciones ayudaron a Hertz a descubrir y probar la existencia de la onda de radio, Einstein por su parte, afirmó que las ecuaciones de Maxwell lo guiaron hacia el descubrimiento de la relatividad.

1.2. El espectro electromagnético

El espectro electromagnético es una clasificación de todas las ondas electromagnéticas que se propagan de manera ondulatoria, por medio de su longitud de onda y frecuencia. Cada sección del espectro abarca valores característicos de los niveles de energía, longitud de onda y frecuencias asociadas con sus fotones, ordenando así la radiación electromagnética.

Las ondas electromagnéticas se dividen desde las ondas de longitud más corta hasta las de mayor longitud, siendo éstas en orden de menor energía a mayor; las ondas de radio, microondas, radiación infrarroja, luz visible, radiación ultravioleta, rayos X y rayos gamma.

Figura 3. Representación gráfica del espectro electromagnético



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Word 2003.

La figura 3 muestra la distribución de los distintos tipos de ondas electromagnéticas de acuerdo a su longitud de onda y frecuencia.

La frecuencia y la longitud de onda son inversamente proporcionales, por ello su producto siempre es constante e igual a la velocidad de la luz.

La relación entre la frecuencia y la longitud de onda es:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

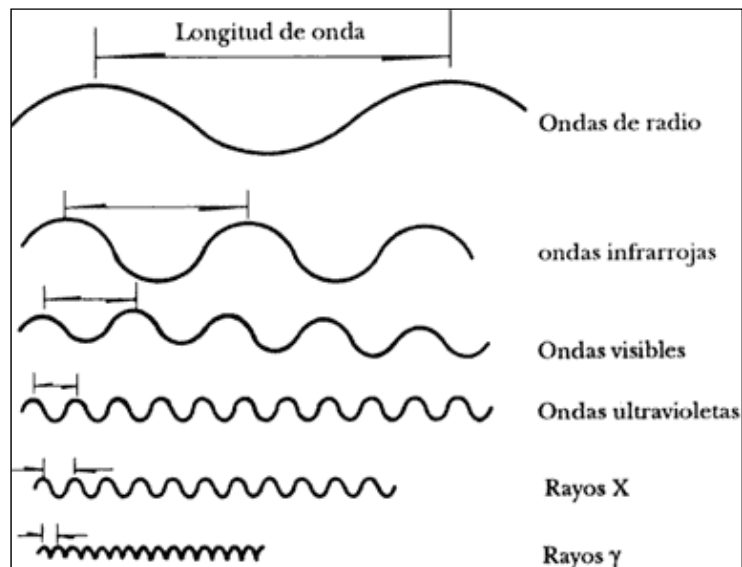
Donde:

λ = longitud de onda (lamba)

f = frecuencia

c = velocidad de la luz (aproximadamente 300 000 Km. / seg.)

Figura 4. **Longitud de onda en el espectro electromagnético**



Fuente: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/126/htm/sec_5.htm.

Consulta: 15 de diciembre de 2012.

En la figura 4 se puede observar cómo la longitud de onda varía en tamaño para los distintos tipos de onda según su clasificación.

Cada función de onda lleva asociada una energía, por lo tanto, a mayor frecuencia mayor es la energía transportada.

1.2.1. Ondas de radio

Las ondas de radio conocidas, también, como ondas de radiofrecuencia, cubren una amplia gama de frecuencias en el espectro electromagnético, contenidas desde los 1.5×10^3 Hz (1500 Hz) a los 3.0×10^{11} Hz (300 GHz) aproximadamente. Dentro de ese rango del espectro se incluyen las ondas que permiten la transmisión de señales de radio de amplitud modulada (AM) y frecuencia modulada (FM), incluyendo televisión, teléfono móvil, GPS (*Global Positioning System* – Sistema de Posicionamiento Global), controles para gobierno de equipos remotos, hornos microondas, radar, etc.

1.2.2. Microondas

Las microondas son buenas para transmitir información de un lugar a otro, porque la energía de las microondas puede penetrar en la niebla, lluvia, nieve, las nubes o el humo. Son utilizadas en la teledetección por radar, como el radar doppler utilizado en las previsiones meteorológicas, así como en los hornos microondas utilizados para calentar alimentos.

El radar fue desarrollado para detectar objetos y determinar su rango (o posición) mediante la transmisión de breves ráfagas de microondas.

Las microondas tienen longitudes de onda que pueden medirse en centímetros.

1.2.3. Radiación infrarroja

La radiación de los rayos infrarrojos fue descubierta por el astrónomo alemán William Herschel en 1800, y se encuentra en la porción del espectro electromagnético que se extiende desde el rango de microondas para el extremo rojo de la gama de luz visible.

La mayoría de la radiación emitida por una superficie ligeramente calentada, es la radiación infrarroja producida por la excitación molecular. Cualquier molécula, cuya temperatura sea superior a 0° Kelvin (cero absoluto y equivale a -273° C), emite rayos infrarrojos.

Las longitudes de onda infrarroja son utilizadas en equipos de control remoto, visión nocturna, misiles buscadores de calor, así como la astronomía de infrarrojos. La captura de la radiación infrarroja por los gases de la atmósfera es también la base del efecto invernadero.

1.2.4. Ondas visibles

Las ondas de luz visible son las únicas ondas electromagnéticas que el ser humano puede ver. Éstas se ven como los colores del arco iris, en donde cada color tiene una longitud de onda diferente; por ejemplo, el color rojo tiene la mayor longitud de onda y el color violeta tiene la menor longitud de onda. Cuando todas las ondas visibles se reúnen, producen la luz blanca.

Cuando la luz blanca brilla a través de un prisma, la luz blanca se descompone en los colores del espectro de luz visible, siendo el caso el vapor de agua en la atmósfera rompiendo las longitudes de onda y formando de esa manera un arco iris.

1.2.5. Radiación ultravioleta

La radiación ultravioleta (UV) tiene longitudes de onda más corta que la luz visible. Aunque estas ondas son invisibles para el ojo humano, algunos insectos como el abejorro las pueden ver.

La mayor parte de los rayos emitidos por el sol, son del tipo ultravioleta, causantes de provocar quemaduras en la piel si se tiene una prolongada exposición a éstos, o bien de forma moderada contribuye a la creación de vitamina D en la piel. La capa de ozono que cubre la tierra actúa como un filtro natural para disminuir en gran medida esta radiación, pero debido a la contaminación, la capa de ozono ha disminuido su capacidad para filtrar estos rayos provocando erosiones y el derretimiento de los glaciares en los extremos polares del planeta.

Se pueden estudiar estrellas y galaxias, estudiando la radiación ultravioleta que emiten, al igual que el fenómeno de la aurora boreal en la tierra, el cual es causado por la emisión de partículas cargadas con radiación ultravioleta provenientes del sol al atravesar las líneas del campo magnético de la tierra.

1.2.6. Rayos X

Este tipo de radiación fue descubierta a finales del siglo XXVIII, por el físico alemán Wilhelm Röntgen y al igual que la radiación ultravioleta, los rayos X son invisibles para el ojo humano, pero pueden atravesar diferentes tipos de materiales, entre ellos el cuerpo humano.

Los rayos X se emplean fundamentalmente en el ámbito de la medicina para obtener radiografías, así como en investigaciones metalúrgicas, científicas y análisis de obras de arte.

La exposición a este tipo de radiación, es dañina para los seres vivos por lo que se emplea normalmente plomo para proteger al hombre cuando opera con aparatos que emiten rayos X, ya que este material bloquea esta radiación.

1.2.7. Rayos gamma

Este tipo de radiación se origina, principalmente, por el núcleo excitado de un átomo radioactivo, ya que en ciertas ocasiones después de que un núcleo a emitido partículas α y β , aún conserva energía que libera en forma de ondas electromagnéticas conocidas como rayos gamma (γ).

Las radiaciones gamma, contienen frecuencias extremadamente elevadas, liberando alta energía resultando perjudiciales para los seres vivos, pero si son controladas, pueden utilizarse como tratamiento para el cáncer o esterilización de instrumental médico y alimentos.

1.2.8. Rayos cósmicos

Proceden del espacio profundo, compuestos por frecuencias elevadas y altas carga de energía. Su exposición directa es mortal sin la protección de una escafandra como la que utilizan los cosmonautas.

Tabla I. Valores aproximados del espectro electromagnético

Espectro electromagnético	Frecuencia en hertz (Hz)	Longitud de onda en metros (m)	Energía en Jules (J)
Sonidos audibles	$2,0 \cdot 10^2 - 2,0 \cdot 10^3$	$1,0 \cdot 10^7 - 1,0 \cdot 10^5$	---
Ondas de radio de amplitud modulada (AM):			
<i>Frecuencia Muy Baja</i>	$1,5 \cdot 10^3 - 3,0 \cdot 10^4$	$1,0 \cdot 10^5 - 1,0 \cdot 10^4$	$< 1,9 \cdot 10^{-29}$
<i>Onda Larga (OL o LW)</i>	$3,0 \cdot 10^4 - 6,5 \cdot 10^5$	$1,0 \cdot 10^4 - 6,5 \cdot 10^2$	$> 1,9 \cdot 10^{-29}$
<i>Onda Media (OM o MW)</i>	$6,5 \cdot 10^5 - 1,7 \cdot 10^6$	$6,5 \cdot 10^2 - 1,8 \cdot 10^2$	$> 4,3 \cdot 10^{-28}$
<i>Onda Corta (OC o SW)</i>	$1,7 \cdot 10^6 - 3,0 \cdot 10^7$	$1,8 \cdot 10^2 - 1,0 \cdot 10^1$	$> 1,1 \cdot 10^{-27}$
Ondas de radio de frecuencia modulada (FM) y de televisión:			
VHF Frecuencia Muy Alta	$3,0 \cdot 10^7 - 3,0 \cdot 10^8$	$1,0 \cdot 10^1 - 1,0 \cdot 10^0$	$> 2,0 \cdot 10^{-26}$
UHF Frecuencia Ultra Alta	$3,0 \cdot 10^8 - 3,0 \cdot 10^9$	$1,0 \cdot 10^0 - 3,0 \cdot 10^{-2}$	$> 1,9 \cdot 10^{-25}$
<i>Microondas (microwaves)</i>	$3,0 \cdot 10^9 - 3,0 \cdot 10^{11}$	$3,0 \cdot 10^{-2} - 1,0 \cdot 10^{-3}$	$> 1,9 \cdot 10^{-24}$
Rayos infrarrojos (IR):			
<i>Lejanos</i>	$3,0 \cdot 10^{11} - 6,0 \cdot 10^{12}$	$1,0 \cdot 10^{-3} - 5,0 \cdot 10^{-6}$	$> 2,0 \cdot 10^{-22}$
<i>Medios</i>	$6,0 \cdot 10^{12} - 1,2 \cdot 10^{14}$	$5,0 \cdot 10^{-6} - 2,5 \cdot 10^{-6}$	$> 3,9 \cdot 10^{-21}$
<i>Cercanos</i>	$1,2 \cdot 10^{14} - 3,8 \cdot 10^{14}$	$2,5 \cdot 10^{-6} - 7,8 \cdot 10^{-9}$	$> 7,9 \cdot 10^{-20}$
Luz visible	$3,8 \cdot 10^{14} - 7,8 \cdot 10^{14}$	$7,5 \cdot 10^{-9} - 3,8 \cdot 10^{-9}$	$> 2,5 \cdot 10^{-19}$
Rayos ultravioleta (UV):			
<i>Cercanos</i>	$7,8 \cdot 10^{14} - 1,5 \cdot 10^{15}$	$3,8 \cdot 10^{-9} - 2,0 \cdot 10^{-9}$	$> 5,0 \cdot 10^{-19}$
<i>Extremos</i>	$1,5 \cdot 10^{15} - 3,0 \cdot 10^{16}$	$2,0 \cdot 10^{-9} - 1,0 \cdot 10^{-9}$	$> 9,9 \cdot 10^{-19}$
Rayos X	$3,0 \cdot 10^{16} - 3,0 \cdot 10^{20}$	$1,0 \cdot 10^{-9} - 1,0 \cdot 10^{-12}$	$> 1,9 \cdot 10^{-17}$
Rayos Gamma	$3,0 \cdot 10^{20} - 3,0 \cdot 10^{22}$	$1,0 \cdot 10^{-12} - 1,0 \cdot 10^{-14}$	$> 1,9 \cdot 10^{-14}$
Rayos Cósmicos	$> 3,0 \cdot 10^{22}$	$< 1,0 \cdot 10^{-14}$	---

Fuente: elaboración propia.

1.3. El sonido

Este se forma debido a vibraciones mecánicas de las partículas en el aire, produciendo ondas que se propagan de forma transversal o longitudinal.

El ser humano puede captar las vibraciones de frecuencia comprendidas entre los 20 y 20KHz, correspondiendo al infrasonido a las vibraciones cuya frecuencia se encuentra debajo de los 20Hz, y las vibraciones de frecuencia arriba de los 20KHz son denominadas ultrasónicas.

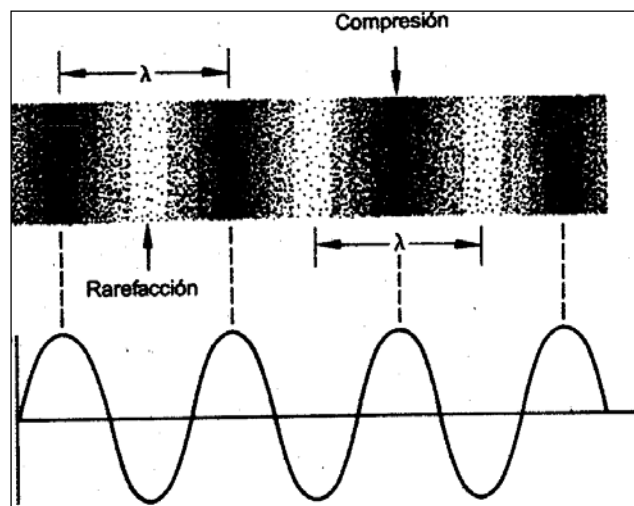
El movimiento transversal es transmitido de un extremo a otro, o bien del centro hacia fuera, tal es el caso de las ondas que se forman en el agua al arrojar una piedra; por el contrario el movimiento longitudinal consiste en una serie de compresiones y enrarecimientos sucesivos a medida en que la energía del movimiento ondulatorio se propaga alejándose del centro de la perturbación, las moléculas de aire individuales que transmiten el sonido, se mueven hacia adelante y hacia atrás de forma paralela a la dirección del movimiento ondulatorio.

El sonido está formado por una serie de ondas de compresión y enrarecimiento que transmiten energía cinética por el interior de los medios por los que se propaga. En el vacío, el sonido no se puede propagar, ya que necesita de un medio que le haga de soporte.

La compresión es el agrupamiento de moléculas que se acercan entre si formando regiones densas y la región que tiene pocas moléculas se conoce como rarefacción. Una compresión corresponde a una región de alta presión, correspondiendo la rarefacción a una zona de baja presión.

En la figura 5 se puede observar cómo las compresiones y rarefacciones se alternan a través de un medio en la misma forma que las partículas de aire individuales oscilan de un lado a otro en la dirección de la propagación de la onda.

Figura 5. **Compresión y rarefacción de las ondas sonoras**



Fuente: <http://alextd17.tripod.com/id1.html>. Consulta: 15 de diciembre de 2012.

El sonido está compuesto por tres características de percepción, siendo éstas: el tono, la intensidad y el timbre que tienen una analogía y correspondencia a la frecuencia, la amplitud y la composición armónica o forma de onda.

1.3.1. Intensidad del sonido

La intensidad del sonido se define como la potencia acústica por unidad de área. Su intensidad a una distancia determinada, depende de la amplitud de las vibraciones de las ondas.

El oído humano puede acomodarse a un intervalo de intensidades sonoras bastante amplio, desde 10^{-12} w/m² aproximadamente (que normalmente se toma como umbral de audición), hasta 100 w/m² aproximadamente que produce sensación dolorosa en la mayoría de las personas.

Debido a este gran intervalo, y a que la sensación fisiológica de fuerza sonora no varía directamente con la intensidad, se utiliza una escala logarítmica para describir el nivel de intensidad de una onda sonora.

El nivel de intensidad se mide en decibelios (dB) y se define como:

$$IS = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

Donde:

IS = nivel de intensidad del sonido

I = intensidad del sonido

I_0 = nivel de referencia cuyo valor es 10^{-12} w/m² el cual se escoge como el umbral de audición

En escala logarítmica, el intervalo de niveles de intensidad sonora para el oído humano es de 0dB – 120dB.

1.3.2. Tono

El tono no es más que la variación de velocidad del sonido, siendo los sonidos de alta frecuencia los tonos agudos y los de baja frecuencia los graves.

Un tono simple tiene una sola frecuencia, un tono complejo consta de dos o más tonos simples, llamados armónicos. El tono de frecuencia más baja se llama fundamental, los demás se conocen como armónicos.

1.3.3. Timbre

Es la cualidad del sonido que permite diferenciar el tono determinado por la armonía del sonido, y depende de la naturaleza y forma de los elementos que entren en vibración, esto debido a que un sonido no está formado sólo de una frecuencia, sino por la suma de otras que son múltiplos de la fundamental.

Gracias al timbre se puede distinguir sonidos procedentes de diferentes instrumentos, aun cuando posean igual tono e intensidad. Debido a esta misma cualidad es posible reconocer a una persona por su voz, que resulta característica de cada individuo.

Por su analogía entre la luz y el sonido, al timbre se le denomina también como color del tono.

