

11126
40



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN

“CARACTERISTICAS DE UNA ANTENA DE RADIO BASE EN UN SISTEMA CELULAR”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A :

IVAN MENDOZA ALVAREZ

ASESOR DE TESIS: ING. JUAN GONZALEZ VEGA.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
 UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
 DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

UNIVERSIDAD NACIONAL
 AUTÓNOMA DE
 MÉXICO

U. N. A. M.
 FACULTAD DE ESTUDIOS
 SUPERIORES CUAUTITLAN
 ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS



DEPARTAMENTO DE
 EXAMENES PROFESIONALES

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO
 DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN
 P R E S E N T E

ATN: Q. Ma. del Carmen García Mijares
 Jefe del Departamento de Exámenes
 Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicarle a usted que revisamos la TESIS:

_____ "Características de una Antena de Radio Base en un Sistema Celular" _____

que presenta el pasante Iván Mendoza Álvarez
 con número de cuenta 9444505 para obtener el título de:
 _____ Instalador Profesional Electricista _____

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 20 de Enero de 2003

PRESIDENTE Ing. Juan de la Cruz Hernández Zamudio *[Firma]*
 VOCAL Ing. Juan González Vega *[Firma]*
 SECRETARIO Ing. Eusebio Reyes Carranza *[Firma]*
 PRIMER SUPLENTE Ing. Carlos Sobelo Olvera *[Firma]*
 SEGUNDO SUPLENTE Ing. Anatolio Mendoza González *[Firma]*

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

*Doy Gracias al Gran Creador, por haberme
permitido llegar a culminar esta etapa de mi
vida profesional.*

*En Memoria de mi Padre:
Ausencio Raúl Mendoza Navarro.*

"...Una persona sin inspiración cree
de acuerdo con lo que logra.
Una persona con aspiraciones logra
de acuerdo con lo que cree..."

SRI CHINNEY.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Agradezco de corazón el apoyo, consejo y aliento que me dio mi madre Martha Alvarez López.

A mi hermano Raúl Mendoza Alvarez, que también con mano dura me alentó, y que hasta la fecha he recibido un apoyo incondicional.

Agradezco así mismo a Adolfo Alvarez López y Herminia García Barjau, los cuales son mis Tíos e Hijos.

A mis Profesores, por los consejos para la vida Profesional, por su Tiempo, Paciencia y dedicación a la Docencia.

Gracias a mi Asesor, quien me dirigió en la elaboración de este Trabajo de Tesis, por su Tiempo invertido en mí.

Por la Gloriosa:

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO.

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU".

A los compañeros y amigos que tuve la oportunidad de conocer y que gracias a sus consejos, experiencias profesionales y laborales formaron parte de lo que ahora soy.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

INDICE.

	Página.
INTRODUCCION.	i
Capítulo I.	1
ECUACIONES DE MAXWELL y ONDAS ELECTROMAGNETICAS.	1
I.1 Ecuaciones de Maxwell.	2
I.1.1 Ley de Gauss.	2
I.1.2 Ley de Circuital de Ampere.	5
I.1.2.1 Principio de Conservación de la Carga.	8
I.1.3 Generalización de la Ley de Ampere.	9
I.1.4 Ecuaciones de Maxwell.	13
Referencias.	14
I.2 Ondas Electromagnéticas.	16
I.2.1 Campos Electromagnéticos Armónicos en el Tiempo.	16
I.2.2 Propagación en Dieléctricos con Pérdidas.	18
Referencias.	23
Capítulo II.	24
PROPAGACION DE ONDAS.	24
II.1 Rayos y Frentes de Onda.	25
II.2 Radiación Electromagnética.	26
II.2.1 Densidad de Potencia e Intensidad de Campo.	26

II.2.2 Impedancia Característica del Espacio Libre.	27
II.3 Frente de Onda Esférica.	27
II.4 Ley Inversa Cuadrática.	28
II.5 Atenuación y Absorción de Ondas.	29
II.6 Propiedades Ópticas de las Ondas.	30
II.6.1 Refracción.	30
II.6.2 Reflexión.	33
II.6.3 Difracción.	34
II.6.4 Interferencia.	37
II.7 Propagación de las Ondas.	37
II.7.1 Ondas de Tierra o de Superficie.	38
II.7.2 Ondas Espaciales.	39
II.7.3 Ondas de Cielo.	40
II.8 Longitud de Onda.	41
II.9 Ionosfera.	44
Capitulo III.	46
ANTENAS.	46
III.1 Operación Básica de una Antena.	47
III.2 Términos y Definiciones.	48
III.2.1 Patrón de Radiación.	48
III.2.2 Relación Frente-Atrás.	53
III.2.3 Resistencia de Radiación.	54
III.2.4 Eficiencia de la Antena.	56
III.3 Ganancia Directiva.	57
III.4 Ganancia de Potencia.	58
III.5 Polarización de la Antena.	58
III.6 Ancho del Haz de una Antena.	60

III.7 Impedancia de Entrada de una Antena.	61
III.8 Ancho de Banda de una Antena.	62
III.9 Intermodulación.	62
III.10 Ondas Incidentes y Reflejadas.	63
III.10.1 Relación de Onda Estacionaria (VSWR ó SWR).	64
III.11 Construcción.	66
III.11 Costo.	66
Capítulo IV.	67
CARACTERISTICAS DE UNA ANTENA DE UNA RADIO BASE EN UN SISTEMA CELULAR.	67