2. ANTENAS

Las telecomunicaciones electrónicas, no serían posibles si no se contara con la presencia de antenas que permitan completar la interconexión entre la emisión y recepción de las señales en forma de ondas electromagnéticas provenientes de las guías de onda, llevando la información que se desea transmitir.

Es por ello que conforme avanza la tecnología, en lo que a telecomunicaciones electrónicas se refiere, evolucionan también, los distintos tipos de antenas empleadas para fines específicos con respecto al tipo de aplicación, utilización y distancia en que se requiera enviar y recibir la información según la tecnología empleada. Tal es el caso de las antenas que se utilizan en un sistema de radiofrecuencia AM o FM, así como las antenas empleadas en un sistema WiFi; en ambos casos aunque la función general de las antenas sea la misma, las características y diseño son completamente diferentes.

El estudio de las antenas para las telecomunicaciones, permite el diseño del tipo de antena más adecuada a utilizarse en el sistema que se requiera según su tecnología, para optimizar la transmisión y recepción de las señales teniendo en cuenta la compatibilidad electromagnética; así como la identificación y reducción de la interferencia que éstas puedan entregar y recibir.

2.1. Función de una antena

Una antena es un dispositivo, cuya misión es difundir y/o recoger ondas radioeléctricas provenientes del espacio libre. Las antenas convierten las señales eléctricas en ondas electromagnéticas y viceversa. Existen antenas de distintos tipos, pero todas cumplen la misma misión: servir de emisor-receptor de una señal de radio.

Una antena no es más que un trozo de material conductor al cual se le aplica una señal y ésta es radiada por el espacio libre, las antenas deben dotar a la onda radiada con un aspecto de dirección, es decir; deben acentuar un solo aspecto de dirección y anular o eliminar el resto. Esto es necesario, ya que sólo interesa radiar hacia una dirección determinada.

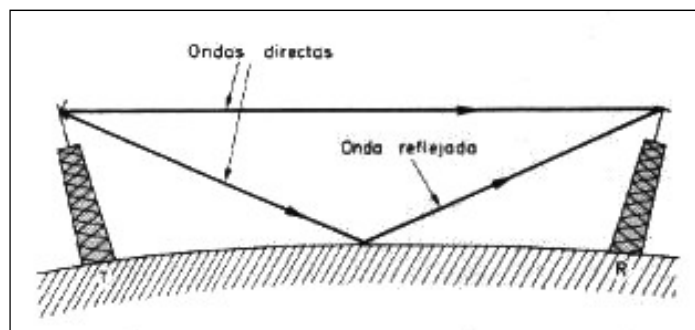
Básicamente, una antena es un transductor, es decir, un catalizador entre los dos medios de comunicación (transmisor y receptor), convirtiendo la energía electromagnética proveniente de un cable, en potencia electromagnética radiada en el espacio libre. Varias características de la antena determinan que tan eficiente es realizada dicha conversión.

Para transportar tanta energía radiada como sea posible, es de gran importancia que la antena misma, no consuma dicha energía por si misma; es importante que la antena concentre su energía radiada, con la mayor eficacia posible en la dirección requerida. Entonces, ya sea un gran rango de cobertura o la reducción de la potencia de transmisión, se puede equilibrar ambos parámetros hasta lograr que el rango satisfaga el requerido; consecuentemente la tecnología de una antena es simplemente una cuestión de economizar la energía.

Dentro de las principales funciones de una antena, podemos mencionar las siguientes:

- Recibir las ondas de radio transmitidas, en una frecuencia dada y una polarización determinada, por las estaciones situadas dentro de una región particular sobre la superficie terrestre.
- Capturar el menor número de señales indeseables posibles (este hecho no contradice la función anterior ya que se entiende que estas señales provienen de una región distinta o no tienen las especificaciones de frecuencia o polarización deseada).
- Transmitir ondas radioeléctricas pertenecientes a una banda de frecuencias y con una polarización concreta sobre una región de la Tierra.
- Transmitir la menor potencia posible fuera de la región de cobertura especificada.

Figura 6. **Propagación de una onda entre antena transmisora y receptora**



Fuente: <http://www.lu1dma.com.ar/grupooste/propaga/propaga3.html>

Consulta: 16 de diciembre de 2012.

En la figura 6 se puede observar cómo se propaga una onda desde una antena transmisora T (izquierda), hacia una antena receptora R (derecha), ya sea de forma directa de antena a antena (línea vista), o bien por reflexión. En ambos casos se debe tomar en cuenta la curvatura de la tierra.

2.2. Características de las antenas

Una antena es un dispositivo que está diseñado para transmitir (radiar) y/o recibir ondas de radio electromagnéticas, entonces como tal, existen varias características importantes que deben de ser consideradas al momento de elegir una antena específica según sea su aplicación:

- Patrón de radiación
- Ganancia
- Directividad
- Impedancia
- Polarización

Los anteriores son los parámetros básicos que deben de tomarse en cuenta al momento de diseñar una antena.

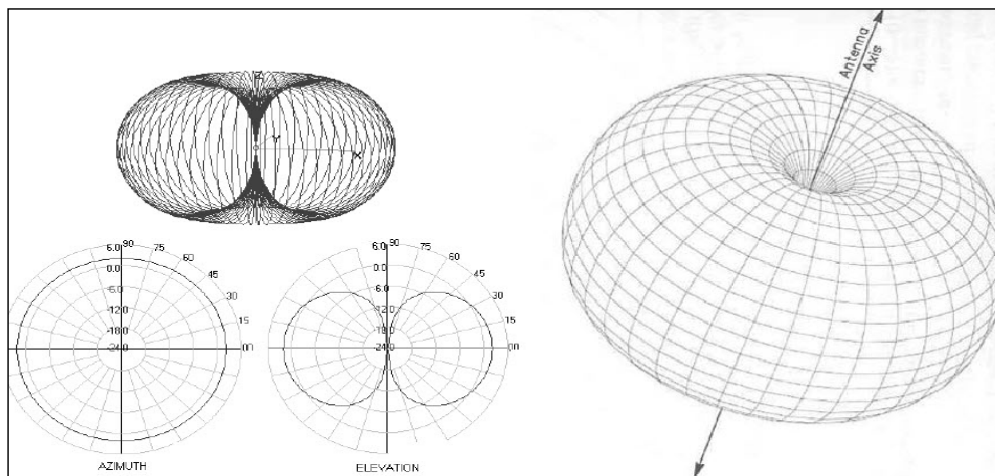
2.2.1. Patrón de radiación

El patrón de radiación de una antena se puede representar como una gráfica tridimensional de la energía radiada vista desde fuera de esta. Los patrones de radiación, usualmente se representan de dos formas, de elevación y de azimut.

El patrón de elevación es una gráfica de la energía radiada por la antena vista de perfil. El patrón de azimut es una gráfica de la energía radiada vista directamente desde arriba.

Al combinar ambas gráficas se tiene una representación tridimensional de cómo es realmente radiada la energía desde la antena. En la figura 7, se pueden apreciar los patrones de radiación de una antena; tanto el patrón de azimut de un dipolo genérico, así como el patrón de elevación de un dipolo genérico, y también el patrón de radiación 3D.

Figura 7. **Patrones de radiación**



Fuente: <http://aerotornquist.blogspot.com/2010/04/tecnologia-de-rc-parte-ii.html>.

Consulta: 16 de diciembre de 2012.

La figura 8 muestra la representación tridimensional de los campos radiados por una antena.

Figura 8. **Características de radiación de las antenas**



Fuente: http://www.dipolerfid.com/products/RFID_readers/RFID_antennas/Default.aspx.

Consulta: 16 de diciembre de 2012.

2.2.2. Ganancia

La ganancia de una antena es la relación entre la potencia que entra y la potencia que sale de ésta. Esta ganancia es comúnmente referida en dBi's y se refiere a la comparación de cuanta energía sale de la antena en cuestión, comparada con la que saldría de una antena isotrópica.

Una antena isotrópica es aquella que cuenta con un patrón de radiación esférico perfecto y una ganancia lineal unitaria. La ganancia se relaciona con la potencia de alimentación. Si no se especifica la dirección angular, se sobreentiende que la ganancia se refiere a la dirección de máxima radiación.

La ganancia de una antena siempre está dada para la dirección de máxima radiación del lóbulo principal.

En un dipolo son 2 los lóbulos principales de radiación a diferencia de los arreglos direccionales que tienen solamente un lóbulo principal.

2.2.3. Directividad

La directividad de una antena es una medida de la concentración de la potencia radiada en una dirección particular. Se puede entender también como la habilidad de la antena para direccionar la energía radiada en una dirección específica.

Usualmente es una relación de intensidad de radiación en una dirección particular en comparación a la intensidad promedio isotrópica.

La directividad de una antena se define como la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección, a una distancia, y la densidad de potencia que radiaría a la misma distancia una antena isotrópica, a igualdad de potencia total radiada. Si no se especifica la dirección angular, se sobreentiende que la directividad se refiere a la dirección de máxima radiación.

La directividad se puede obtener en general a partir del diagrama de radiación de la antena, siendo la máxima ganancia directiva la directividad. En la definición de directividad se habla de potencia radiada por la antena, mientras que en la definición de ganancia se habla de potencia entregada a la antena, la diferencia entre ambas potencias es la potencia disipada por la antena, debida a pérdidas óhmicas. Si una antena no tiene pérdidas óhmicas, la directividad y la ganancia son iguales. La relación entre la ganancia y la directividad es la eficiencia, siendo ésta, la relación entre la potencia radiada por una antena y la potencia entregada a la misma. La eficiencia es un número comprendido entre 0 y 1.

2.2.4. Impedancia

La impedancia de una antena se define como la relación entre la tensión y la corriente en sus terminales de entrada. Esta impedancia poseerá una parte real $Re(w)$ y una parte imaginaria $Ri(w)$, dependientes de la frecuencia.

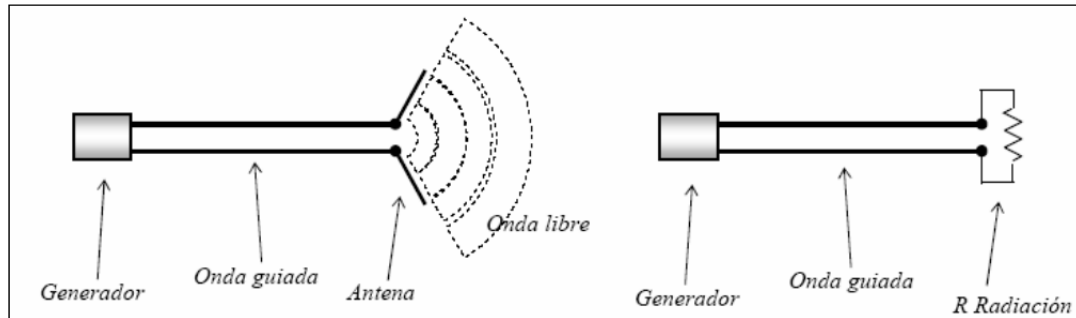
Si a una frecuencia específica, una antena no presenta parte imaginaria en su impedancia $Ri(w)=0$, entonces se dice que la antena está resonando a dicha frecuencia.

Normalmente se utiliza una antena a su frecuencia de resonancia, porque es cuando mejor se comporta, centrando el enfoque en la resistencia de entrada Re , la cual también depende de la frecuencia.

La resistencia de entrada se puede descomponer en dos resistencias, la resistencia de radiación (R_r) y la resistencia de pérdidas (R_L) u óhmica. Se define la resistencia de radiación como una resistencia que disiparía en forma de calor la misma potencia que radiaría la antena. La antena al estar compuesta por conductores presenta pérdidas, entonces la resistencia de pérdidas es la relación entre la potencia disipada por efecto de pérdidas resistivas y la corriente en sus terminales al cuadrado. Por lo tanto la resistencia de una antena es la suma de la resistencia de radiación y la resistencia de pérdidas.

Entonces se necesita que una antena esté resonando para eliminar la parte imaginaria y con ello evitar aplicar corrientes excesivas, que provocan grandes pérdidas. La antena se puede ver como un adaptador de impedancias de la guía al espacio libre, cumpliendo con el teorema de máxima transferencia de potencia como se puede observar en la figura 9.

Figura 9. Antena como adaptador de impedancias



Fuente: elaboración propia, con programa Snagit 11 Editor.

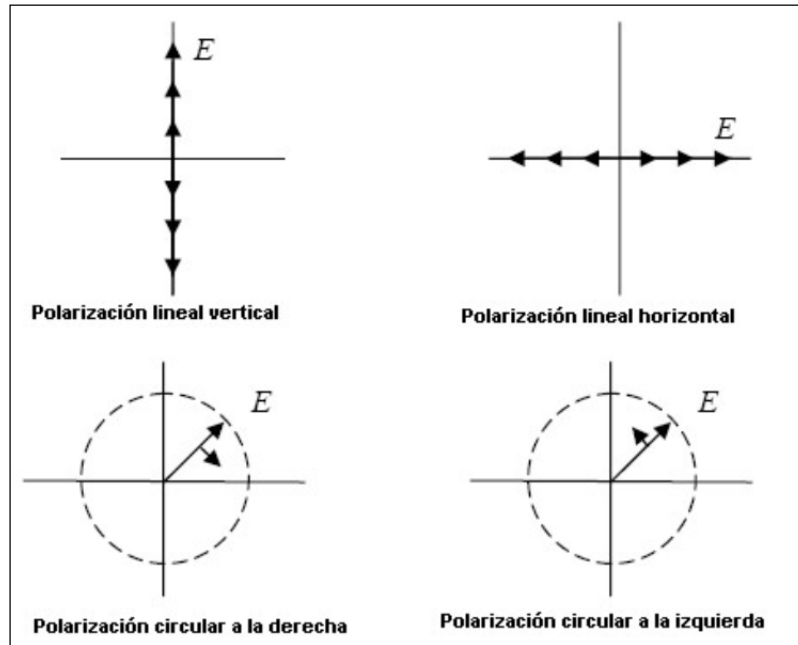
2.2.5. Polarización

La polarización de una antena es la polarización de la onda radiada por dicha antena en una dirección dada; en otras palabras, es la orientación de las ondas electromagnéticas al salir de la antena.

La polarización de una onda es la figura geométrica determinada por el extremo del vector que representa al campo eléctrico en función del tiempo, en una posición dada.

Hay dos tipos básicos de polarización que aplican a las antenas, las cuales son: Lineal, incluye vertical, horizontal y oblicua; y circular que incluye circular derecha, circular izquierda, elíptica derecha, y elíptica izquierda.

Figura 10. **Representación de polarización trazada por el campo eléctrico**



Fuente: <http://www.redlatinos.com/imprimir/post/2551/>. Consulta: 16 de diciembre de 2012.

En la figura 10 se puede apreciar las formas geométricas lineal y circular que describen la polarización de una antena al transcurrir el tiempo. Se produce una polarización lineal cuando las fases de dos componentes ortogonales del campo eléctrico difieren un múltiplo entero de π radianes. Se produce polarización circular cuando las amplitudes son iguales y la diferencia de fase entre las componentes es $\pi/2$ o $3\pi/2$. La polarización es elíptica en los demás casos.

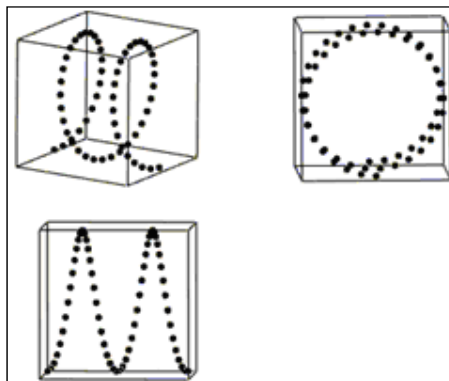
Cualquier onda se puede descomponer en dos polarizaciones lineales ortogonales, sin más que proyectar el campo eléctrico sobre vectores unitarios orientados según dichas direcciones.

Aplicando el mismo principio, cualquier onda se puede descomponer en dos ondas polarizadas circularmente a derechas o izquierdas.

El sentido de giro del campo eléctrico, para una onda que se aleja del observador, determina si la onda está polarizada circularmente a la derecha o a la izquierda. Si el sentido de giro coincide con las agujas del reloj, la polarización es circular a la derecha. Si el sentido de giro es contrario a las agujas del reloj, la polarización es circular a la izquierda. El mismo convenio aplica a las ondas con polarización elíptica.

El tomar en cuenta la polaridad de una antena es muy importante si se quiere obtener el máximo rendimiento de ésta. La antena transmisora debe de tener la misma polaridad de la antena receptora para el máximo rendimiento.

Figura 11. **Representación en 3D de una polarización circular**



Fuente: elaboración propia, con programa Snagit 11 Editor.

La figura 11 muestra una polarización circular proveniente de izquierda a derecha, girando en contra de las manecillas del reloj, lo cual corresponde a una polarización circular a la izquierda.

2.3. Tipos de antenas

Una antena es un dispositivo que sirve para transmitir y recibir ondas de radio, pero dependiendo de su forma y orientación, ésta puede captar diferentes frecuencias, así como niveles de intensidad. El tipo de la antena determina su patrón de radiación, éstas pueden ser omnidireccional, bidireccional, o unidireccional.

- Las antenas omnidireccionales son buenas para cubrir grandes áreas, la radiación trata de ser pareja para todos lados es decir cubre 360°. Entre sus principales aplicaciones están la telefonía móvil y la radio.
- Las antenas direccionales son ideales para ser utilizadas en una conexión punto-a-punto, como acoplamiento entre edificios, o para los clientes de una antena omnidireccional que necesitan ampliar su red de área local (LAN).

Hay varios tipos de antenas. Las más relevantes para aplicaciones en bandas libres son:

- Antenas dipolo
- Antenas dipolo multielemento
- Antenas yagui
- Antenas panel Plano (*flat panel*)
- Antenas parabólicas (plato parabólico)

2.3.1. Antenas dipolo

Todas las antenas de dipolo tienen un patrón de radiación generalizado. Primero el patrón de elevación muestra que una antena de dipolo es mejor utilizada para transmitir y recibir desde el lado amplio de la antena. Es sensible a cualquier movimiento fuera de la posición perfectamente vertical. Se puede mover alrededor de 45 grados de la verticalidad antes que el desempeño de la antena se degrade más de la mitad. Otras antenas de dipolo pueden tener diferentes cantidades de variación vertical antes que sea notable la degradación.

Físicamente, las antenas dipolo son cilíndricas por naturaleza, y pueden ser también ahusadas o con formas específicas en el exterior para cumplir con especificaciones de medidas. Estas antenas son usualmente alimentadas a través de una entrada en la parte inferior, pero también pueden tener el conector en el centro de la misma. Las antenas dipolo son utilizadas con frecuencias arriba de 2MHz, poseen ganancia baja (2.2 dBi) y tienen ángulo de radiación ancho.

2.3.2. Antenas dipolo multielemento

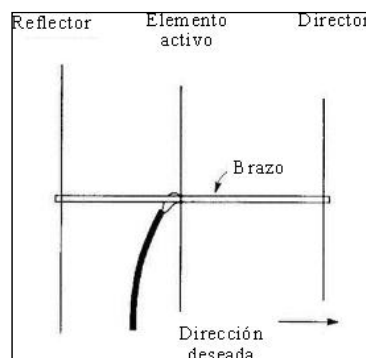
Las antenas multielemento tipo dipolo cuentan con algunas de las características generales del dipolo simple, ya que cuentan con un patrón de elevación y azimut similar al de la antena dipolo simple. La diferencia más clara entre ambas es la direccionalidad de la antena en el plano de elevación, y el incremento en ganancia debido a la utilización de múltiples elementos. Con el uso de múltiples elementos en la construcción de la antena, ésta puede ser configurada para diferentes ganancias, lo cual permite diseños con características físicas similares.

Las antenas de dipolo multielemento, son muy direccionales en el plano vertical. Debido a que la antena de dipolo radia igualmente bien en todas las direcciones del plano horizontal, es capaz de operar igualmente bien en configuración horizontal.

2.3.3. Antenas yagui

Antena constituida por varios elementos paralelos y coplanarios; directores, activos y reflectores; se componen de un arreglo de elementos independientes de antena, donde solo uno de ellos transmite las ondas de radio. Los elementos directores dirigen el campo eléctrico, los activos radian el campo y los reflectores lo reflejan. El número de elementos (específicamente, el número de elementos directores) determina la ganancia y directividad de la antena. Es utilizada ampliamente en la recepción de señales televisivas, comúnmente en frecuencias de 30Mhz y 3Ghz, posee una ganancia elevada de 8-15 dBi y maneja una impedancia de 50 a 75 Omhs.

Figura 12. Elementos que componen una antena yagui



Fuente: http://www.ex4u.org/index.php?pr=Aspectos_Tecnicos.

Consulta: 16 de diciembre de 2012.

En la figura 12 se puede observar la composición de una antena yagui. Para obtener la máxima ganancia en éste tipo de antena, se recomienda que el dipolo sea de $\lambda/2$, el reflector 5% más largo y el director 5% más corto, ya que de otra manera los campos de los elementos interferirían destructivamente entre sí, bajando la ganancia. La separación entre elementos determina la longitud total de la antena la cual también juega un papel importante en sus características.

Las antenas yagi no son tan direccionales como las antenas parabólicas, pero son más directivas que las antenas panel.

2.3.4. Antenas panel plano

Las antenas de panel plano como su nombre lo indica, son un panel con forma cuadrada o rectangular y están configuradas en un formato tipo patch.

Las antenas tipo Flat Panel son muy direccionales ya que la mayoría de su potencia radiada es en una sola dirección, ya sea en el plano horizontal o vertical.

Las antenas Flat Panel pueden ser fabricadas en diferentes valores de ganancia de acuerdo a su construcción, con lo que puede proveer excelente directividad y considerable ganancia.

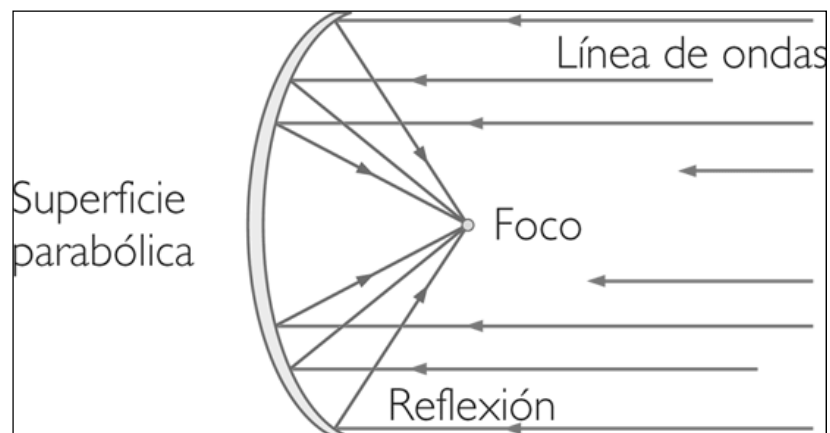
Son normalmente planas, en encapsulado de PVC, poseen ganancia media-elevada entre 5-20 dBi, tiene directividad moderada y ángulo de radiación medio.

2.3.5. Antenas parabólicas

Las antenas parabólicas utilizan características físicas así como las antenas de elementos múltiples para alcanzar muy alta ganancia y direccionalidad. Estas antenas usan un plato reflector con la forma de una parábola para enfocar las ondas de radio recibidas por la antena a un punto focal. La parábola también, funciona para capturar la energía radiada por la antena y enfocarla en un haz estrecho al transmitir. Al concentrar toda la potencia que llega a la antena y enfocarla en una sola dirección, este tipo de antena es capaz de proveer muy alta ganancia.

Se utiliza especialmente para la transmisión y recepción vía satélite ya sea de televisión, telefonía a grandes distancias o redes privadas, posee una ganancia alta de 12-25 dBi, directividad alta y ángulo de radiación bajo.

Figura 13. Reflexión en una antena parabólica



Fuente: <http://anakarinaw.wordpress.com/>. Consulta: 16 de diciembre de 2012.

La figura 13 muestra cómo por medio de reflexión, las ondas son desviadas hacia el foco de la antena, en toda la superficie parabólica.

2.3.6. Antena de ranura

Las antenas de ranura cuentan con características de radiación muy similares a las de los dipolos, tales como los patrones de elevación y azimut, pero su construcción consiste solo de una ranura estrecha en un plano. Al igual que las antenas microstrip que se describirán a continuación, las antenas de ranura proveen poca ganancia, y no cuentan con alta direccionalidad, como evidencian sus patrones de radiación y su similitud al de los dipolos.

Su más atractiva característica es la facilidad de construcción e integración en diseños existentes, así como su bajo costo, factores que compensan por su desempeño poco eficiente.

2.3.7. Antenas microstrip

Estas antenas pueden ser hechas para emular cualquiera de los diferentes tipos de antenas antes mencionados.

Debido a que son manufacturadas con pistas en circuito impreso, pueden ser muy pequeñas y livianas, esto tiene como costo el no poder manejar mucha potencia como es el caso de otras antenas, además están hechas para rangos de frecuencia muy específicos. En muchos casos, esta limitación de frecuencia de operación puede ser benéfica para el desempeño del radio.

Debido a sus características, las antenas microstrip no son muy adecuadas para equipos de comunicación de banda amplia.

Tabla II. Parámetros básicos entre distintos tipos de antenas

Tipo de Antena	Patrón de Radiación	Ganancia	Directividad	Polarización
Dipolo	Amplio	Baja	Baja	Lineal
Dipolo Multielemento	Amplio	Baja/Media	Baja	Lineal
Panel Plano (Flat Panel)	Amplio	Media	Media/Alta	Lineal/Circular
Plato Parabólico	Amplio	Alta	Alta	Lineal/Circular
Yagi	Endfire	Media/Alta	Media/Alta	Lineal
Ranura	Amplio	Baja/Media	Baja/Media	Lineal
MicroStrip	Endfire	Media	Media	Lineal

Fuente: elaboración propia.

3. INTERFERENCIA ELECTROMAGNÉTICA

El principal reto que presentan las comunicaciones electrónicas actualmente, es reducir los índices de ruido e interferencia al máximo para optimizar la calidad de transmisión y recepción de los distintos medios y equipos utilizados para transportar la información que se desea enviar de un punto a otro. Es por ello que conforme evoluciona y avanza la tecnología, también surgen nuevos métodos para reducir la incidencia de los efectos de la interferencia, sin embargo, el contar con tanta infraestructura, así como diversas tecnologías incompatibles, genera mayor trabajo y esfuerzo en la reducción de los niveles de interferencia.

A partir del auge de la industrialización, el ser humano ha elevado los niveles de dióxido de carbono en el medio ambiente, así como también ha contaminado los diversos recursos naturales, trayendo consigo un impacto global en el planeta. Tal es el caso de la reducción en la capa de ozono que repercute en una mayor entrada de diversas radiaciones como la ultravioleta y los rayos X, las cuales son letales en grandes dosis para los seres vivos y que también interfieren con los equipos electrónicos. De igual manera, la reducción en el campo magnético que protege al planeta de emisiones externas como los vientos solares y radiaciones cósmicas, influye también, en la generación de interferencias entre las herramientas eléctricas y electrónicas.

En el siguiente capítulo se describirán los conceptos de ruido e interferencia electromagnética, sus fuentes, las diferentes causas y tipos de interferencia electromagnética; como también sus efectos.

3.1. Interferencia

Antes de definir interferencia electromagnética, se debe entender qué es puramente el término interferencia; siendo esta cualquier señal no deseada que se opone a la recepción de la mejor señal posible que se desea recibir proveniente de una fuente. En otras palabras, es todo proceso que altera o destruye una señal durante el trayecto en el canal desde el transmisor hasta el receptor.

Las interferencias pueden impedir la recepción de la señal en su totalidad, pueden causar solamente una pérdida temporal de la señal deseada, o bien pueden afectar la calidad de la señal por completo.

3.2. Interferencia electromagnética (EMI)

Ahora que se conoce el significado de interferencia, se comprende lo que es la interferencia electromagnética; conocida con sus siglas en inglés como EMI (*electromagnetic interference*), es una perturbación causada por un campo eléctrico o magnético en un sistema, siendo esta cualquier señal o emisión radiada en el espacio o conducida a través de un cable de alimentación o señal, que pone en peligro el funcionamiento de los equipos y sistemas, tales como: la navegación por radio u otro servicio de seguridad, o bien degrada seriamente, obstruye o interrumpe de forma repetida un servicio de comunicaciones por radio autorizado.

Los servicios de radiocomunicaciones incluyen, entre otros: emisoras comerciales de AM/FM, televisión, servicios de telefonía móvil, radar, control de tráfico aéreo, buscapersonas y servicios de comunicación personal PCS (Personal Communication Services).

Estos servicios de radio autorizado y servicios de radio no autorizados, como *WLAN* (*wireless local area network*) o Bluetooth y los radiadores involuntarios, como dispositivos digitales, incluidos los sistemas informáticos, contribuyen al entorno electromagnético.

Todos los dispositivos electrónicos emiten radiación electromagnética, ésta es una radiación que es un subproducto de la actividad eléctrica o magnética. Lamentablemente las emisiones de un dispositivo pueden interferir con otros dispositivos, causando posibles problemas. La interferencia puede dar lugar a la pérdida de datos, degradación de la calidad de la imagen en monitores, y otros problemas con computadoras, o bien problemas con otros dispositivos tales como televisores y radios. Éstos son generalmente, clasificados como de interferencia electromagnética.

Los transmisores inalámbricos pueden producir campos electromagnéticos lo suficientemente fuertes como para perturbar el funcionamiento de los equipos electrónicos cercanos. Si alguna persona vive cerca de una emisora o en el centro de una ciudad grande, probablemente ha experimentado EMI de transmisores de radio o televisión. Los teléfonos inalámbricos, sistemas de entretenimiento para el hogar, computadoras, y algunos dispositivos médicos pueden dejar de funcionar correctamente en la presencia de fuertes campos de radiofrecuencia.

Las interferencias electromagnéticas se puede clasificar en 2 grupos: intencionadas y no intencionadas.

3.2.1. Interferencia electromagnética intencionada

Son interferencias provocadas por señales emitidas de forma intencional, con la finalidad de producir un mal funcionamiento en la víctima, siendo una amenaza para los sistemas electrónicos, ya que puede afectar en términos de infraestructura social el transporte, las comunicaciones, la seguridad o bien los equipos del área médica, entre otros.

Al mismo tiempo, los piratas informáticos, delincuentes y los terroristas son capaces de crear fuentes de EMI que fácilmente pueden producir trastornos transitorios de alto nivel de radiación y conducción. Es por ello que los ingenieros al diseñar los sistemas, deben estar conscientes del problema, evaluar los riesgos que plantean los equipos y aplicaciones para tomar las medidas necesarias de acuerdo a la compatibilidad electromagnética.

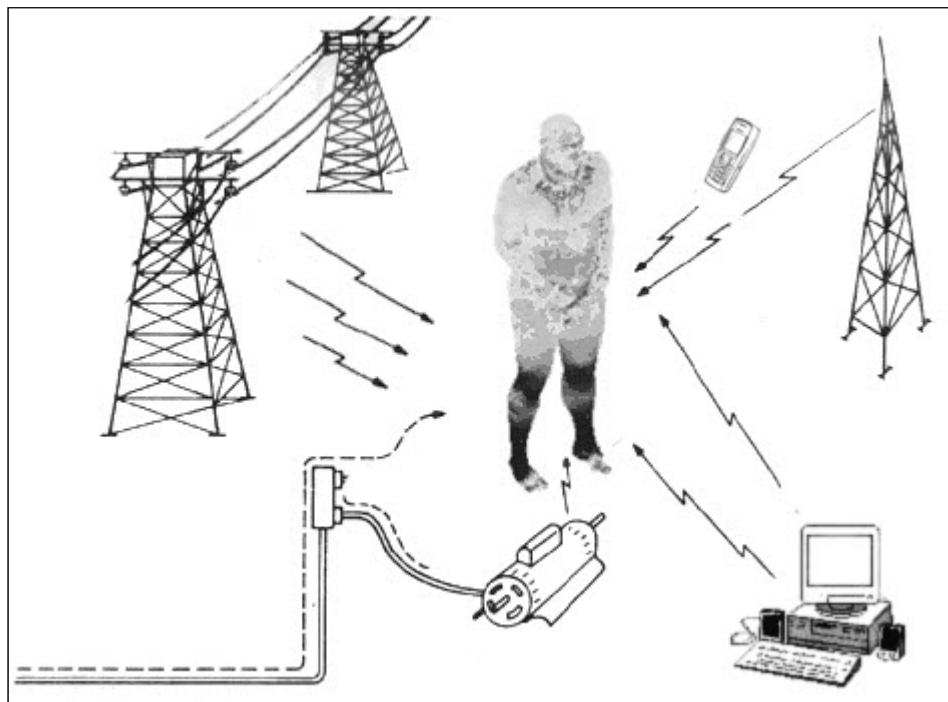
3.2.2. Interferencia electromagnética no intencionada

Entre esta clasificación se incluyen aquellas interferencias que son causadas por señales emitidas con una intención distinta a la provocada y que de forma accidental dan lugar a un efecto no deseado en un tercero, por ejemplo: los sistemas de telecomunicaciones. También se incluyen dentro de las interferencias emitidas no intencionadamente, a las generadas por los equipos electrónicos en su funcionamiento normal, sistemas de conmutación, descargas electrostáticas, equipos médicos, motores de inducción, etc.

Otra clasificación que se puede mencionar, es la debida al mecanismo que acopla la fuente y la víctima de la interferencia.

En este caso se refiere a interferencias radiadas, en otras palabras cuando la señal es propagada de fuente a víctima mediante radiación electromagnética e interferencias conducidas, cuando se propaga a través de una conexión común a ambos (por ejemplo, la red eléctrica).

Figura 14. **Interferencias intencionadas y no intencionadas**



Fuente: <http://www.biotele.com/EMI.htm>. Consulta: 22 de diciembre 2012.

Como se puede observar en la figura 14, existen diversos equipos, dispositivos y sistemas que se desenvuelven en el ámbito electromagnético, los cuales por su composición, pueden generar de una u otra manera interferencia con otros equipos a su alrededor de forma intencionada o bien no intencionada.

3.3. Causas de interferencia electromagnética

Una fuente de EMI puede ser cualquier dispositivo que transmite, distribuye, procesa o utiliza cualquier forma de energía eléctrica donde algún aspecto de su funcionamiento genera, conduce o irradia señales que pueden causar la degradación del rendimiento del equipo.

La fuente de la interferencia puede ser cualquier objeto, ya sea artificial o natural, que posea corrientes eléctricas que varíen rápidamente con el tiempo, como un circuito eléctrico, el Sol o las auroras boreales.

La interferencia electromagnética es causada por los campos electromagnéticos radiados indeseables o tensiones y corrientes. Ésta se produce por una fuente emisora y se detecta por una víctima susceptible de acoplamiento a través de un camino.