IV.1 Términos y definiciones para Estaciones Base y antenas móviles.	68
IV.1.1 Azimuth.	68
IV.1.2 Angulo de Elevación.	68
IV.1.3 Diagrama de Antena.	69
IV.1.4 Ancho de Banda.	69
IV.1.5 Ganancia.	69
IV.1.6 Altura.	69
IV.1.7 Impedancia de Entrada.	70
IV.1.8 Rigidez Mecánica.	70
IV.1.9 Polarización.	70
IV.2 Tipos de Antenas.	71
IV.2.1 Isotrópica.	71
IV.2.2 Dipolo.	71
IV.2.3 Monopolo.	71

IV.2.4 Lazo.	71
IV.2.5 Microcinta.	71
IV.3 Antenas de la Estación Base.	72
IV.3.1 Antenas Direccionales.	72
IV.3.2 Antenas Omnidireccionales.	72
IV.4 Diversidad.	74
IV.4.1 Espacio.	74
IV.4.2 Polarización.	75
IV.4.3 Tiempo.	75
IV.4.4 Frecuencia.	76
IV.4.5 Angulo.	76
IV.5 Aislamiento de la Antena.	76
IV.6 Ganancia.	77
IV.7 Conectores.	79
IV.8 Selección de la Antena.	80
IV.9 Inclinación de la Antena.	81
IV.10 Procedimiento de Barrido.	81
IV.11 Panel de Antenas (Antena Direccional).	82
IV.11.1 Descripción del Panel de Antenas.	86
IV.11.2 Arreglos de Antenas.	87
IV.11.3 Teoría de Sistema de Antenas.	89
IV.11.3.1 Dos Fuentes Isotrópicas.	89
IV.11.3.2 Multiplicación del Patrón de Radiación.	90
IV.11.4 Antenas Reflectoras.	93
IV.11.4.1 Reflectores Diedros.	94
IV.11.5 Parámetros de Enlace.	99
IV.11.5.1 Perdidas de Trayectoria en el Espacio Libre.	
100	
IV.11.5.2 Ruido de Recepción.	103
IV.12 Selección de Sitios.	106

IV.12.1 Microcélula.	106
IV.12.2 Macrocelula	106
IV.12.3 Picocelula	107
IV.12.4 Sitios Direccionales.	107
IV.12.4.1 Tres sectores.	112
IV.12.4.2 Seis sectores.	112
IV.13 Instalación de una Radio Base.	113
IV.13.1 Cableado.	113
IV.13.2 Montaje de la Antena.	114
IV.13.3 Diversidad de Espacio.	114
IV.13.4 Torres.	115
IV.14 Intermodulación.	114
IV.15 Aislamiento.	117
Especificaciones del Panel de Antenas	118
Glosario.	127
Conclusiones.	135
Bibliografía.	138

INTRODUCCION.

En estos momentos me dispongo a redactar una Introducción referente al contenido de mi Tesis; pero primeramente vamos a definir lo que es una Introducción, una Introducción, es de acuerdo con lo que he leído y que acepto para este fin es lo siguiente: una preparación, disposición para llegar a un objetivo; en este caso el objetivo del presente trabajo es proporcionar conocimiento e información que he recopilado durante el tiempo invertido para realizarlo, acerca de lo que he desarrollado en la Tesis, pero ¿qué significado le puedo dar a este término?, bueno después de consultar distintos diccionarios he formulado mi propia definición, la cual dice lo siguiente: una Tesis es la culminación de la aplicación de una serie de Conocimientos adquiridos en un Recinto Educativo, en este caso en la Universidad Nacional Autónoma de México. En los últimos años de mi Carrera me llamó mucho la atención el Campo de las Comunicaciones, en especial las inalámbricas; pero ¿qué es una Comunicación?, la comunicación geográficamente hablando es el enlace entre dos o más puntos; distanciados ya sea por unos cuantos metros hasta llegar a los kilómetros, haciendo uso de los medios de Comunicación, un ejemplo sencillo y básico en la Comunicación Humana a distancia, es observado por los nativos o primeros pobladores de distintas civilizaciones por ejemplo, en el Continente Americano, se lograba hacer una comunicación gracias a pequeñas cantidades de humo, lo nativos del Continente Australiano; hacen uso de un dispositivo el cual está unido a una determinada longitud de cuerda, la cual al hacerla girar en el aire este va cortando el aire y de acuerdo con la velocidad de giro y cantidad de cuerda se van obteniendo diferentes escalas de sonido y gracias a esto se logra una comunicación a distancia.

Pero ¿qué ocurre cuando esas distancias rebasan cientos de kilómetros e inclusive Continentes? La respuesta la podemos encontrar en Inglaterra aproximadamente en el año de 1855, cuando el joven James Clerk Maxwell,

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

proporcionó una Teoría acerca de la propagación de las Ondas Electromagnéticas; se inspiró en el trabajo experimental de Faraday, este último afirma la existencia de un Campo Magnético Variable en el Tiempo, originado por un Campo Eléctrico que también varía en función del Tiempo y en la imagen mental de las 'líneas de fuerza' que Faraday introdujo gracias a su experimento.

Con estas 'líneas de fuerza' o Campos Electromagnéticos variables en el Tiempo, con la ayuda de diferentes técnicas de modulación, gracias a Heinrich Hertz que ya había producido ondas de radio; esto lo consiguió haciendo que una chispa eléctrica saltara una y otra vez entre dos esferas de metal. Captó las ondas con un alambre común en forma de círculo, cuyas puntas dejó levemente separadas. Aunque el alambre no estaba conectado con las esferas metálicas, saltaron chispas en la separación; por consiguiente, las esferas debían de generar alguna especie de onda eléctrica, que el alambre captaba, del mismo modo que un cantante, al emitir cierta nota, hace vibrar una copa de cristal colocada en el otro lado de una habitación. El aro de alambre recibió el nombre de 'Antena'.

En 1895, el joven inventor italiano Guglielmo Marconi pensó que, si un generador eléctrico emitía 'ondas largas' y una antena las recibía, no había motivo para que la energía eléctrica no pudiera transmitirse sin alambres. Combinó lo anterior con la invención de Alexander Graham Bell para transformar la electricidad en 'sonido', y ofreció al mundo la 'telegrafía sin hilos'.

Vaya en tan sólo unos cuantos párrafos hemos consumido cerca de 100 lustros de historia de las Comunicaciones a distancia; ahora es conveniente analizar cómo se logra lo anterior; para esto se empezará diciendo que la fuente de un Campo Electromagnético es, una densidad de corriente variable con el tiempo, que tiene asociada a la vez una densidad de carga igualmente variable en el tiempo; la Densidad de Carga y la Densidad de Corriente están relacionadas con la ecuación de continuidad. El análisis de los campos electromagnéticos está basado en las Ecuaciones de Maxwell derivadas de la Ley de Gauss, aplicado a Campos Eléctricos y Magnéticos, la Ley de Faraday así como la generalización de la Ley de Ampère en concordancia con la Ecuación de Continuidad. Por otro lado; una

onda es un movimiento oscilatorio, la vibración de una partícula produce vibraciones similares en las partículas cercanas; la Energía Electromagnética u Ondas Electromagnéticas se propagan a través del espacio libre como Ondas Electromagnéticas Transversales (TEM) con un Campo Magnético (H), un Campo Eléctrico (E) y una dirección de propagación que son mutuamente perpendiculares, es decir, la dirección de desplazamiento tanto de E como de H es perpendicular a la dirección de propagación.

Ahora que ya dimos un vistazo a las ondas, nos preguntamos ¿qué relación puede haber con los sistemas de comunicación a distancia?, para responder a esto cabe mencionar que en la actualidad, en este siglo XX y principios del XXI con frecuencia, en los sistemas de comunicación es impráctico o imposible interconectar dos o más piezas de equipo por medio de un cable, como por ejemplo: realizar el tendido de cable a través de océanos y mares, montañas, terreno desértico e inclusive desde y hacia un satélite. Además, cuando los transmisores y receptores son móviles (sistemas celulares), las facilidades metálicas son imposibles. Para solucionarlo, el espacio libre o atmósfera terrestre se usa frecuentemente como un medio de transmisión.

La propagación en el espacio libre de ondas electromagnéticas, también es llamada propagación de Radiofrecuencia (RF). Para propagar Ondas Electromagnéticas Transversales (TEM) a través de la atmósfera de la tierra, es necesario que dicha energía sea Radiada. Por otro lado, Radiar y Capturar energía son funciones de la Antena.

Una antena es un sistema conductor metálico capaz de radiar y recibir ondas electromagnéticas, es usado como interfaz entre un transmisor y el espacio libre o el espacio libre y un receptor; además acopla energía de la salida de un transmisor a la atmósfera de la Tierra o de la atmósfera de la Tierra a un receptor. La antena no puede amplificar una señal y las características de transmisión y recepción de una antena son idénticas. Una antena es desde un punto de vista, un elemento acoplador de Campos Electromagnéticos entre una línea transmisión y el medio en donde han de propagarse; desde este punto de vista una antena se

considera como una fuente de Campos Electromagnéticos que existen en el espacio.

Para un sistema de radio, el sistema de antenas es la interfaz entre el sistema de radio y el ambiente externo. Puede consistir de una sola antena en la estación base y otra en el móvil o en la estación receptora.

El tipo de antena usada por el operador del sistema puede ser colineal, logaritmo-periódica, Dipolo ó Yagui.

De acuerdo al tipo de antena será el Patrón de Radiación, el cual indicará la dirección en que la energía será dirigida. Tomando en cuenta lo anterior hay una clasificación que divide a las antenas en dos tipos, los cuales se describen a continuación:

- a) Omnidireccionales.- Son las que proporcionan un patrón de radiación de 360°.
- b) Direccionales.- Estas se usan cuando se requiere un patrón de radiación en una dirección en especial, se utilizan para facilitar el crecimiento de un sistema mediante el reuso de frecuencias o para delimitar el contorno del sistema.

La elección de una antena para una determinada aplicación implica tomar en cuenta características tales como: la ganancia de la antena, patrón de radiación, la interfaz o acoplamiento con el transmisor, el receptor utilizado para el sitio, ancho de banda y rango de frecuencias.

Con el objetivo de brindar enlaces confiables, pero con una visión a largo plazo de poder ampliar la cobertura y actualizar el equipo sin complicaciones.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPITULO I.

Ecuaciones de Maxwell

Y

Ondas Electromagnéticas.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

PAGINACIÓN DISCONTINUA

I.1 Ecuaciones de Maxwell.

La fuente de un campo electromagnético es una densidad de corriente variable con el tiempo que a su vez tiene asociada una densidad de carga también variable en el tiempo; la Densidad de Carga y la Densidad de Corriente están relacionadas con la Ecuación de continuidad. El análisis de los campos electromagnéticos está basado en las **Ecuaciones de Maxwell** derivadas de la **Ley de Gauss**, aplicado a campos eléctricos y magnéticos, la **Ley de Faraday** así como la generalización de la **Ley de Ampère** en concordancia con la **Ecuación de Continuidad**.