El acoplamiento ruta puede incluir uno o más de los siguientes mecanismos de acoplamiento:

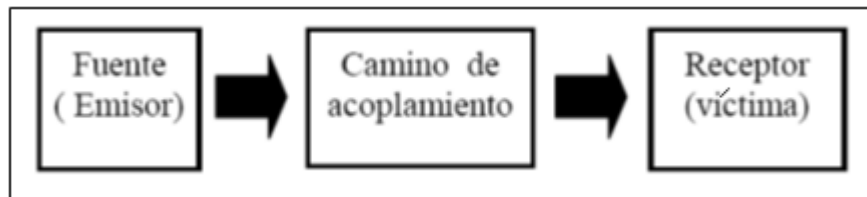
- Conducción - la corriente eléctrica
- Radiación - campo electromagnético
- Acoplamiento capacitivo - campo eléctrico
- Acoplamiento inductivo - campo magnético

El acoplamiento entre la fuente y el receptor interacciona y perturba el funcionamiento de los sistemas; este camino de acoplamiento permite a la fuente interferir con el receptor. Solamente existe interferencia cuando se provoca un mal funcionamiento en el receptor.

La comprensión del problema de las interferencias, se resume en tres partes fundamentales:

- Origen (fuente de las interferencias)
- Canal de transmisión (medios de propagación o caminos de acoplamiento)
- Receptor de las interferencias (equipo afectado por éstas)

Figura 15. **Elementos que intervienen en un problema de EMI**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Word 2003.

EMI se divide en dos categorías generales para ayudar en el análisis realizado y los efectos de interferencia radiada: emisiones de EMI de banda estrecha y de banda ancha.

3.3.1. Emisiones de banda estrecha

Una señal de banda estrecha ocupa una porción muy pequeña del espectro radioeléctrico. La magnitud de las emisiones radiadas de banda estrecha se expresa, generalmente en términos de voltios por metro (v / m).

Estas señales son generalmente ondas sinusoidales continuas y pueden ser de ocurrencia continua o intermitente en la aparición.

Los transmisores de comunicaciones de un sólo canal AM, FM y SSB entran en esta categoría. Emisiones espurias, como salidas de armónicas de banda estrecha en transmisores de comunicación, zumbidos en la línea de potencia, osciladores locales, generadores de señales, equipos de prueba, y muchas otras fuentes hechas por el hombre, pertenecen a las emisiones de banda estrecha.

3.3.2. Emisiones de banda ancha

Una señal de banda ancha puede propagar su energía a través de cientos de megahercios o más. La magnitud de las emisiones radiadas de banda ancha se expresa generalmente en términos de voltios por metro por megahercio ($V / m / MHz$). Este tipo de señal se compone de pulsos estrechos teniendo un rizo y tiempos de bajada relativamente cortos.

Las señales de banda ancha se dividen en las fuentes y el impulso al azar. Estas pueden ser de ocurrencia transitoria, continua o intermitente. Los ejemplos de emisiones de banda ancha incluyen las emisiones no intencionales de la comunicación y los transmisores de radar, contactos eléctricos de interruptores, computadoras, termostatos, controles de velocidad de motor, circuitos *thyatron*, sistemas de encendido, reguladores de voltaje, generadores de impulsos, lámparas de vapor y conexiones de tierra intermitentes. También, pueden resultar de ruido galáctico y solar, pulsos electromagnéticos de rayos, y por pulsos de radiofrecuencia asociados con descargas electrostáticas.

De acuerdo a la diversidad de causas que provocan de una u otra manera interferencia electromagnética, se describirán las fuentes más comunes y de mayor relevancia para el estudio.

3.3.3. Fuentes naturales de EMI

Aquellas fuentes que están asociadas con fenómenos naturales. Estos incluyen cargas atmosféricas / fenómenos de descarga como un rayo o precipitación estática, así como fuentes extraterrestres entre las que están incluidas la radiación del sol y las fuentes galácticas como las estrellas, las galaxias y otras fuentes cósmicas.

Todas las fuentes naturales de EMI, están clasificadas como de banda ancha, radiada, y no intencionales.

El Sol es la estrella más cercana al planeta, éste emite radiación constante que está siendo enviada alrededor del sistema solar, la cual interfiere con las comunicaciones de acuerdo a su comportamiento.

3.3.3.1. Máximo solar

Durante aproximadamente 4,6 mil millones de años, el Sol ha estado quemando hidrógeno en helio, y se calcula que lo seguirá haciendo durante otros 7 mil millones de años más como una estrella de secuencia principal. Si se observa más de cerca al sol, la actividad aumenta y disminuye en el transcurso de un ciclo de 11 años.

Ahí pueden encontrarse muchas manchas solares, las cuales disminuyen casi a cero al final del período, para luego volver 11 años más tarde en donde puede haber docenas alrededor de toda su superficie. Cuando el número de manchas solares está en su máximo, los astrónomos le llaman a este fenómeno máximo solar.

Los astrónomos solares están tratando de entender cómo funciona el ciclo del Sol, pero todo se reduce al campo magnético de éste. A lo largo de todo el ciclo completo de 22 años, el campo magnético del Sol se retuerce y luego cambia de polaridad, su polo norte se vuelve su polo sur y viceversa. Se requieren 22 años para que su polaridad vuelva a su configuración original.

Las manchas solares son regiones en la superficie del sol, donde la temperatura es ligeramente inferior que en los alrededores. Estas son las manchas en la superficie del sol, donde el campo magnético de éste, atraviesa la superficie del mismo.

Durante el máximo solar, la superficie del sol alrededor de su ecuador tiene muchas manchas solares. Además de todas las manchas solares, hay una gran actividad solar, ya que potentes llamaradas de rayos X destellan de la superficie del sol y eyecciones de masa coronal pueden enviar ráfagas de energía y partículas al espacio. Es durante el máximo solar que se experimentan auroras boreales más intensas.

El último máximo solar ocurrió en el 2001, por lo tanto se espera que el próximo ocurra en algún momento del 2012.

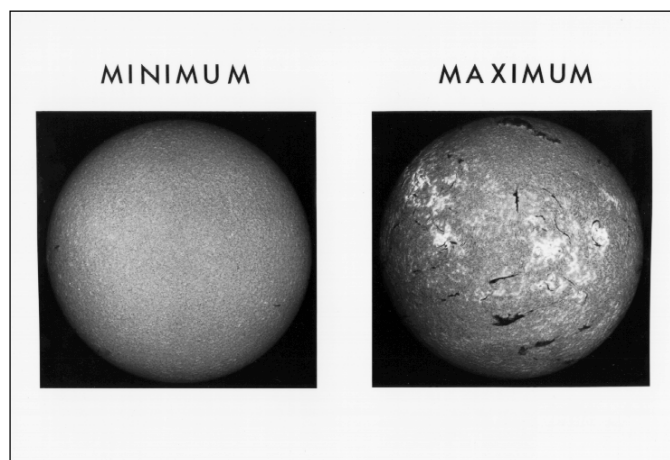
3.3.3.2. Mínimo solar

En contraparte al máximo solar, el mínimo solar ocurre cuando el menor número de manchas solares están sobre la superficie del Sol.

Durante el mínimo solar, puede haber momentos en que no hay manchas solares en absoluto, ya que cuando hay muchas manchas solares, existen erupciones solares y eyecciones de masa coronal.

Durante el mínimo solar, hay muy pocos de estos eventos y se puede apreciar con menos actividad boreal durante ese periodo. El mínimo solar sería el momento ideal para viajar al espacio, porque existe el menor riesgo de tormentas solares peligrosas.

Figura 16. **Máximo y mínimo solar**



Fuente: <http://nsosp.nso.edu/esf>. Consulta: 22 de diciembre de 2012.

En la figura 16 se puede apreciar la diferencia entre el máximo y mínimo solar de acuerdo a la cantidad de manchas solares, comportamiento propio del sol que afecta indirectamente las comunicaciones alrededor de la tierra.

3.3.4. Fuentes de EMI provocadas por el hombre

Las interferencias hechas por el hombre, pueden provenir de varias fuentes. Algunas de estas fuentes tales como osciladores, transmisores de comunicaciones y transmisores de radio, pueden ser especialmente diseñados para generar energía de radiofrecuencia.

Algunos dispositivos eléctricos también generan energía de radio frecuencia aunque no estén específicamente diseñados para ese propósito. Ejemplos de ellos son los sistemas de encendido, generadores, motores, líneas de alta tensión, relés y reguladores de voltaje.

La intensidad de la interferencia hecha por el hombre, puede variar a lo largo del día y decaer a un nivel bajo por la noche cuando muchas de éstas fuentes no se están utilizando. La interferencia hecha por el hombre puede ser un factor crítico que limita los sitios de recepción de radio, localizados cerca de zonas industriales.

La interferencia provocada por el hombre, es generalmente de banda ancha por naturaleza y puede surgir de muchas fuentes.

Debido a la extensa diversidad de causas de EMI provocadas por el hombre, en la tabla III se listan algunas de éstas, entre ellas las más comunes de acuerdo a su clasificación.

Figura 17. **Fuentes de EMI naturales y provocadas por el hombre**



Fuente: <http://www.siemc.com.mx/interes.php?id=22>. Consulta: 22 de diciembre de 2012.

Tabla III. **Clasificación de las fuentes de EMI provocadas por el hombre**

Fuentes de EMI debido a la red eléctrica y sus equipos	
Operaciones de conmutación	Conectores estáticos y rotativos
Fallas de energía	Rectificadores
Motores eléctricos	Contactores
Fuentes de EMI debido a equipo industrial y comercial	
Hornos de Arco	Lámparas fluorescentes
Hornos de inducción	Displays de neon
Aire acondicionado	Equipo medico
Fuentes de EMI debido a máquinas y herramientas	
Maquinaria de taller	Sierras giratorias
Laminadores	Compresores
Soldadores	Limpiadores ultrasónicos
Fuentes de EMI debido a sistemas de comunicaciones	
Estaciones de Radio	Teléfonos móviles
Estaciones de T.V.	Control remote
Radar	Transmisores para abrir puertas
Fuentes de EMI debido a dispositivos de consumo	
Hornos de microondas	Aspiradoras
Refrigeradores / Congeladores	Secadores de pelo
Termostatos	Rasuradoras eléctricas
Mezcladores	Reguladores de luz
Lavadoras	Computadoras personales

Fuente: elaboración propia.

3.3.5. Receptores de EMI

Cualquier situación de EMI requiere no solamente de una fuente de emisión sino también de un receptor. Un receptor también es llamado victima porque consiste de cualquier dispositivo expuesto a energía electromagnética radiada o conducida de fuentes emisoras, que degradan el buen funcionamiento del rendimiento de éste.

Muchos dispositivos pueden ser fuentes de emisión y ser receptores simultáneamente. Por ejemplo, la mayoría de los sistemas de comunicaciones electrónicas pueden ser fuentes emisoras y receptoras, porque contienen transmisores y receptores que son susceptibles a EMI.

Al igual que la taxonomía de las fuentes de emisión, los receptores se pueden dividir en receptores naturales y los hechos por el hombre.

- Receptores naturales de EMI – incluye los seres humanos, animales y plantas.
- Receptores EMI hechos por el hombre – Receptores de comunicaciones electrónicas como los de radio difusión y de radar, amplificadores de audio y video. Equipos industriales como computadoras digitales, controles de procesos industriales, equipos electrónicos de prueba, instrumentos biomédicos. También receptores de consumo que incluye receptores de radio y TV, instrumentos musicales electrónicos, equipo hi-fi estéreo y sistemas de control climático. En esta categoría se puede incluir el RADHAZ (RADiation HAZards) que son los peligros de radiación a dispositivos electro-explosivos y combustibles.

3.3.6. Compatibilidad electromagnética (EMC)

Conocida con sus siglas en inglés como *EMC* (*electromagnetic compatibility*), es la capacidad de un sistema u aparato eléctrico o electrónico para funcionar en el entorno operativo sin causar o experimentar degradación del rendimiento debido a la involuntaria o intencionada EMI.

¿Ha experimentado alguna vez interferencia entre su televisor, su teléfono móvil, la radio, la lavadora, el microondas o las líneas de energía eléctrica? muy seguramente la respuesta es afirmativa, y éstas son sólo algunas de las causas que provoca una incompatibilidad electromagnética. El propósito de EMC es mantener todos los efectos secundarios bajo un control razonable.

El objetivo principal de EMC es reducir al mínimo la influencia de la interferencia electromagnética. Los equipos eléctricos o electrónicos pueden presentar un mal funcionamiento o volverse totalmente inoperables si no están diseñados apropiadamente para minimizar los efectos de interferencia de los entornos electromagnéticos internos y externos. El equipo apropiado y el diseño de sistemas son necesarios para reducir al mínimo las posibles emisiones electromagnéticas en el entorno operativo.

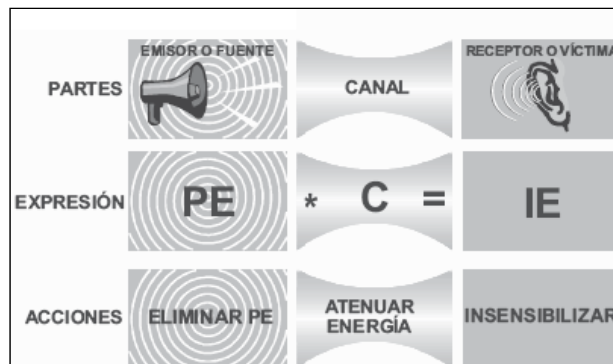
Es importante que los diseños de equipos electrónicos garanticen la correcta ejecución prevista en el entorno electromagnético, para mantener un grado aceptable de compatibilidad electromagnética. La fuente de EMI, menos las pérdidas del mecanismo de acoplamiento resulta en un nivel menor de emisiones en la susceptibilidad de la víctima de un determinado umbral, menos el margen de seguridad.

Los componentes de la compatibilidad electromagnética son:

- Emisor
- Canal de Acople
- Receptor o víctima

En la figura 18 se observa la estructura de la compatibilidad electromagnética, en donde PE representa la perturbación electromagnética proveniente de la fuente, C es el canal de acople entre la fuente y el receptor (víctima), e IE que representa la interferencia electromagnética recibida en el receptor.

Figura 18. **Estructura de la compatibilidad electromagnética**



Fuente: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=23654>.

Consulta: 22 de diciembre de 2012.

Básicamente, la compatibilidad electromagnética, permite la armonía en un ambiente electromagnético en el cual operan equipos receptores cumpliendo su función satisfactoriamente. El correcto desempeño se puede ver afectado por el nivel de las perturbaciones electromagnéticas existentes en el ambiente, así como por la susceptibilidad de los dispositivos y por la cantidad de energía que se pueda acoplar a estos.

Cuando esos tres elementos propician la transferencia de energía no deseada, se produce una interferencia electromagnética, que se puede manifestar como una mala operación, error, apagado y reencendido de equipos o bien en el peor de los casos su destrucción.

La compatibilidad electromagnética de un sistema, está asegurada si:

- La radiación electromagnética generada, no interfiere con el propio sistema.
- La radiación electromagnética generada, no interfiere con otros sistemas electrónicos.
- El sistema es inmune a la interferencia de otros sistemas electrónicos.

Hasta ahora, se ha ahondado en el análisis de interferencia y el impacto que ésta tiene en el desempeño de las comunicaciones electrónicas, pero es muy importante, también, entender de igual manera cuál es el concepto de ruido y sus implicaciones en las telecomunicaciones.

3.3.7. Ruido

El ruido es cualquier señal no deseada que se encuentra en los circuitos de comunicaciones. Son perturbaciones no deseadas superpuestas en una señal útil, que tienden a ocultar su contenido informativo.

Hay muchas variedades de ruido; sin embargo, las cuatro más importantes a tomar en cuenta para las telecomunicaciones son:

- Ruido térmico
- Ruido de intermodulación
- Diafonía (*crosstalk*)
- Ruido de impulso

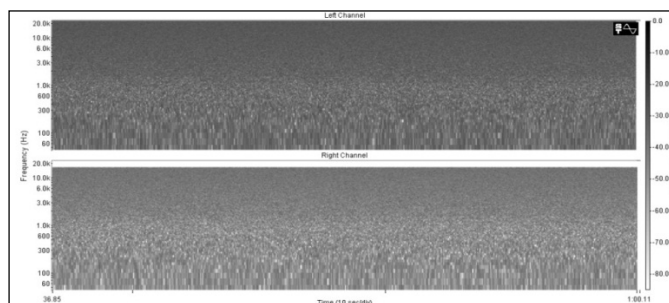
3.3.7.1. Ruido térmico

También llamado ruido blanco, se produce en todos los medios de transmisión y equipos de comunicaciones, incluyendo los dispositivos pasivos. Se origina por el movimiento de electrones al azar, y se caracteriza por una distribución uniforme de energía al azar a lo largo del espectro de frecuencias, con niveles de distribución gaussiana.

Cada elemento de los equipos y el medio de transmisión en sí, contribuyen al ruido térmico de un sistema de comunicación; si la temperatura de ese elemento o medio se encuentra por encima del cero absoluto (-273.15 °C), el ruido térmico estará presente debido al calor de las moléculas. A mayor nivel de calor generado o aplicado, mayor será el nivel de ruido térmico, en otras palabras, la cantidad de ruido es directamente proporcional a la temperatura del medio.

El ruido blanco no suele ser un problema tan serio, a menos que se vuelva tan intenso que destruya la transmisión por completo.

Figura 19. **Ruido blanco codificado en FLAC y MP3 respectivamente**



Fuente: <http://matiasgreco.com/2008/10/el-mp3-y-los-formatos-lossless/>.

Consulta: 22 de diciembre de 2012.