A continuación se resumen brevemente las leyes anteriores para campos eléctricos y magnéticos estáticos.

I.1.1 Ley de Gauss.

Cuando se obtiene la **Densidad de Flujo Eléctrico** \vec{D} [C / m²] donde ϵ_0 es la **permitividad del espacio libre** [8.859 x 10⁻¹² F / m] a través de cualquier superficie cerrada que contiene una carga neta, la expresión para el **Flujo Eléctrico** Ψ [Q] se denota con la ecuación 1:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}$$

$$\Psi = \oint_S \vec{D}_s \cdot d\vec{S} = \text{carga encerrada} = Q$$

1

La ecuación 1 es conocida como **Ley de Gauss** su definición es la siguiente:

“...la densidad de flujo eléctrico a través de cualquier superficie cerrada, es igual a la carga neta contenida en el interior de la superficie...”.

Para el caso de **Volúmenes ó Distribuciones Continuas de Carga** ρ_v [C / m³] se tiene:

$$\oint_S \mathbf{D}_s \cdot d\mathbf{S} = \int_{\text{vol}} \rho_v dv \quad 2$$

El término de la izquierda representa el flujo total que atraviesa la superficie cerrada y el término de la derecha representa la carga en el volumen limitado por la superficie.

Aplicando el Teorema de la Divergencia¹ a la forma integral de la Ley de Gauss tenemos las siguientes expresiones:

$$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \int_{\text{vol}} \nabla \cdot \mathbf{D} dv \quad 3$$

$$\int_{\text{vol}} \rho_v dv = \int_{\text{vol}} \nabla \cdot \mathbf{D} dv \quad 3.a$$

La ecuación 3 se interpreta de la siguiente manera

"...la integral de la superficie cerrada de la Densidad de Flujo Eléctrico es igual a la integral de la divergencia de la densidad de Flujo Eléctrico a través del volumen contenido por la superficie cerrada..."

Considerando que los integrandos son iguales en la ecuación 3.a para que se cumpla la igualdad se tiene:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v \quad 4$$

La ecuación 4 es la **Forma Diferencial o punto de la Ley de Gauss para Campos Eléctricos** y establece lo siguiente:

"...el flujo por unidad de volumen que sale de un pequeño volumen unitario es exactamente igual a la densidad de carga volumétrica que existe en él..."

La Ley de Gauss puede aplicarse también a una unidad de **Densidad de Flujo Magnético**

\vec{B} [Wb / m²]: se definirá el **Flujo Magnético ϕ [Webers, Wb]** que pasa a través de cualquier superficie como:

$$\phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad \text{Wb}$$

Se ha encontrado experimentalmente que no existen cargas magnéticas de modo que por analogía con la ecuación 3.a, aplicando el Teorema de la Divergencia tenemos las ecuaciones 5 y 6.

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

5

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

6

La ecuación 5 es conocida como la **Ley de Gauss para campos magnéticos**. Lo anterior implica que no se puedan considerar fuentes ni sumideros de flujo magnético como en el caso del campo electrostático, es decir, un campo magnético es generado por corrientes y no por cargas magnéticas, eso es lo que nos dice la ecuación 6 y por tanto las líneas de flujo magnético siempre se cierran sobre sí mismas. Esta idea nos lleva a la conclusión de que **\vec{B}** 'gira' alrededor de su fuente la cual es una corriente, idea que es expresada por la **Ley Circuital de Ampere**.

La ecuación 6 es la **Forma Diferencial o punto de la Ley de Gauss para Campos Magnéticos**. A diferencia del campo electrostático, la inducción magnética no diverge ó converge hacia alguna clase de carga magnética. Los campos magnéticos son debido a cargas en movimiento.

Por otro lado en un Campo Eléctrico el Potencial Eléctrico es función de la posición, ello implica que para una trayectoria cerrada de línea, es decir, partir de un punto inicial y regresar al mismo punto, se tiene una diferencia de potencial nula, o sea:

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{L} = 0 \quad a$$

Aplicando el Teorema de Stokes² a la ecuación anterior, tenemos:

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0 \quad b$$

Se concluye que un campo electrostático es conservativo, es decir, cualquier Campo Eléctrico \mathbf{E} [V / m] es igual al gradiente (disminución) de alguna función de potencial eléctrico, la cual está determinada por la ecuación C y su Rotacional³ es igual a cero.

$$\mathbf{E} = -\nabla V \quad c$$

1.1.2 La Ley Circuital de Ampere.

Establece lo siguiente:

"...la densidad de flujo magnético ó campo magnético \mathbf{H} [A / m] entorno de una trayectoria cerrada es igual a la corriente neta I encerrada por la trayectoria...": es decir:

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{L} = I \quad 7$$

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{L} = \mu_0 I \quad 8$$

Porque:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$$

Donde μ_0 es la **permeabilidad del espacio libre**, sus unidades son $[4 \pi \times 10^{-7} \text{ H / m}]$.

Las ecuaciones 7 y 8 se pueden generalizar para el caso en que exista una **Densidad de Corriente** \mathbf{J} [A / m^2] de modo que la corriente total encerrada por la trayectoria será:

$$I = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} \quad 9$$

Por lo que la ecuación 8 también se puede expresar de la siguiente forma:

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{L} = I = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} \quad 10$$

Para obtener la **Forma Diferencial o Punto de la Ley Circuital de Ampere**, se aplica el Teorema de Stokes al término del lado izquierdo de la igualdad en la ecuación 10 y así obtenemos la siguiente expresión:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad 11$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La ecuación 11 es la **Forma Diferencial de la Ley Circuital de Ampere originada por corrientes continuas**. Por otra parte la ecuación 11 confirma la circulación de los campos magnéticos debido a que su rotacional es diferente de cero.