3.3.7.2. Ruido de intermodulación

Es el ruido generado durante la modulación y demodulación que resulta de características no lineales en el dispositivo, generando señales que no existían en la señal original.

La intermodulación sucede cuando las señales de radiofrecuencia (RF) están siendo procesadas a través de mezcladores que no son dispositivos lineales y que tienen múltiples señales de entrada. Las nuevas frecuencias se suman o restan con las originales dando lugar a componentes de frecuencias que antes no existían y que distorsionan la verdadera señal. No todas las frecuencias son creadas con la misma ganancia y algunas no deseadas se filtran.

Por lo general, solamente una diferencia de frecuencia es deseada, pero cualquier otra cosa que se obtenga a través del proceso, será ruido de intermodulación.

3.3.7.3. Diafonía (*crosstalk*)

La diafonía o *crosstalk*, ocurre cuando un circuito recoge señales de otro circuito por el acoplamiento entre líneas que transportan señales. Sucede por diversas causas como blindajes rotos en un cable, que al estar cercano a otro puede causar interferencia, también puede aparecer en enlaces multiplexados que llevan muchas señales discretas, o bien en enlaces microonda en el que una antena recoge un reflejo de otra antena, entre otros.

El clima también juega un papel importante en la aparición de *crosstalk*, ya que un clima húmedo o mojado, puede incrementar el nivel de éste.

Figura 20. **Diafonía entre dos líneas de transmisión**



Fuente: <http://rafazdatos2.blogspot.com/2010/07/distorsion-de-atenuacion-la-atenuacion.html>.

Consulta: 22 de diciembre de 2012.

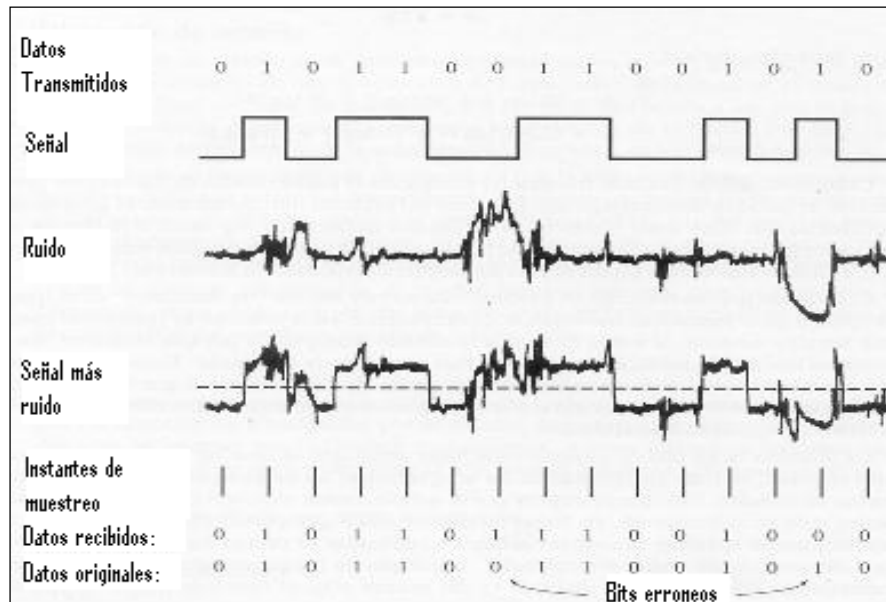
3.3.7.4. Ruido de intermodulación

Denominado también como ruido de impulso por picos, consiste de ocurrencias aleatorias de picos de energía, con amplitudes y contenido espectral aleatorios.

El ruido de impulso es la fuente principal de errores en las comunicaciones de datos. Se escucha como un chasquido o un crujido y puede durar hasta una centésima parte de un segundo.

En las comunicaciones analógicas, éste ruido solo provoca chasquidos breves, pero en las transmisiones digitales, puede dañar un grupo de datos perdiendo bits de toda la información transportada, provocando errores en los datos. Es por ello que el ruido de impulso es muy peligroso para los datos digitales.

Figura 21. Errores provocados por ruido de impulso en una señal digital



Fuente: <http://rafazdatos2.blogspot.com/2010/07/distorsion-de-atenuacion-la-atenuacion.html>.

Consulta: 22 de diciembre de 2012.

Como se puede apreciar en la figura 21, el efecto del ruido de impulso en una señal digital es catastrófico, ya que al añadirse el ruido a la señal original, los datos recibidos (bits), contienen errores diferidos a la señal original enviada, y esto es un peligro para las comunicaciones digitales.

3.3.8. Señal a ruido

En las comunicaciones analógicas y digitales, la relación señal a ruido es una medida de la intensidad de la señal con relación al ruido asociado. Generalmente se denota por S/N y se mide en decibelios (dB).

La relación matemática de la señal a ruido está expresada por:

$$\frac{S}{N} = 20 \text{Log}_{10} \left(\frac{V_S}{V_N} \right)$$

Donde:

S = señal (*signal*)

N = ruido (*noise*)

V_S = voltaje de la señal

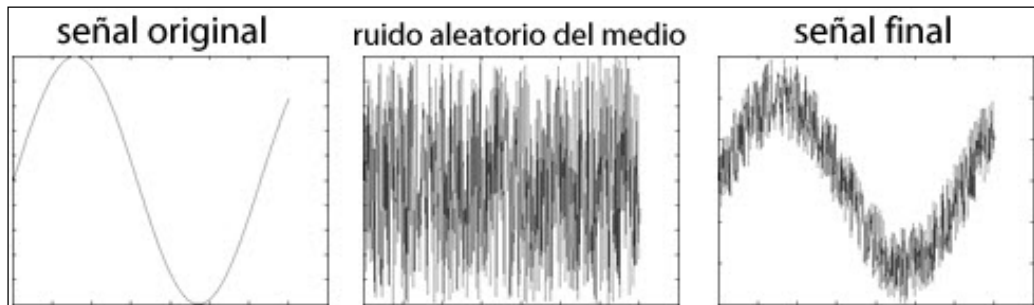
V_N = voltaje del ruido

Si $V_S = V_N$, entonces $S/N = 0$. En esta situación, los bordes de la señal son ilegibles, porque el nivel de ruido compite severamente con la señal. En las comunicaciones digitales, esto probablemente cause una reducción en la velocidad de transmisión de datos, por los errores frecuentes que requiere la fuente para volver a enviar algunos paquetes de datos. Idealmente V_S es mayor que V_N para que la señal a ruido sea positiva. Si V_S es menor que V_N , entonces S/N será negativo. En éste tipo de situación, la comunicación no es confiable y generalmente no es posible, a menos que se tomen medidas para aumentar el nivel de la señal y/o disminuir el nivel de ruido en el receptor.

La magnitud de la señal a ruido en un sistema de comunicaciones, es un factor importante en que tan bien un receptor puede recuperar la información enviada en la señal de su versión corrupta, y así poder comunicar información confiable.

En términos generales, para un valor dado de S/N , el rendimiento depende de cómo es codificada la cantidad de información dentro de los parámetros de la señal, y el método de recuperación de la señal recibida.

Figura 22. **Señal original sin ruido y con ruido**



Fuente: <http://tumblr.charlio.com/post/11619187001/por-que-escogi-teleco-ii-matematicas-e-informacion>. Consulta: 22 de diciembre de 2012.

En la figura 22 se contempla: una señal original libre de ruido, ruido aleatorio del medio, y la misma señal con ruido agregado en la recepción.

Cuanto más complejo sean los métodos de codificación como *PSK* (*phase shift key*) o *QAM* (*quadrature amplitude modulation*), por lo general, resultan en un mejor desempeño que en esquemas más sencillos como *ASK* (*amplitude shift key*) o *FSK* (*frequency shift key*).

El objetivo de los ingenieros de comunicaciones es maximizar la relación S/N, con métodos, como usar el ancho de banda más estrecho posible en el sistema receptor, coherente con la velocidad de datos deseada, o bien las técnicas de ensanchado de espectro, que pueden mejorar el rendimiento del sistema.

La señal a ruido puede ser incrementada proveyendo a la fuente con un alto nivel de potencia de salida si es necesario. En algunos sistemas de alto nivel como los radiotelescopios, el ruido interno es minimizado reduciendo la temperatura de los circuitos cerca del cero absoluto.

En sistemas inalámbricos, siempre es importante optimizar el rendimiento de las antenas transmisoras y receptoras.

3.3.9. Teorema de Shannon

El teorema de Shannon está sumamente relacionado con la presencia de ruido en la transmisión, y establece que la capacidad de un canal continuo de determinado ancho de banda, perturbado por el ruido de potencia espectral, determina la velocidad de transmisión. En 1948 Shannon comprobó que en un canal, el ruido altera la velocidad de la señal en relación a la potencia del ruido y a la potencia de la señal.

El teorema de Shannon está dado por:

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

Donde:

C = capacidad del canal alcanzable

B = ancho de banda de la línea

S = potencia promedio de la señal

N = potencia promedio del ruido

La capacidad del canal está expresada en bits/seg.

El teorema de Shannon da un límite superior a la capacidad de un enlace en función del ancho de banda disponible y la relación señal a ruido del enlace.

3.3.10. Interferencia de radiofrecuencia

¿Alguna vez se ha preguntado por qué la interferencia que reciben las comunicaciones por radio en la banda a veces puede perturbar la señal? La probabilidad de interferencia se basa en el potencial de transferencia de la densidad de potencia involucrada, debido a la proximidad de los equipos y sistemas de antenas, y los distintos mecanismos de transferencia y rendimiento de los equipos. Los mecanismos de transferencia electromagnética pueden variar dependiendo de los modos de operación, las condiciones de propagación y otras variables. Pueden ser muchas las rutas de propagación que existen para la transferencia de señal de los transmisores a receptores en el entorno de radiofrecuencia de una banda de las comunicaciones por radio.

Los parámetros de acoplamiento de antena a antena pueden variar dependiendo de la ganancia de la antena, directividad, ancho del haz, lóbulos laterales, la polarización, la separación, las condiciones de propagación de la ruta (camino de pérdida), etc.

Las características del receptor que influyen en el rendimiento son:

- El ruido
- Rango dinámico
- Sensibilidad
- Selectividad
- Desensibilización
- Susceptibilidad de la señal adyacente
- Intermodulación
- Modulación cruzada
- Susceptibilidad de respuesta no válida

Una vez determinado un tipo particular de interferencia a ser probable, cualquier análisis debe limitarse a sus efectos más predominantes.

Los siguientes tipos de interferencia son aplicables a la radiofrecuencia de los equipos de comunicaciones:

3.3.10.1. Interferencia co-canal en el receptor

Se define como señales indeseables con componentes de frecuencia que caen en la banda paso del receptor RF y son trasladadas a la frecuencia intermedia (IF) en la banda de paso a través de la etapa mezcladora. La frecuencia de la señal de interferencia es igual a la suma de las frecuencias del receptor sintonizado y la mitad del ancho de banda más estrecho IF.

Estas señales son amplificadas y detectadas a través del mismo proceso que el de las señales deseables, por lo que un receptor es muy susceptible a estas emisiones, incluso en niveles inferiores.

Como resultado se tiene la desensibilización del receptor, ocultación de la señal y distorsión.

3.3.10.2. Interferencia adyacente en el receptor

Señales indeseables con componentes de frecuencia, las cuales caen en o cerca de la banda de paso del receptor RF y son trasladadas fuera de la banda de paso IF a través de la etapa mezcladora. Estas señales deben ser de suficiente amplitud para producir efectos no lineales en el amplificador RF del receptor o etapas del mezclador.

Algunas de las señales resultantes de respuesta no lineal pueden ser convertidas a la frecuencia pasa banda IF, a través de la etapa mezcladora en donde son amplificadas y detectadas mediante el mismo proceso que las señales deseadas. Esto se vuelve similar en este punto a las señales de interferencia co-canal.

Las emisiones indeseables que son trasladadas fuera de la banda de paso IF, pueden pasar aún por el resto de las etapas del receptor, si son lo suficientemente elevadas como para sobrevivir fuera del paso de atenuación. Las emisiones indeseables pueden ser entonces procesadas por el detector y la respuesta predominante en este caso es la desensibilización.

Los resultados por éste tipo de interferencia son efectos no lineales en las etapas RF o mezcladora, produciendo desensibilización del receptor, intermodulación y modulación cruzada.

3.3.10.3. Interferencia fuera de banda en el receptor

Señales indeseables con componentes de frecuencia que son removidos de forma significativa de la banda de paso del receptor RF. Señales de alto nivel pueden producir respuestas falsas en el receptor si son mezcladas con las armónicas del oscilador local (LO) para producir una caída en la banda de paso IF. La respuesta falsa resulta a partir de la mezcla de la señal indeseada con el oscilador local del receptor. La amplitud de estas respuestas es directamente proporcional al nivel de las señales indeseables previa a la mezcla con el oscilador local. Las respuestas falsas en un receptor, generalmente ocurren a frecuencias específicas; cualquier otra señal fuera de la banda es atenuada por la selectividad IF.

Como resultado se experimenta una respuesta indeseable creada por la mezcla de la señal no deseada, con el oscilador local.

Las señales no deseadas, que se mezclan con el LO y que son capaces de ser trasladadas a las etapas IF, son las frecuencias de respuesta espurias.

Estas frecuencias y sus niveles de potencia de interferencia, son una función de la susceptibilidad del receptor a estas respuestas.

3.3.10.4. Emisiones de fundamental en el transmisor

Las señales fundamentales de salida del transmisor, incluyen las características de la distribución de potencia sobre un rango de frecuencias alrededor de la frecuencia fundamental. Éstas son determinadas por las características de la modulación en banda base y son representadas por una función de modulación envolvente.

El principal parámetro asociado con la modulación de envolvente es el ancho de banda nominal del transmisor (3dB). Esto puede ser derivado de las características de la modulación del transmisor medido, o de las especificaciones del fabricante.

La distribución de potencia en las bandas laterales de modulación puede ser representada por una función de modulación envolvente que muestra la variación de potencia con la frecuencia.

3.3.10.5. Emisiones de armónicos en el transmisor

La principal preocupación con las emisiones de armónicos en el transmisor, es la salida de las señales no deseadas que están armónicamente relacionadas con la señal fundamental, más que a otros circuitos del oscilador.

La potencia relativa asociada con la emisión de armónicos puede ser modelada utilizando datos para el tipo particular de transmisor.

Sin embargo, dado a que la potencia de salida armónica puede variar considerablemente de un transmisor a otro por el mismo tipo y modelo, debe estar representada estadísticamente.

Modelos de emisión de armónicos pueden obtenerse a partir de resúmenes estadísticos de los datos medidos o de las especificaciones del fabricante de los equipos. Modelos de emisiones espurias del transmisor para la predicción de las frecuencias por encima de la fundamental están basados en los niveles de emisión de armónicos. La envolvente de modulación debe estar representada por los armónicos, como se hizo para la fundamental.

3.3.10.6. Ruido de transmisión

El ruido en el transmisor incluye el espectro de salida, que es el resultado del ruido térmico generado en el driver y etapas finales de amplificación, así como el ruido sintetizador de las etapas de niveles más bajos. Este es un ruido de banda ancha; sin embargo, por lo general no cubre la inmediación de las bandas laterales de modulación. El nivel puede ser especificado como la potencia por ancho de banda en función de la frecuencia (dBm / Hz).

3.3.10.7. Intermodulación en el transmisor

Son señales no deseadas que resultan de la mezcla local de la salida de emisiones de un transmisor, con las de otro transmisor. La mezcla ocurre usualmente en los circuitos no lineales de un transmisor cuya antena recibe un nivel alto de RF, de otra antena transmisora en proximidad cercana.

Los productos mezclados son radiados por la antena del transmisor como posibles señales co-canal o adyacente de señal de interferencia.

4. MÉTODOS DE REDUCCIÓN DE EMI

Las ondas electromagnéticas existen en la naturaleza como consecuencia de la radiación procedente de átomos o moléculas cuando cambian de un estado energético a otro, y por las fluctuaciones naturales como los rayos, tal y como se mencionó en el capítulo anterior. Por ello, uno de los problemas y retos más importantes que se encuentran en el entorno electromagnético, es el de proporcionar compatibilidad entre equipos transmisores y receptores de RF dentro del ambiente que los rodea.

La vulnerabilidad de los enlaces de comunicación a fuentes de interferencia está incrementando cada vez más, así como el número de sistemas de transmisión, congestión en las bandas y actividad de interferencia intencional, representando amenazas significantes para la operación normal, disponibilidad y confiabilidad de los sistemas de comunicación.

El costo de proporcionar numerosas modificaciones a los sistemas operacionales, y la pérdida de la eficiencia a causa de la presencia de interferencia, representa un serio problema para muchas organizaciones.

La interferencia electromagnética no es posible eliminarla en su totalidad debido a que existe y es parte de la naturaleza, pero si es posible minimizarla de acuerdo a los diferentes métodos de reducción.

4.1. Control de EMI

El control de EMI y la garantía de la compatibilidad electromagnética, comprende una serie de disciplinas relacionadas con:

- Caracterización de la amenaza.
- Establecimiento de normas para los niveles de emisión y susceptibilidad.
- Diseño para el cumplimiento de las normas.
- Pruebas para el cumplimiento de las normas.

Asimismo, las condiciones principales que influyen en los factores de una antena son:

- La separación de la antena
- La altura de la antena sobre el nivel del suelo
- La orientación de la antena respecto al suelo
- La conductividad del plano de tierra

Una antena receptora de radio está sintonizada para recibir cierta banda de radiofrecuencias, y que todas las señales en ese rango son recibidas por la antena, independientemente de qué fuente es radiada. Cualquier otra fuente eléctrica que transmita radiación electromagnética en esa banda de frecuencias, causará interferencia en la recepción de la antena.

El problema radica en la falta de selectividad en la recepción de las ondas electromagnéticas, lo cual conduce a interferencias.

A medida que más productos electrónicos como teléfonos móviles, radiotransmisores, dispositivos de conmutación de estado sólido, dispositivos de manejo de motores, etc. son desarrollados y lanzados al mercado, el aumento en la contaminación electromagnética está incrementándose cada día. Estos dispositivos causan emisiones al medio ambiente en el que son utilizados. Como resultado de esas emisiones, éstas afectarán a otros equipos electrónicos que son susceptibles a dichas emisiones.

Mientras más microprocesadores son utilizados para reemplazar medios analógicos o mecánicos, es evidente que el problema de compatibilidad electromagnética no puede ser ignorado. Hacer caso omiso de ello, podría causar un mal funcionamiento repentino en los equipos o incluso daños a las propiedades de éstos o bien, vidas.

La interferencia electromagnética puede ser reducida o eliminada mediante el uso de diversas técnicas de supresión. La cantidad de EMI que es producida por un transmisor de radio, se puede controlar mediante la reducción de las antenas de transmisión a la frecuencia correcta, lo que limita el ancho de banda; y también usando redes de filtrado electrónico, así como blindaje metálico.

La interferencia electromagnética radiada durante la transmisión puede ser controlada por la separación física de las antenas de transmisión y recepción, el uso de antenas direccionales, y la limitación de ancho de banda de la antena.

Los métodos más comunes de reducción de ruido e interferencia incluyen:

- Eliminación de la fuente de interferencia
- Blindaje
- Conexión a tierra
- Filtrado
- Materiales magnéticos para la reducción de EMI y EMC
- Aislamiento
- Orientación y polarización de las antenas
- Separación y posicionamiento de las antenas
- Técnica de difusión del espectro (*spread spectrum*)

4.1.1. Eliminación de la fuente de interferencia

Una técnica efectiva para erradicar la interferencia es a través de la identificación y eliminación de la fuente que la provoca. En teoría, esto representa sin duda la más eficaz de cualquiera de las medidas, pero no es práctico en la mayoría de situaciones, ya que esto requeriría deshabilitar periódica o permanentemente a la fuente de la operación.

4.1.2. Blindaje

El blindaje es el método más utilizado para suprimir y controlar las interferencias electromagnéticas no deseadas en el diseño de equipos electrónicos utilizados en las telecomunicaciones.

Una manera efectiva de minimizar o en algunos casos eliminar los efectos de EMI, es proteger de manera efectiva los componentes, de la interacción con la energía electromagnética.

Este método es a menudo costoso y causa de los principales desafíos de la ingeniería, especialmente para proteger completamente a un dispositivo, el cual requiere que el material conductor encierre completamente a un equipo o circuito. Cualquier separación en el material de protección, reduce la efectividad de la técnica del blindaje.

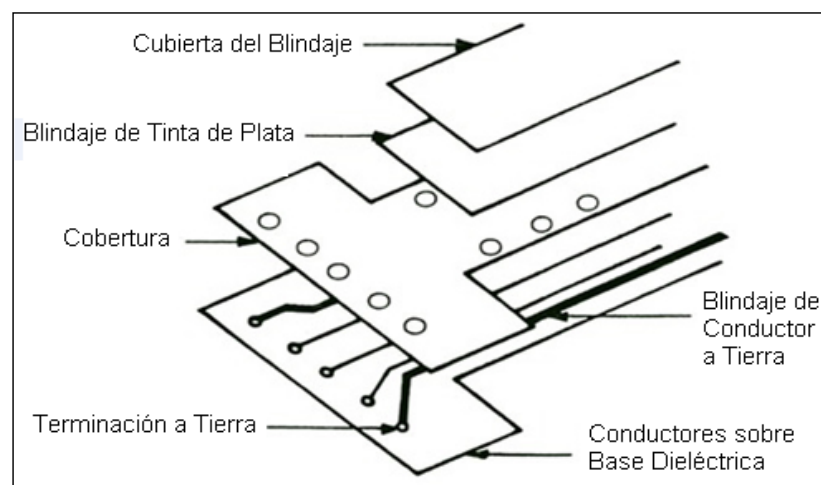
El propósito del blindaje electromagnético, es atenuar la interferencia electromagnética entre las fuentes y los equipos susceptibles a ella. Una explicación de cómo funciona el blindaje es que los campos de EMI inducen corrientes de circulación en el blindaje, y los campos creados por esas fuentes circulantes se oponen a los campos de EMI, por lo que los campos netos en el blindaje son reducidos. Otra explicación es que el blindaje atenúa los campos de EMI por la combinación de reflexión y absorción. Independientemente de cual explicación sea la más atractiva, la aplicación del blindaje electromagnético es el mismo.

Para una fuente blindada, el nivel de EMI fuera del blindaje se verá reducido en gran medida por debajo del nivel en el interior del blindaje, y todo el equipo susceptible será beneficiado; para un equipo blindado, la interferencia electromagnética de fuentes externas, será reducida a niveles mucho más bajos dentro del blindaje, que el nivel fuera de él y solamente el equipo blindado en particular será beneficiado.

Cuando una onda electromagnética incide en un blindaje, parte de su energía es reflejada en la primera superficie de éste, alguna parte es absorbida por el escudo y alguna otra es transmitida a través de éste. Parte de la energía también puede ser reflejada en la segunda superficie del blindaje.

Existen diversos tipos de blindaje utilizados en los circuitos, entre los cuales se encuentran: la lámina de cobre sólido, lámina de malla de cobre, revestimientos de tinta conductora, entre otros, siendo el cobre sólido el método más común de blindaje.

Figura 23. **Blindaje de tinta conductora de plata**



Fuente: <http://www.pfcflex.com/Technology/Shielding/tabid/76/Default.aspx>.

Consulta: 27 de diciembre de 2012.

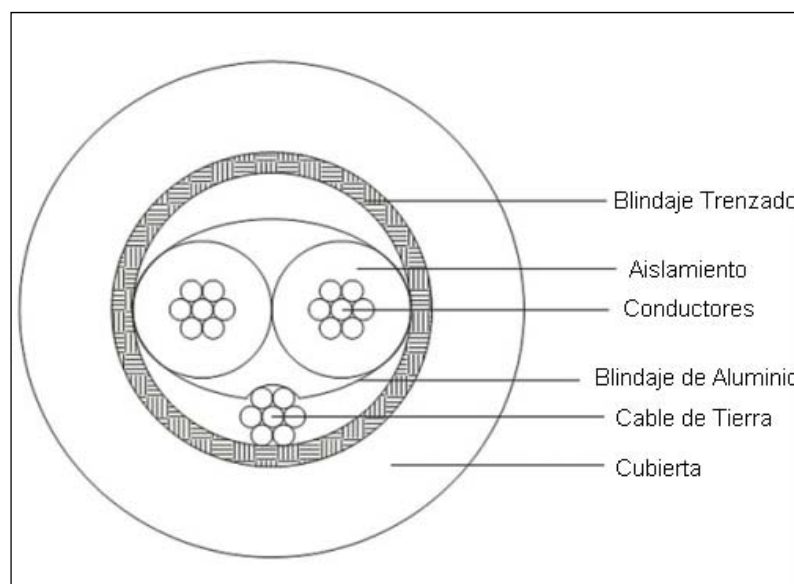
Se entiende entonces, que la técnica de blindaje es el uso de materiales conductores para reducir la interferencia electromagnética radiada por reflexión o absorción. Usualmente la atenuación teórica ofrecida por los materiales a las ondas electromagnéticas, no coincide con la alcanzada en la práctica, esto es porque el recinto o alojamiento blindado no está completamente sellado.

Cualquier aplicación de blindaje, tiene algún tipo de penetraciones y aberturas. Esas aberturas pueden causar fugas y por lo tanto comprometen la integridad del material de blindaje, el cual puede ser restaurado a través del uso de uniones y selladores de EMC, y grasa conductiva.

Las uniones proveen aplicaciones de sellado temporal o semipermanente entre las articulaciones y estructuras. Los selladores incluyen resinas que son utilizadas para unir, conectar y sellar dos o más superficies metálicas, como también, taponar conductores, que se utilizan para proteger y sellar dos o más miembros metálicos, unidos por otros medios mecánicos. La grasa conductiva provee una baja resistividad de contacto entre los miembros a unir.

El blindaje incluye también, el proteger a los cables como los coaxiales, con una capa aislante. El blindaje en los cables es una de las mejores formas de evitar ruido de impulso, evitando para ello luces y maquinaria, y también, para evitar diafonía separando los cables de comunicación de otros cables, cambiando la ubicación física de éstos, especialmente del cableado eléctrico.

Figura 24. **Cable con blindaje de aluminio**



Fuente: <http://www.solostocks.com/venta-productos/cables/otros-cables-conectores/cable-dmx-profesional-blindaje-doble-1par-100m-6151556>. Consulta: 27 de diciembre de 2012.

El blindaje tiene un propósito recíproco, ya que protege un circuito de ruido externo o señales indeseables, y por el contrario retiene sus propias señales y con ello protege el mundo externo de su propia interferencia.

4.1.3. Conexión a tierra

Un punto de conexión a tierra representa un punto de referencia común para uno o múltiples dispositivos, que opera de manera que garantice la seguridad de los equipos o de quienes los operan. Su efecto provee cierta inmunidad al ruido y a la interferencia. Algunos equipos electrónicos y de transmisión, requieren adecuada conexión a tierra para asegurar la operación correcta. El conductor utilizado para aterrizar el equipo deberá ser el de menor longitud necesaria para evitar una condición de bucle de tierra, ya que esto podría resultar en una transferencia de energía a través de la conducción de los equipos conectados.

El bucle de tierra es una condición donde una conexión no deseada a tierra es hecha a través de un conductor eléctrico que interfiere. Generalmente una conexión de bucle de tierra existe cuando un sistema eléctrico está conectado a través de más de una forma a la tierra eléctrica.

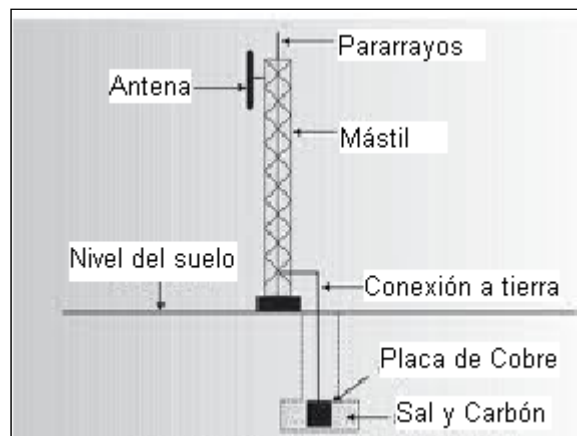
Cuando uno o más dispositivos están conectados a una base común a través de caminos diferentes, entonces se produce un bucle de tierra. Corrientes fluyen a través de estos caminos diferentes y desarrollan tensiones que pueden causar daños, ruido o zumbidos en equipos de audio o video.

Para prevenir los bucles de tierra, todas las señales necesitan estar conectadas a un punto común, y cuando dos puntos de tierra no pueden ser evitados, un lado debe aislar la señal y tierra del otro.

La conexión a tierra es uno de los temas menos comprendidos de la compatibilidad electromagnética, a pesar de que parece sencillo. Conexiones a tierra incorrectas, son la fuente de muchos problemas de EMI, y ésta es necesaria para prevenir peligros de choque eléctrico, los cuales ocurren cuando un cable o componente de aislamiento se rompe. De igual manera la conexión a tierra protege contra el daño de relámpagos y es necesaria para reducir los efectos de EMI debido a acoples de flujo de campo eléctrico o magnético, así como acoples de flujos de impedancia común.

Hay dos razones por las que la conexión a tierra no es bien comprendida, una es que los requerimientos de control de seguridad y riesgo de choque eléctrico existían antes de la electrónica y áreas de alta frecuencia, de manera que las técnicas tradicionales de conexión a tierra fueron desarrolladas para satisfacer esos requerimientos. La segunda razón es que a veces ocurre un conflicto entre requerimientos de conexiones a tierra seguras y el control de EMI.

Figura 25. **Conexión a tierra en una torre de telecomunicaciones**



Fuente: elaboración propia, con programa Snagit 11 Editor.

En la figura 25 se aprecia una conexión a tierra en una torre de telecomunicaciones para reducir el nivel de EMI alrededor de la antena. La sal y el carbón vegetal se utilizan como tratamiento químico para reducir la resistencia del sistema de puesta a tierra.

El propósito de la conexión a tierra, además de proteger a la gente, plantas y equipos, es de proveer un camino seguro para la disipación de corrientes de fallas, rayos, descargas estáticas, EMI y señales de radiofrecuencia.

Siempre que se opere con problemas de conexión a tierra, hay que recordar que no existe la tierra absoluta, ya que hay una cierta cantidad de resistencia a corriente eléctrica entre todos los puntos de la conexión a tierra. Esta resistencia puede cambiar con la humedad, temperatura, cantidad de equipos conectados y muchas otras variables. No importa cuán pequeña sea, la resistencia siempre puede permitir que exista un voltaje eléctrico cuando haya cualquier corriente fluyendo entre los puntos de conexión a tierra (y hay una cierta corriente que fluye casi siempre).

La razón por la cual una conexión a tierra no es y nunca será perfectamente libre de ruido, es que el electrodo conductor de puesta a tierra no es más que un cable largo de un punto A, a un punto B, y mientras más largo sea el cable, mayor ruido va a recoger.

4.1.4. Filtrado

Cuando la fuente del ruido de la señal no puede ser eliminada, el filtrado se recomienda como último recurso. Los filtros de EMI y granos de ferrita son los filtros comúnmente disponibles.

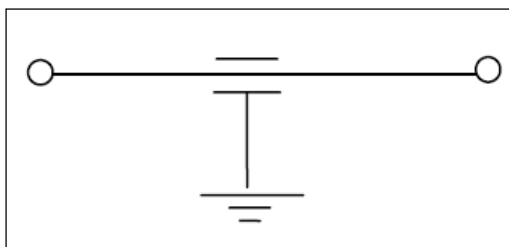
El uso de filtros permite pasar a las frecuencias seleccionadas a través del dispositivo conectado, mientras que rechaza o atenúa cualquier otra frecuencia que esté dentro de las especificaciones del filtro. Ejemplos de estos son los filtros pasa bajo, pasa banda y pasa altos.

Los filtros de EMI están disponibles en el mercado para eliminar ruido de alta frecuencia, no solo detienen el ruido de entrada en el sistema, sino que también detienen el ruido generado por el sistema, evitando que abandone éste alcanzando otras partes más grandes del sistema; éste efecto es llamado bidireccional.

Una combinación de condensadores e inductores componen los filtros de EMI; la impedancia de un nodo que requiere un filtro de EMI, determina la configuración de condensadores e inductores. Un nodo de alta impedancia requiere un condensador, más un nodo de baja impedancia requiere de un inductor.

Los filtros de EMI se pueden encontrar en configuraciones como condensador de paso, circuitos L, PI (π) y T. El componente de un condensador de paso es el condensador como se muestra en la figura.

Figura 26. **Configuración de condensador de paso**

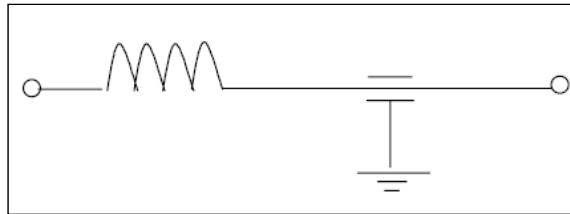


Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Word 2010.

Para el diseño debe tomarse en cuenta que el condensador de paso no provee aislamiento de corriente de alta frecuencia entre nodos.

En la figura 27 se puede observar un circuito L, el cual contiene un inductor a un lado del condensador.

Figura 27. **Circuito L con inductor a un lado**

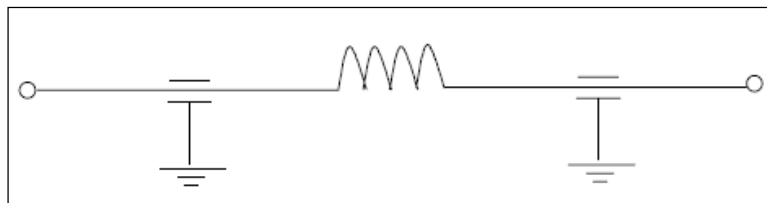


Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Word 2010.

Esta configuración es la más adecuada para aplicaciones en las que hay grandes diferencias entre las líneas y las impedancias de carga, conectando el elemento inductivo a la impedancia más baja.

Los filtros PI consisten de 3 elementos, dos condensadores rodeando a un inductor como se puede apreciar en la figura 28.

Figura 28. **Circuito PI con dos condensadores rodeando un inductor**

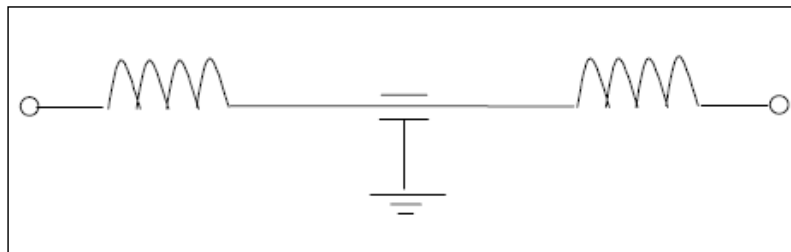


Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Word 2010.