Para medios lineales, homogéneos, la relación constitutiva para los modelos eléctrico y magnético está dada por:

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E}$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$$

$$\bar{\mathbf{E}} \text{ [V/m]} \text{ y } \bar{\mathbf{D}} \text{ [C/m}^2\text{]} \quad \bar{\mathbf{B}} \text{ [Wb /m}^2\text{]} \text{ y } \bar{\mathbf{H}} \text{ [A/m]}.$$

Los Campos Eléctrico y Magnético Estáticos no producen ondas que se propaguen y transporten energía. Las Ondas Electromagnéticas son la esencia de la acción electromagnética a distancia. En la siguiente sección construiremos un modelo electromagnético en condiciones variables con el tiempo donde los **vectores de campo eléctrico** \mathbf{E} y \mathbf{D} estén relacionados con los **vectores de campo magnético** \mathbf{B} y \mathbf{H} .

Para esto nos ayudaremos con los **Postulados de la Inducción Electromagnética** los cuales dicen lo siguiente:

"Un campo magnético variable con el tiempo origina un campo eléctrico que también varía en función del tiempo". Por tanto es necesario modificar la ecuación:

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0$$

Además de manera inversa, "Un campo eléctrico variable en el tiempo da origen a un campo magnético el cual también varía en función del tiempo, aunque no exista un flujo de corriente libre, es decir, $\bar{\mathbf{J}} = 0$ ". Por tanto es necesario modificar la ecuación:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$$

Con el fin de que las ecuaciones antes citadas sean consistentes con la ley de la conservación de la carga; la cual está expresada con la ecuación d. En la siguiente sección se proporciona un breve desarrollo de cómo se llega a dicha ecuación.

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho_v}{\partial t}$$

d

La ecuación d se denomina **Ecuación de Continuidad**.

I.1.2.1 Principio de Conservación de la Carga.

Las cargas eléctricas no se crean ni se destruyen; todas las cargas, ya sea si están en reposo ó en movimiento, deben considerarse en todo momento. En este sentido, la corriente que fluye a través de una superficie cerrada es:

$$I = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S}$$

Este flujo de carga hacia afuera debe ser equilibrado por una disminución de carga dentro de la superficie cerrada.

Si la carga dentro de una superficie cerrada es denotada por q_0 , entonces la razón de cambio a la que disminuye es $-dq_0/dt$ y el principio de la conservación de la carga exige que:

$$I = \oint_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} = -\frac{dq_0}{dt}$$

12

Para obtener la forma diferencial de la ecuación 12 aplicando el Teorema de la Divergencia al término intermedio, tenemos la siguiente expresión matemática:

$$\int_{\text{vol}} (\mathbf{V} \cdot \mathbf{J}) dv = -\frac{d}{dt} \int_{\text{vol}} \rho_v dv$$

Para un volumen constante y al pasar la derivada temporal dentro de la integral, es necesario usar la diferenciación parcial porque ρ_v puede ser una función del tiempo:

$$\int_{\text{vol}} (\mathbf{V} \cdot \mathbf{J}) dv = \int_{\text{vol}} -\frac{\partial \rho_v}{\partial t} dv \quad \boxed{13}$$

Los integrandos deben ser iguales, ya que la ecuación 13 debe ser válida sin importar la elección del volumen, entonces tenemos:

$$\boxed{\nabla \cdot \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho_v}{\partial t}} \quad \boxed{d}$$

La ecuación d se denominada **Ecuación de Continuidad** la cual indica lo siguiente: **"...la rapidez de carga por unidad de tiempo, que diverge de un volumen pequeño, es igual a la rapidez de disminución respecto al tiempo de la carga del volumen pequeño..."**

I.1.3 Generalización de la Ley de Ampere.

De la Forma Diferencial de la Ley Circuital de Ampere debido a corrientes continuas, es decir:

$$\boxed{\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}} \quad \boxed{11}$$

Vamos a sustituir la ecuación 11 en la ecuación d , de lo que obtenemos:

$$\nabla \cdot \nabla \times \mathbf{H} = -\frac{\partial \rho_e}{\partial t} \quad \boxed{14}$$

Sin embargo del álgebra vectorial: la divergencia del rotacional es cero:

$$\nabla \cdot \nabla \times \mathbf{H} \equiv 0$$

Ello implica que, debe haber un término faltante en el lado derecho de la ecuación 14, puesto que, en general, no es posible aceptar:

$$\partial \rho_e / \partial t = 0$$

Como verdadero. Así, al sumar a la ecuación 14 el término que falta:

$$\nabla \cdot \nabla \times \mathbf{H} = -\partial \rho_e / \partial t + \partial \rho_e / \partial t$$

Al sustituir la ecuación d y la Ley de Gauss para campos eléctricos ecuación 4 en la ecuación anterior se tiene:

$$\nabla \cdot \nabla \times \mathbf{H} = \nabla \cdot \mathbf{J} + \partial (\nabla \cdot \mathbf{D}) / \partial t$$

De lo anterior, se dice lo siguiente: para hacer la Ley Circuital de Ampere válida para campos variables con el tiempo, Maxwell introdujo el término $\partial \mathbf{D} / \partial t$, al que llamó corriente de desplazamiento y con esto obtenemos la forma diferencial o punto:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \partial \mathbf{D} / \partial t \quad \boxed{15}$$

Ahora \vec{J} se llamará **corriente de conducción** \vec{J}_c y $\partial \vec{D}/\partial t$ **densidad de corriente de desplazamiento** \vec{J}_D cuya existencia fue postulada por Maxwell así:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_c + \vec{J}_D \text{ [A / m}^2 \text{]}$$

- **NOTA:** Cabe mencionar que la ecuación (15) no ha sido demostrada, es simplemente una forma que se ha obtenido para que no exista desacuerdo con la ecuación de continuidad.

Ahora tomado la integral de superficie de ambos lados de la ecuación 15 sobre una superficie abierta S cuyo contorno sea L obtenemos:

$$\int_S (\nabla \times \vec{H}) \cdot d\vec{S} = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{S} + \int_S \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \cdot d\vec{S}$$

Y aplicando el Teorema de Stokes al miembro izquierdo, escribimos:

$$\int_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_S \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{a} \quad \boxed{16}$$

Así es como llegamos a la **Forma integral de la Ley Circuital de Ampere** generalizada. La ecuación 16 indica lo siguiente: '... una **Densidad de Flujo Eléctrico** \vec{D} **variable con el tiempo es también una fuente del Campo Magnético** \vec{H} ...'; ahora la forma punto de la ecuación 16 en términos de \vec{E} , es la siguiente:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad \boxed{17}$$

Y viceversa la **Ley de Faraday** indica: "... una **Densidad de Flujo Magnético \vec{B}** variable con el tiempo es una fuente del **Campo Eléctrico \vec{E}** ...", esta Ley está representada por las siguientes ecuaciones, en forma integral y en forma diferencial o punto respectivamente:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \int \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{a} \quad 18$$

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad 19$$

I.1.4 Ecuaciones de Maxwell.

Las ecuaciones generalizadas de las leyes del electromagnetismo son las que corresponden a condiciones variables en el tiempo, del estudio anterior se resume en la Tabla 1.1, en ella se observa que las ecuaciones de divergencia permanecen sin cambio, mientras que las ecuaciones correspondientes al rotacional se han modificado. La forma integral de las ecuaciones de Maxwell representan las leyes físicas que sirven de fundamento, mientras que la forma diferencial se emplea con más frecuencia en la resolución de problemas.

Forma Integral.

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{L} = - \int_s \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S}$$

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{L} = I + \int_s \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S}$$

$$\oint_s \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \int_{vol} \rho_v dv$$

$$\oint_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$$

Forma Diferencial.

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

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

Tabla 1.1 Ecuaciones de Maxwell en su forma General.

¹ El Teorema de la Divergencia nos dice:

La integral de cualquier vector sobre una superficie cerrada es igual a la integral de la divergencia de ese mismo vector a través del volumen encerrado por la superficie.

La Divergencia es una operación punto sobre un vector, el resultado es una serie de derivadas parciales, ó un escalar, es decir:

$$\text{El vector: } D = D_x a_x + D_y a_y + D_z a_z$$

Y el Operador Vectorial "∇" (nabla), el cual es igual a:

$$\nabla = \partial/\partial x a_x + \partial/\partial y a_y + \partial/\partial z a_z$$

Entonces:

∇ • D (Divergencia de la Densidad de Flujo Eléctrico es:), cuyo resultado es el siguiente:

$$\nabla \cdot D = \partial/\partial x D_x + \partial/\partial y D_y + \partial/\partial z D_z = \rho_v$$

Es decir, relaciona una triple integración sobre algún volumen con una doble integración sobre la superficie que encierra a ese volumen.

² Teorema de Stokes, es un teorema matemático para cualquier campo vectorial, con el cual obtenemos la forma integral a partir de la forma diferencial y viceversa; por otro lado la forma integral actúa sobre una longitud, es decir, dL; mientras que la forma diferencial actúa sobre una superficie, es decir, dS, por ejemplo:

$$\int H \cdot dL = \int \nabla \times H \cdot dS.$$

Donde dL, se toma solamente sobre el perímetro de S, la primer integral es ciclica.

³ El Rotacional de cualquier vector es otro vector; cualquier componente del Rotacional está dada por el límite del cociente de la Integral cerrada de línea dL del vector alrededor de una pequeña trayectoria en un plano normal a la componente deseada entre el área encerrada, conforme la trayectoria se reduce a cero, es decir:

$$\text{rot } H_N = \lim_{\Delta S_N \rightarrow 0} \int_H dL / \Delta S_N$$

ΔS_N área plana encerrada por la integral de línea, la componente del rotacional es normal a la superficie encerrada.

$$\text{rot } H = \nabla \times H$$

I.2 Ondas Electromagnéticas.

Una onda es un movimiento oscilatorio, la vibración de una partícula produce vibraciones similares en las partículas cercanas; la Energía Electromagnética u Ondas Electromagnéticas se propagan a través del espacio libre como Ondas Electromagnéticas Transversales (TEM) con un Campo Magnético \vec{H} , un Campo Eléctrico \vec{E} y una dirección de propagación que son mutuamente perpendiculares, es decir, la dirección de desplazamiento tanto de \vec{E} como de \vec{H} es perpendicular a la dirección de propagación, tal y como se puede apreciar en la Figura 1.

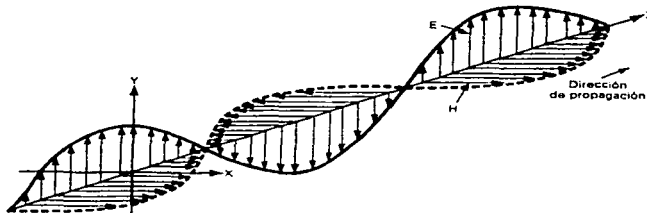


Figura 1. Propagación de una onda Electromagnética Transversal.