Los filtros PI son los más adecuados para aplicaciones en las que las impedancias de entrada y salida tienen un valor similar y cuando altos niveles de atenuación son requeridos.

En la figura 29 se puede apreciar el circuito T, el cual también es un dispositivo de tres elementos, compuesto de dos inductores conectados en serie entre las terminales de entrada y salida en cada lado de un solo condensador conectado a tierra. Éste funciona mejor cuando las impedancias de la línea y de la carga son bajas.

Figura 29. **Circuito T con un inductor a cada lado del condensador**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Word 2010.

El problema con los inductores y condensadores, es que no se comportan en sus valores establecidos, especialmente a altas frecuencias debido a los efectos de inductancia y capacitancia parásitas. Bajo ciertas condiciones su rendimiento se degrada en frecuencias tan bajas como 1Mhz.

Dispositivos inductivos como transformadores, solenoides y relés, producen campos de baja impedancia que son fuentes de EMI si no son controladas. Las principales técnicas disponibles para controlar dispositivos productores-transitorios implica el uso de filtros; y para controlar campos magnéticos, el uso de blindaje como vimos anteriormente.

4.1.5. Elementos magnéticos para reducción de EMI y EMC

Los productos que utilizan magnetismo para reducir EMI y mejorar la compatibilidad electromagnética en un circuito, pueden ser clasificados en varias categorías, pero para este estudio se basará en los siguientes:

- Inductores
- Bobinas
- Transformadores
- Supresores de ruido de ferrita

Al considerar cualquiera de estos componentes, es necesario identificar las rutas de los circuitos o áreas posibles que puedan realizar o emitir ruido.

4.1.5.1. Inductores

El filtro de EMI más común es el inductor o bobina, utilizándose las bobinas para el filtrado de líneas y almacenamiento de energía. Si un circuito es sospechoso de ser una fuente de EMI, a menudo la selección adecuada del inductor puede ayudar a eliminar el problema.

Para interferencia radiada, la elección de un inductor blindado o toroidal, puede frecuentemente eliminar o al menos reducir en gran medida la frecuencia intrusa. De hecho los inductores toroidales como los LPT-4545 o LPT-3535 o las series TE, TD o TJ de toroides de plomo, virtualmente eliminan los campos radiados por la habilidad única del toroide de contener el flujo magnético dentro de su núcleo.

Figura 30. **Inductor toroidal LPT-4545**



Fuente: <http://www.vishay.com/inductors/list/product-34069/>.

Consulta: 27 de diciembre de 2012.

El toroide, es también, menos susceptible al ruido inducido de otros componentes, puesto que el campo magnético aplicado induce corrientes iguales y opuestas dentro del toroide, cancelando así la interferencia inducida.

4.1.5.2. Bobinas

Las bobinas son utilizadas para eliminar ruido de modo común y diferencial en un par de conductores. El ruido de modo común es definido como ruido que está presente o es común a ambos conductores, y puede ser el resultado de ruido inducido causado por el efecto antena de un conductor o las líneas de un circuito impreso.

El ruido común está típicamente en fase dentro de los conductores, mientras que el ruido diferencial está presente solamente en un conductor o presente en fase opuesta en ambos conductores. Las bobinas de modo común usan las propiedades de dos campos magnéticos cercanos para eliminar el problema de interferencia, cancelando el ruido dentro de los campos magnéticos.

Estos dispositivos son los mejores empleados para eliminar EMI o ruido en cables o en pistas de señal. La bobina debe ser ubicada lo más cerca del circuito receptor o en el punto de entrada de la señal del circuito.

La selección adecuada del componente inductivo puede ayudar a acoplar la línea de impedancia, y puede actuar como un filtro de ancho de banda para el circuito. Las bobinas de serie LPT y LPE pueden ser configurados en modo común o en modo diferencial, dependiendo de su aplicación.

4.1.5.3. Transformadores

El principal beneficio de utilizar un transformador para EMI/EMC, es que puede proporcionar una barrera de aislamiento entre una línea de señal y el circuito de procesamiento de señales (particularmente donde la línea de señal sale del sistema). Éste es el caso de las señales en movimiento o recibidas, ya que el aislamiento de la línea reduce el ruido de modo común y elimina las diferencias de potencial de tierra (o señal de retorno) entre sistemas.

Un área particular donde la alta inmunidad al ruido es esencial, es en circuitos con tiristores y triacs; aquí el transformador proporciona un aislamiento entre la carga accionada y un controlador lógico base.

El transistor de aislamiento de pulso provee una mejor inmunidad al ruido que un transistor bipolar de puerta aislada, debido a la inherente baja capacitancia de acople (típicamente de 10 pF para un pulso transformador comparado a los nanofaradios para un dispositivo de potencia de transistor bipolar de puerta aislada).

La baja capacitancia de acople, mejora la inmunidad del circuito del ruido de la fuente de alimentación principal o de dispositivos de conmutación de potencia. Los transformadores LPE y PT pueden ser usados para EMI/EMC.

Figura 31. **Transformador serie LPE**

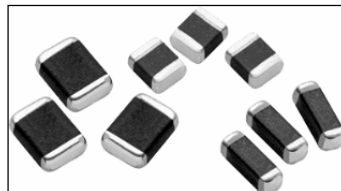


Fuente: <http://www.vishay.com/inductors/list/product-34067>. Consulta: 27 de diciembre de 2012.

4.1.5.4. **Supresores de ruido de ferrita**

Los supresores de ruido de ferrita realizan la función de remover la energía de RF que existe dentro de la estructura de líneas de transmisión o líneas de circuito impreso. Para remover la energía RF no deseada, la ferrita es utilizada como resistor (atenuador) de alta frecuencia que permite a la corriente directa pasar a la vez que absorbe la energía RF, disipando la energía en forma de calor.

Figura 32. **Supresores de ruido de ferrita**



Fuente: <http://www.vishay.com/docs/34101/ilbb1210.pdf>. Consulta: 27 de diciembre de 2012.

Ventajas del montaje de ferrita en la superficie de los conductores:

- Pequeño, ligero y económico
- Los valores de alta impedancia remueven una amplia gama de energía RF
- El circuito magnético cerrado elimina la diafonía
- Son blindados
- Excelente capacidad de llevar corriente
- Excelente rendimiento en la eliminación de energía RF
- Reducción de oscilaciones espurias o resonancias
- Amplia gama de impedancias (de algunos ohmios a $2k\Omega$)
- Funciona con eficacia desde varios MHz hasta 1GHz
- Bajos niveles de resistencia a DC minimizan la degradación de la señal deseada

Para escoger el dispositivo de ferrita adecuado, se deben tomar en cuenta las siguientes interrogantes:

- ¿Cuál es el rango de frecuencias no deseadas?
- ¿Cuál es la fuente de EMI?
- ¿Cuánta atenuación es requerida?
- ¿Cuáles son las condiciones ambientales y eléctricas (temperatura de voltaje DC, máximas corrientes de operación, intensidad del campo, etc.)?
- ¿Cuál es el máximo perfil permitido y estado real del problema para el uso de éste dispositivo?

Los supresores de ruido de ferrita añaden inductancia en serie con la línea, la impedancia agregada es una función de la frecuencia. La pérdida de inserción es calculada de la siguiente manera:

$$Pérdida = 20 \text{Log}_{10} \left[\frac{(Z_S + Z_L + Z_F)}{Z_S + Z_L} \right]$$

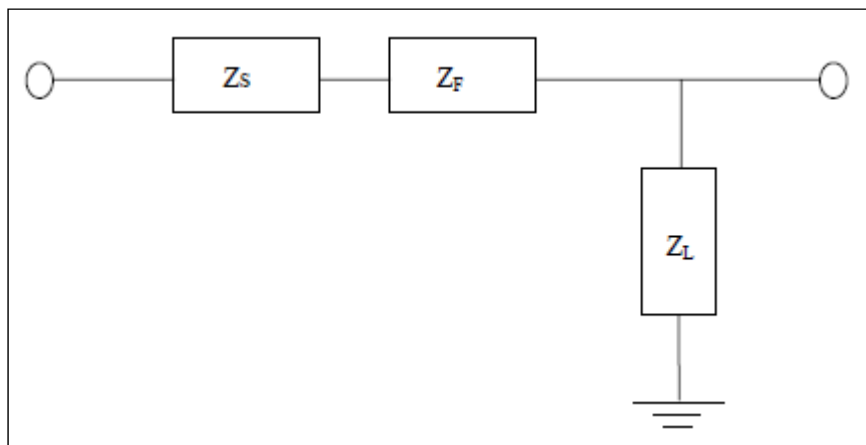
Donde:

Z_S = impedancia de la fuente

Z_L = impedancia de la carga

Z_F = impedancia de la ferrita

Figura 33. **Circuito equivalente de impedancia de ferrita en el sistema**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Word 2010.

Sin añadir resistencia a la corriente directa, el supresor de ferrita añade suficiente inductancia a la línea. Esta cualidad lo hace la elección ideal para supresores de ruido de línea en los pines Vcc de los dispositivos.

4.1.6. Aislamiento

El aislamiento consiste en la interrupción de la continuidad óhmica en algún punto de la cadena de medida. Éste aislamiento debe de aplicarse no solo a la señal que se desea proteger de las interferencias, sino también, a la alimentación. Este puede ser categorizado como aislamiento eléctrico y aislamiento de seguridad.

El aislamiento eléctrico se refiere a la eliminación de caminos a tierra entre dos sistemas eléctricos. Al proporcionar aislamiento eléctrico se pueden romper los bucles de tierra, incrementar el rango de modo común del sistema de adquisición de datos y cambiar el nivel de la señal de referencia a tierra a un sólo sistema a tierra.

Las normas de aislamiento de seguridad tienen requerimientos específicos para aislar humanos del contacto con voltajes peligrosos. También caracteriza un sistema eléctrico para prevenir altos voltajes y voltajes transitorios de ser transmitidos a través de su frontera a otros sistemas eléctricos con los que se pueda entrar en contacto.

Incorporar aislamiento a los sistemas conlleva a tres funciones primarias:

- Prevenir bucles de tierra
- Rechazar voltajes de modo común
- Proporcionar seguridad

El aislamiento físico es la forma más básica de aislamiento, lo que significa que existe una barrera física entre dos sistemas eléctricos.

Ésta puede ser en la forma de aislamiento, un espacio de aire o cualquier camino no conductor entre los sistemas eléctricos. Con el aislamiento físico puro; sin embargo, implica que no existe transferencia de señal entre los sistemas eléctricos.

Cuando se trata con sistemas aislados de medición, se debe tener una transferencia o acople de energía a través de la barrera de aislamiento.

Hay tres tipos de aislamiento que se pueden utilizar en un sistema de adquisición de datos:

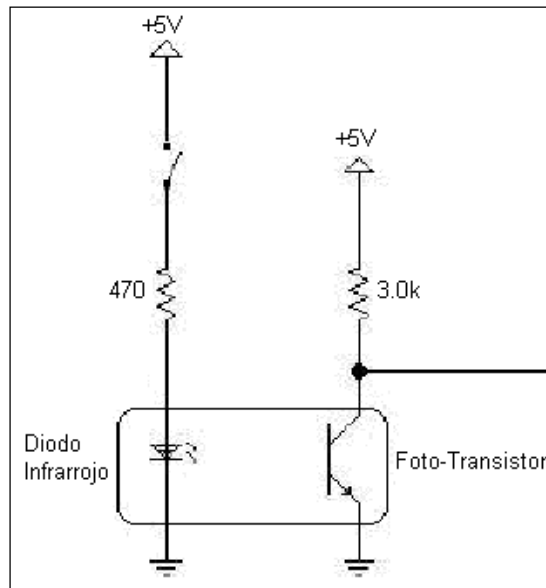
- Aislamiento óptico
- Aislamiento electromagnético
- Aislamiento capacitivo

4.1.6.1. Aislamiento óptico

El aislamiento óptico es común en sistemas de aislamiento digital. El medio para transmitir la señal es la luz, y la barrera de aislamiento físico suele ser un espacio de aire. La intensidad de la luz es proporcional a la señal medida; la señal de luz es transmitida a través de la barrera de aislamiento y detectada por un elemento fotoconductor en el lado opuesto de la barrera de aislamiento.

En la figura 34 se observa un circuito de aislamiento óptico, formado por un diodo infrarrojo (emisor) y por un fototransistor (receptor), con espacio de aire entre ambos.

Figura 34. **Circuito con aislamiento óptico**



Fuente: elaboración propia, con programa Circuit Maker 2000.

4.1.6.2. **Aislamiento electromagnético**

El aislamiento electromagnético utiliza un transformador para acoplar una señal a través de la barrera de aislamiento, mediante la generación de un campo electromagnético proporcional a la señal eléctrica. El campo es creado y detectado por un par de bobinas conductoras; la barrera física puede ser aire o algún otro tipo de barrera no conductora.

4.1.6.3. **Aislamiento capacitivo**

El aislamiento capacitivo es otro tipo de aislamiento en el que un campo electromagnético cambia el nivel de carga en el condensador, esta carga es detectada a través de la barrera y es proporcional al nivel de la señal medida.

Para el aislamiento también existe el papel de aislamiento eléctrico y la película dieléctrica, los cuales son utilizados en aparatos y artefactos de iluminación; son requeridos para evitar la formación de arcos y cuando el aislamiento eléctrico es necesario.

4.1.7. Orientación y polarización en las antenas

El desempeño de una antena es controlado o influenciado por un número de factores como la orientación, polarización, separación, etc. los cuales deben ser considerados cuidadosamente para obtener el óptimo rendimiento de la antena en sistemas de comunicación por radiodifusión, tierra-aire-tierra y comunicaciones punto a punto.

4.1.7.1. Comunicaciones de radiodifusión

Los requerimientos en las comunicaciones por radio de alta frecuencia son generalmente cubiertos por polarización vertical y antenas omnidireccionales.

La propagación de onda en el cielo es ineficiente, generalmente por comunicaciones de corto alcance por el brinco de distancia asociada con el modo de transmisión. Sin embargo, en el extremo inferior de la banda HF, la propagación de onda terrestre de antenas verticales, pueden ser muy fiables en la distancia a alcanzar y más allá por la onda en el cielo, dependiendo de las constantes terrestres de la ruta. La polarización vertical de las ondas terrestres son particularmente efectivas sobre agua marina, y las distancias substanciales pueden ser distribuidos de forma fiable con frecuencias de operación de aproximadamente 5MHz.

Aunque las antenas verticales son utilizadas en su mayoría para aplicaciones barco-tierra-barco, muy largas distancias entre las terminales pueden ser distribuidas con mayor eficacia por la propagación de ondas en la ionosfera. En esas circunstancias, las antenas de polarización horizontal como las antenas horizontales LPA (*log-periodic antenna*) de azimut fijo o rotativo, y las antenas rómbicas son las normalmente usadas.

4.1.7.2. Comunicaciones tierra-aire-tierra

Las antenas HF omnidireccionales de banda ancha son esenciales para una comunicación efectiva tierra-aire-tierra desde que la aviación opera a diferentes distancias, diferentes aspectos, y ángulos de elevación de los terminales de tierra. Estas antenas son efectivas por los numerosos cambios rápidos de frecuencia que son requeridos para mantener comunicaciones confiables como los cambios de posición de los aviones.

Las antenas omnidireccionales verticalmente polarizadas son generalmente bien adaptadas a las necesidades de propagación de comunicaciones tierra-aire-tierra.

Las antenas de envoltura HF se han estado usando por algún tiempo en los sistemas tierra-aire-tierra; sin embargo, monopolos cónicos o conos invertidos se han instalado como reemplazo para las antenas de envoltura, ya que poseen características más amplias de anchos de banda.

Un mayor grado de fiabilidad para la recepción en la terminal terrestre de señales de aviones de relativamente baja potencia (particularmente en transmisiones de datos digitales), puede alcanzar su objetivo a través de algún tipo de diversidad en la operación.

Las limitaciones reales en el lugar de recepción, pueden hacer impráctica la diversidad de recepción del espacio. Del mismo modo, la diversidad de transmisión de frecuencia de una aeronave es generalmente excluida debido a las limitaciones de espacio y equipo en la misma aeronave. La diversidad en la polarización sin embargo puede ser empleada por el terminal terrestre, para proporcionar mejoras en la recepción de la señal. Este tipo de operación de diversidad se hace posible mediante el uso de antenas omnidireccionales polarizadas horizontalmente en conjunto con las antenas polarizadas verticalmente.

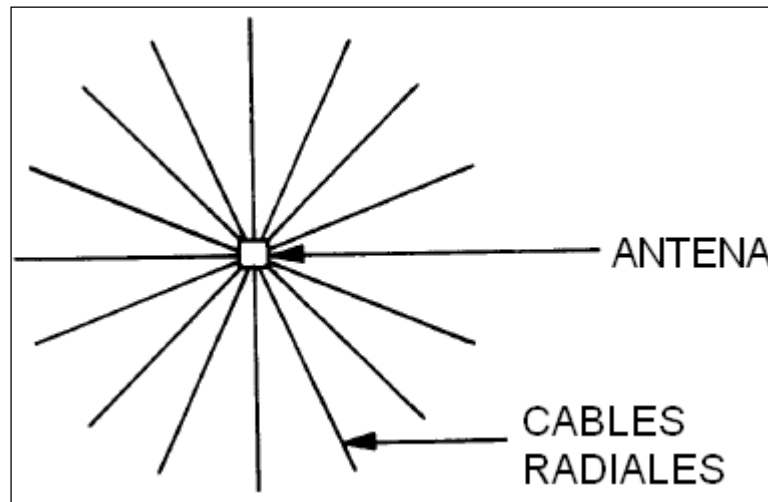
4.1.7.3. Comunicaciones punto a punto

Las antenas HF más comúnmente utilizadas para comunicaciones punto a punto, son las horizontalmente polarizadas.