I.2.1 Campos Electromagnéticos Armónicos en el Tiempo.

Las funciones de campo con dependencia armónica en el tiempo tienen gran utilidad en ingeniería debido a que son fáciles de generar. Además las funciones armónicas se expresan fácilmente en forma fasorial, con las cuales se trabaja en forma más conveniente. Las cantidades de campo en forma de espacio-tiempo se representan de la siguiente forma:

$$\vec{B} = \vec{B}(x,y,z,t); \quad \vec{E} = \vec{E}(x,y,z,t); \quad \vec{J} = \vec{J}(x,y,z,t) \quad \text{y} \quad \rho_v = \rho_v(x,y,z,t). \quad \boxed{20}$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Las expresiones anteriores se pueden reemplazar con productos de funciones complejas del espacio, al multiplicarlas por el factor complejo: $e^{j\omega t}$, como se muestra a continuación y denotándolas con el subíndice S:

$$\begin{aligned}\bar{B}(x,y,z,t) &\rightarrow \bar{B}_s e^{j\omega t}(x,y,z) \\ \bar{E}(x,y,z,t) &\rightarrow \bar{E}_s e^{j\omega t}(x,y,z) \\ \bar{J}(x,y,z,t) &\rightarrow \bar{J}_s e^{j\omega t}(x,y,z) \\ \rho_v(x,y,z,t) &\rightarrow \rho_{vs} e^{j\omega t}(x,y,z)\end{aligned}$$

Al sustituir las expresiones anteriores en las ecuaciones de Maxwell en su forma diferencial de la Tabla 1.1, se obtiene:

$$\begin{aligned}\nabla \cdot (\bar{D}_s e^{j\omega t}) &= \rho_{vs} e^{j\omega t} \\ \nabla \cdot \bar{B}_s e^{j\omega t} &= 0 \\ \nabla \times \bar{E}_s e^{j\omega t} &= -\partial (\bar{B}_s e^{j\omega t}) / \partial t \\ \nabla \times \bar{H}_s e^{j\omega t} &= \bar{J}_s e^{j\omega t} + \partial (\bar{D}_s e^{j\omega t}) / \partial t\end{aligned}$$

El operador ∇ "habla" sólo afecta a las funciones dependientes del espacio, es decir, $\bar{B}_s(x,y,z)$ y $\bar{E}_s(x,y,z)$, en tanto que $\partial / \partial t$ opera únicamente en los factores $e^{j\omega t}$, comunes a todos los campos, es decir: $\partial / \partial t \cdot e^{j\omega t} = j\omega$. Por tanto, después de cancelar los factores $e^{j\omega t}$ en las ecuaciones anteriores, tenemos como resultado la Tabla 1.2, las cuales llevan por nombre **Ecuaciones de Maxwell, complejas y armónicas en el tiempo ó en forma fasorial.**

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

$$\nabla \times \vec{E}_s = -j\omega \vec{B}_s \quad (21.1)$$

$$\nabla \times \vec{H}_s = \vec{J}_s + j\omega \vec{D}_s \quad (21.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D}_s = \rho_{vs} \quad (21.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B}_s = 0 \quad (21.4)$$

Tabla 1.2 Ecuaciones de Maxwell en forma Fasorial.

1.2.2 Propagación en Dieléctricos con Pérdidas.

Una onda plana uniforme es una solución particular de las ecuaciones de Maxwell,

\vec{E} tiene la misma dirección, magnitud y fase en planos infinitos perpendiculares a la dirección de propagación (de igual manera sucede para \vec{H}). A continuación analizaremos la propagación de una onda plana uniforme donde \vec{E} y \vec{H} descansan en un plano y tienen los mismos valores en todas partes en ese plano como se aprecia en la Figura 3.

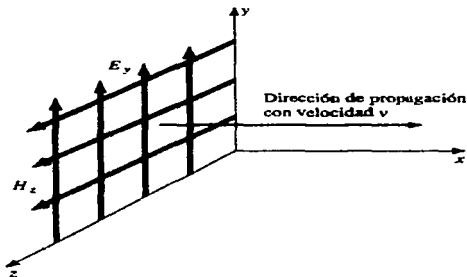


Figura 3. Propagación de una Onda Plana.

Una onda con \vec{E} y \vec{H} transversales a la dirección de propagación se denomina Onda Electromagnética Transversal (TEM).

Teniendo presente un dieléctrico con pérdidas (disipativo) el cual es un medio parcialmente conductor, es decir, con una **Conductividad diferente de cero** $\sigma \neq 0$ de cualquier material, en el cual una onda TEM pierde potencia conforme se propaga, para un medio dieléctrico lineal, isotrópico y homogéneo que esté libre de carga ($\rho_v = 0$), las Ecuaciones de Maxwell para E_s y H_s toman las siguientes formas:

$$\nabla \times \mathbf{H}_s = (\sigma + j\omega\epsilon)\mathbf{E}_s$$

22.2

$$\nabla \times \mathbf{E}_s = -j\omega\mu\mathbf{H}_s$$

22.1

$$\nabla \cdot \mathbf{E}_s = 0$$

22.3

$$\nabla \cdot \mathbf{H}_s = 0$$

22.4

Donde:

$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_R$; permitividad = permitividad del espacio libre y permitividad relativa¹.