Usualmente las antenas rómbicas y las horizontales LPA son especificadas, ya que proporcionan el ancho de banda necesario, ganancia, directividad y confiabilidad para comunicaciones de larga distancia.

Su relativo bajo ángulo de radiación y baja pérdida terrestre, las hacen muy adecuadas para los objetivos de desempeño para servicios de larga distancia. Las verticales LPA son utilizadas algunas veces para comunicaciones punto a punto de larga distancia, pero los resultados satisfactorios en esta aplicación dependen del uso de un sistema radial terrestre para mantener bajo el ángulo de radiación.

Figura 35. **Vista superior de una antena polarizada verticalmente**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Word 2003.

En la figura 35 se observa desde una vista superior, una antena polarizada verticalmente con sus cables radiales dirigiéndose hacia el exterior de ésta.

4.1.8. Separación y posicionamiento de las antenas

El posicionamiento y la separación de las antenas HF son factores importantes que afectan el desempeño de éstas. El criterio de separación está determinado por las características físicas y eléctricas de las antenas, y por la aplicación que se les da a éstas (transmisora o receptora).

Las antenas HF de diferente función (transmisora y receptora), deben estar separadas por una distancia mínima de 15 millas. Si esta separación se reduce, puede provocar una grave degradación en la función de recepción, debido a interferencias creadas por los transmisores.

Estas interferencias pueden ser causadas por armónicos, operación del canal adyacente, transitorios claves y oscilaciones parásitas.

Además, productos de modulación cruzada pueden ser generados en pre-amplificadores y receptores de HF, por los fuertes campos de radiofrecuencia, a pesar de que las frecuencias normales recibidas están ampliamente separadas de las frecuencias de dichos campos.

Todas las distancias, a menos que se indique lo contrario, están basadas en el diseño de antenas de frecuencia más baja.

La mayor de las dos distancias en cada caso es usada como la distancia de separación.

Los puntos de medición se encuentran entre los puntos de referencia que figura para cada tipo de antena (a excepción de la rómbica).

Las antenas receptoras deben ser separadas de las antenas transmisoras de acuerdo con el criterio descrito en la tabla IV.

Tabla IV. **Distancias de separación en antenas receptoras**

FUENTES DE INTERFERENCIA	DISTANCIA MÍNIMA
Estaciones transmisoras de alta potencia:	
Muy baja frecuencia (VLF)	25 Millas
Frecuencia baja (LF) / Frecuencia alta (HF)	15 Millas
Líneas de alta tensión de transmisión eléctrica	2 Millas
Alimentadores de poder de estación receptora	1000 pies de la antena más cercana
Campos aéreos y trayectorias de planeación:	
Para comunicaciones generales	5 Millas
Para recepción aeronáutica en la estación aérea	1500 pies
Teletipo y cualquier otro sistema electromecánico:	
Operación de bajo nivel instalado en sala blindada	No hay mínimo
Operación de alto nivel instalado en sala sin blindaje Instalación grande (centro de comunicaciones)	2 Millas de la antena más cercana
Instalación pequeña (de 1 a 6 instrumentos)	200 pies de la antena más cercana
Carreteras principales	1000 pies
Áreas habitables	1 Milla
Áreas susceptibles de industrialización:	
Industria de luz	3 Millas
Industria pesada	5 Millas
Plantas de energía primaria	5 Millas

Fuente: elaboración propia.

La distancia de separación entre dos antenas de la misma función (todas transmisoras o todas receptoras), puede ser determinada por el siguiente criterio de espaciamento según la antena:

- **Rómbicas:** las antenas rómbicas deben estar separadas 250 pies de otros tipos de antenas de polarización horizontal, siendo esta una medida del elemento radiante más cercano de la antena rómbica al punto de referencia listado para la otra antena. Sin embargo, las antenas rómbicas pueden ser colocadas adyacentes a otras mismas (incluyendo el compartir el lado común y/o los postes traseros), siempre y cuando sus radiadores no se superpongan. Anidar una mayor frecuencia dentro de su complemento de baja frecuencia (utilizando un poste trasero común) es permisible, y se anima con el fin de reducir los requisitos del terreno. Antenas polarizadas verticalmente pueden ser posicionadas dentro de una antena rómbica.
- **Antenas V:** los requerimientos de espacio son los mismos que para las rómbicas.
- **Horizontal LPA:** espacio de dos longitudes de onda del lóbulo principal, y una longitud de onda fuera del lóbulo principal, medido a partir de la estructura de soporte principal (a medio camino entre la estructura de soporte para configuraciones de dos torres).
- **Vertical LPA:** los requerimientos de espacio son los mismos que para la horizontal LPA.

- Radiadores verticales HF: estos incluyen dobletes verticales y otras antenas de frecuencia discreta con un ancho de banda del 10% o menos de la frecuencia central de diseño.
- Yagui: espacio de media longitud de onda medido del centro del elemento radiador más cercano.
- LPA rotativo: espacio de dos longitudes de onda de antenas polarizadas horizontalmente. El requerimiento de separación de una antena polarizada verticalmente es determinado por el requerimiento de separación de la antena vertical. En todos los casos, no debe ser menos de 150 pies.
- Doblete horizontal: espacio de media longitud de onda medido del punto de alimentación.
- Alambre largo de frecuencia media y baja: espacio de 500 pies medido del punto de alimentación.
- Cono invertido: espacio de una longitud de onda medido del centro de la antena.
- Monopolo cónico: los requerimientos de espacio son los mismos que para el cono invertido.
- Antenas de envoltura: espacio de una longitud de onda medido del elemento de envoltura.
- Torre vertical de baja frecuencia: espacio de 1000 pies de todas las antenas de HF.

- SLP (*sector log periodic*): espacio de dos longitudes de onda medidos desde la estructura principal de soporte.
- Sector de antenas de envoltura (90° y 180°): espacio de dos longitudes de onda medidos desde el elemento de envoltura.
- Monopolo direccional selectivo: espacio de dos longitudes de onda medidos desde cada elemento monopolo.

Para la ubicación de las antenas deben considerarse algunos factores para el posicionamiento de las mismas como los peligros de la radiación, factores ambientales (topográficos y eléctricos), necesidades de los terrenos y constantes de tierra.

4.1.8.1. Peligros de la radiación de radiofrecuencia

Prestar especial atención a la selección del sitio para antenas transmisoras con respecto a los riesgos de la radiación RF. Entre ellos se pueden mencionar los siguientes:

- Peligros de la radiación electromagnética con artefactos explosivos: ubicar antenas transmisoras en áreas en donde se encuentran materiales explosivos, puede crear condiciones potencialmente peligrosas. Es por ello que se debe evaluar antes el nivel de radiación que las antenas emitirán de acuerdo a los niveles de riesgo explosivo de los materiales.
- Peligros para el combustible: de igual manera que con los artefactos explosivos, se deben analizar los niveles de radiación que tendrá la radiación RF a la exposición al combustible.

- Riesgos para el personal: algunos estudios han examinado la posibilidad de un vínculo entre la exposición a RF y el cáncer. Los resultados hasta la fecha no han sido concluyentes. Si bien algunos datos experimentales han sugerido un posible vínculo entre la exposición y la formación de tumores en animales expuestos bajo ciertas condiciones específicas, los resultados no han sido replicados de forma independiente. Muchos otros estudios han fracasado para encontrar evidencia de un vínculo con el cáncer o cualquier enfermedad relacionada. Lo que sí es cierto, es que se debe evitar estar enfrente de una antena transmisora de RF.

4.1.8.2. Consideraciones del terreno

Las antenas HF deben estar ubicadas en un terreno bastante plano, se deben evitar las áreas con grandes concentraciones de roca ya que los problemas de clasificación y construcción se ven ampliados por el terreno como tal y por las constantes no uniformes de la tierra por las diferencias del suelo.

4.1.8.3. Consideraciones generales

Las siguientes consideraciones generales aplican para el posicionamiento de antenas de HF:

- Antenas direccionales fijas como las rómbicas o LPA (horizontal y vertical): deben estar situadas de forma que su haz principal no irradie a través de otros arreglos de antenas. Esto requiere que deben ser ubicadas en el perímetro del terreno de la antena más cercano al azimut de la dirección destinada a la transmisión o recepción.

- Antenas rotativas de registro periódico: siempre que sea posible deben tener la separación adecuada de acuerdo a su diseño, para reducir cualquier efecto perjudicial que sus torres de soporte pueden tener en antenas polarizadas verticalmente.
- Antenas de más alta frecuencia: colocarse lo más cerca posible de la construcción del transmisor o receptor para minimizar pérdidas en la línea coaxial.
- Antenas HF: cuyo requerimiento de espacio sea el mismo, deben agruparse para conservar el espacio del terreno.
- En casos donde la disponibilidad de la tierra es fundamental, es posible ubicar una antena polarizada verticalmente dentro de la zona ocupada por una antena rómbica sin sacrificar el rendimiento.

Las antenas deben estar ubicadas de forma que las obstrucciones, como: edificios, estructuras altas metálicas y montañas no se encuentren en la dirección de propagación. El ángulo de obstrucción de una vía de onda determinada no debe exceder los 5° (3° es preferible).

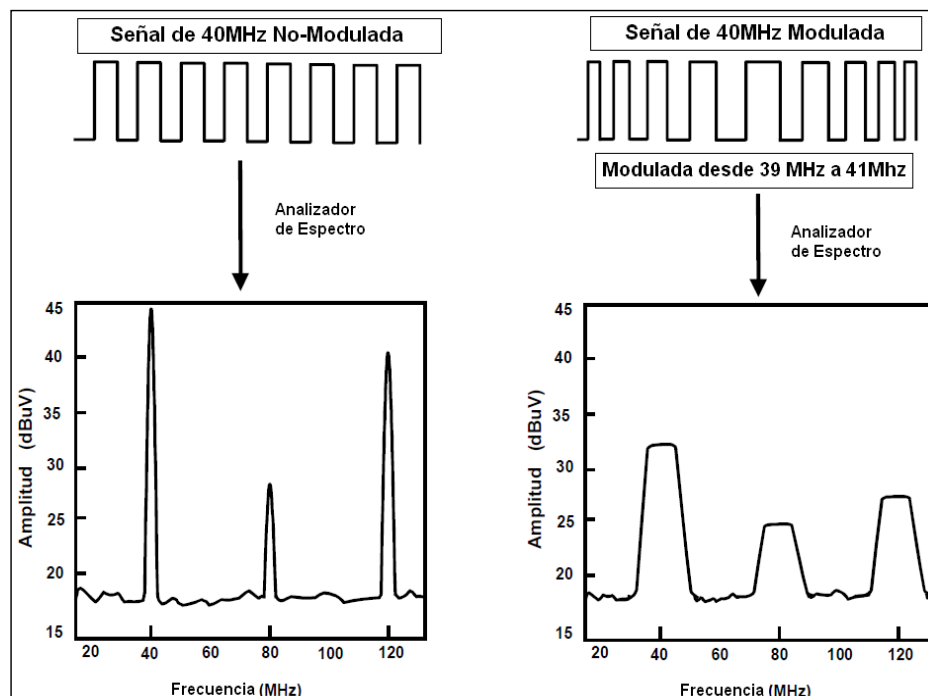
4.1.9. Técnica de difusión del espectro – *spread spectrum*

Difundir el espectro de una frecuencia, significa distribuir la energía que fue originalmente concentrada en una frecuencia (o más precisamente sobre una banda estrecha de frecuencias) sobre una banda más ancha, reduciendo así las emisiones de picos. La energía es distribuida modulando lentamente la señal entre dos límites de frecuencia. El método de modulación influye drásticamente en la cantidad de reducción de EMI.

En la figura 36, se muestra el espectro de frecuencia de una frecuencia de referencia de 40MHz. Si la señal de 40MHz se modula lentamente por ejemplo de 39MHz a 41MHz, la energía total emitida seguiría siendo la misma, pero sería distribuida sobre 39MHz a 41MHz.

Las amplitudes en el tramo de la frecuencia de la señal de 40MHz modulada se reducen significativamente. Esto se debe a que la energía total emitida no cambia si una señal es modulada. Por el contrario, la energía se difundió o expandió sobre un rango más amplio de frecuencias de tal modo, reduciendo así las emisiones de pico. Este principio es utilizado para reducir EMI en los sistemas, y es conocido como difusión de espectro de supresión de EMI.

Figura 36. **Espectro de señal no modulada y señal modulada de 40MHz**



Fuente: http://www.alsc.com/pdf/emi_ssc.pdf. Consulta: 27 de diciembre de 2012.

¿Cómo reduce el difusor de espectro de supresión de EMI, EMI de un sistema?

La mayoría de sistemas tiene al menos una frecuencia de referencia; en otras palabras, el reloj del sistema, usualmente de un cristal oscilador, PLL (*phase-lock loop*), o señal externa. Esta frecuencia de referencia conecta todos los circuitos integrados en el sistema. Por ejemplo, si un sistema tiene un oscilador de 40MHz, entonces todas las direcciones, datos y señales de control también cambiarán a un múltiplo de 40MHz. Si la frecuencia de referencia del sistema es modulada de manera de difusión del espectro, todas las salidas dependientes del reloj (como direcciones y señales de datos), también presentarán esta modulación.

Como resultado, toda la interferencia electromagnética acumulada de todo el sistema se reducirá, ya que el nivel de EMI está reducido en cada señal de salida individual. Más importante aún, este método de supresión de EMI está aprobado por la *FCC (Federal Communications Commission)*.

Los fabricantes de impresoras, faxes, módems, productos multifuncionales, escáneres, subsistemas de gráficos y video, cámaras digitales, reproductores de DVD, displays LCD de portátiles y pantalla plana, decodificadores, aplicaciones de Internet, PDA (*personal digital assistants*) y televisiones digitales, se pueden beneficiar en tres formas mediante el uso de técnicas de difusión de espectro:

- Reduce EMI en el sistema en hasta 20dB.
- Reduce costos mediante la reducción de materiales y complejidad en las placas de circuito impreso.
- Reduce los recursos de ingeniería necesarios para cumplir los estándares de EMI, resultando en una rápida comercialización.

CONCLUSIONES

1. La radiación electromagnética existe en el universo desde el inicio de la creación de éste, por lo que se debe comprender antes en su entorno y comportamiento natural, para poder crear nuevas tecnologías que sean menos susceptibles a los efectos de interferencia.
2. La selección de una antena adecuada que se adapte a las necesidades requeridas de acuerdo a sus características, depende del entorno en la que se utilizará con la finalidad de obtener el óptimo funcionamiento y desempeño de ésta.
3. La clave fundamental para la innovación de nuevos equipos electrónicos y tecnologías de telecomunicaciones, es utilizar de forma óptima los conceptos de EMC, analizando y estudiando los efectos de transmisión y recepción de EMI del entorno.
4. Los factores de la Tierra y los elementos que la componen, así como el comportamiento climático de la zona, nivel de interferencia en el entorno, viabilidad y confiabilidad de la transmisión y recepción, permiten el análisis de los aspectos topográficos y eléctricos del ambiente en el que se requiere colocar infraestructura de telecomunicaciones.
5. La reducción de ruido en un canal es factible por medio de la reducción del ancho de banda, requiriendo un análisis previo de señal a ruido para sopesar cualquier incremento en el nivel de ruido al aumentar el ancho de banda.

RECOMENDACIONES

1. El rendimiento de una antena debe ser probado o cualificado para asegurar el funcionamiento dentro de un margen de seguridad, para el diseño de los niveles de rendimiento de acuerdo a la compatibilidad electromagnética.
2. El aumento generado en el planeta en los niveles de CO₂, provoca que un mayor índice de energía radiada del espacio entre al planeta, adicionalmente, crea un efecto invernadero que calienta cada vez más el mismo, encapsulando los rayos infrarrojos que rebotan en la superficie terrestre. Por tal motivo es necesario utilizar otras formas alternativas de generación de energía que sean renovables y sanas para el medio ambiente, con lo cual se disminuyan los niveles de CO₂ y por ende, disminuya la penetración de energía espacial a la Tierra.
3. Debido a la saturación en las bandas de frecuencia, se requiere una debida regulación del espacio radioeléctrico asegurando el cumplimiento de las normas, ya que cualquier radio aficionado o bien personas con las herramientas adecuadas, pueden interferir este espacio emitiendo señales de radio clandestinamente, interfiriendo no sólo en la banda asignada, sino que también, emitiendo más radiación electromagnética en el entorno en que son transmitidas dichas señales.

BIBLIOGRAFÍA

1. CHENG, David K. *Field and wave electromagnetics*. USA: Addison-Wesley, 1989. 703 p. ISBN: 0-201-52820-7.
2. COLLIN, Robert E. *Antennas and radiowave propagation*. USA: McGraw-Hill, 1985. 508 p.
3. KRAUS, John D.; FLEISH, Daniel. *Electromagnetismo con aplicaciones*. 5a ed. USA: McGraw-Hill, 2000. 617 p. ISBN 0-07-289969-7.
4. MARDIGUIAN, Michael. *EMI troubleshooting techniques*. USA: McGraw-Hill, 1999. 300 p.
5. TESCHE, Frederick M.; LANOZ, Michael E.; TORBJÖRN, Karlsson. *EMC analysis methods and computational models*. USA: John Wiley & Sons, 1997. 656 p. ISBN: 978-0-471-15573-7.