$\mu = \mu_0 \mu_R$; permeabilidad = permeabilidad del espacio libre y permeabilidad relativa².

Iniciando con la ecuación 22.1 para dejarla en función de \vec{E}_s , eliminando a \vec{H}_s , aplicando el rotacional se obtiene:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E}_c = -j\omega\mu \nabla \times \mathbf{H}_c$$

Sustituyendo 22.2 en la ecuación anterior tenemos:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E}_c = -j\omega\mu (\sigma + j\omega\epsilon)\mathbf{E}_c$$

Utilizando la siguiente identidad vectorial y conociendo que la ecuación 22.3 es igual con cero obtenemos:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E}_c = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}_c) - \nabla^2 \mathbf{E}_c$$

Es igualando con cero:

$$\nabla^2 \mathbf{E}_c - j\omega\mu (\sigma + j\omega\epsilon) \mathbf{E}_c = 0$$

23

De la misma forma se obtiene otra ecuación en función de \mathbf{H}_c , iniciando con la ecuación 22.2 para obtener:

$$\nabla^2 \mathbf{H}_c - j\omega\mu (\sigma + j\omega\epsilon) \mathbf{H}_c = 0$$

24

Las ecuaciones 23 y 24 son las ecuaciones vectoriales fasoriales de onda para \mathbf{E}_c y \mathbf{H}_c .

La **Constante de Propagación** γ y está representada por la ecuación 25; además como es una cantidad compleja la podemos escribir como la ecuación 26, que a continuación se muestran:

$$\gamma^2 = (\sigma + j\omega\epsilon)j\omega\mu$$

25

$$\gamma = \alpha + j\beta$$

26

Donde:

α - es la Constante de Atenuación del medio. [Neper/m, Np/m].

β - Constante de Fase [rad/m].

Parte positiva de la raíz, lo que nos indica una propagación en el eje positivo Z.

Entonces las ecuaciones 23 y 24 también se pueden escribir de la siguiente forma:

$$\nabla^2 \vec{E}_s - \gamma \vec{E}_s = 0 \quad \boxed{27}$$

$$\nabla^2 \vec{H}_s - \gamma \vec{H}_s = 0 \quad \boxed{28}$$

Para una onda que se propaga sobre el eje Z, \vec{E}_s tiene sólo una componente la cual es X y \vec{H}_s tiene la componente Y; las ecuaciones de onda que representan la propagación de Ondas Electromagnéticas en el espacio (Aire), son las siguientes:

$$E_x = E_{x0} e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z) \quad \boxed{29}$$

$$H_y = \frac{E_{x0}}{\eta_m} e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z - \theta_\eta) \quad \boxed{30}$$

Donde:

E_{x0} - Es la magnitud del Campo Eléctrico en $Z = 0$ y $t = 0$. [V/m]

η , Impedancia Intrínseca del Medio [Ω]; $\eta = \eta_m$. para el aire esta es igual a

$Z_0 = \eta_m = 377\Omega$.

θ_{η} , Angulo de Pérdida del Medio [°]

α - Constante de Atenuación del medio. [Neper/m, Np/m] Es la rapidez espacial de atenuación de onda en el medio.

β - Constante de Fase [rad/m] Es el corrimiento de fase por longitud = $2\pi/\lambda$.

En la Figura 4 se ilustran los campos \vec{E} y \vec{H} dados por las ecuaciones 29 y 30, en consecuencia, para cualquier tiempo, \vec{E} está en adelanto respecto de \vec{H} por θ_{η} en medios dieléctricos disipativos.

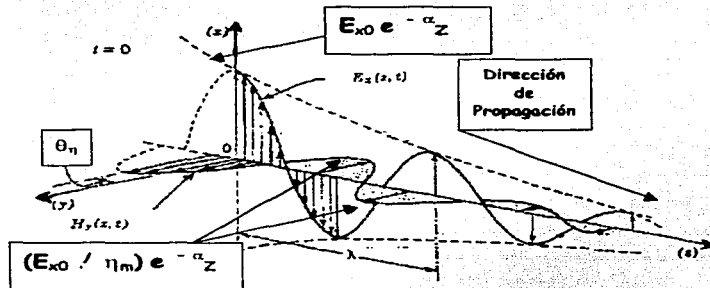


Figura 4. Propagación de Campos \vec{E} y \vec{H} en dirección 'Z' positiva de una onda plana uniforme en una región conductora.

También se puede observar, que conforme la onda se propaga, su amplitud disminuye ó se atenúa exponencialmente por un factor $e^{-\alpha z}$.

¹ Permitividad Relativa [Sin Unidades].

ϵ_R – Constante Dieléctrica o Permitividad Relativa, la cual se presenta con la Polarización de los Materiales, la cual esta representada con la siguiente ecuación:

$$\epsilon_R = \chi_e + 1 \text{ [Adimensional].}$$

Donde:

χ_e , es la susceptibilidad eléctrica de un determinado materia.

ϵ_R para el aire es igual a 1.0005; además:

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_R$$

$$D = \epsilon E.$$

² Permeabilidad Relativa [Sin Unidades].

μ_R – Permeabilidad Relativa, la cual se presenta con la magnetización del entorno de un material o medio.

$$\mu_R = \chi_m + 1.$$

Donde:

χ_m , es la susceptibilidad magnética para un determinado medio, [sin unidades].

$$\mu = \mu_0 \mu_R$$

$$B = \mu H.$$

CAPITULO II.

Propagación de Ondas.

II.1 Rayos y Frentes de Onda.

Los conceptos de Rayos y Frentes de Onda ilustran los efectos de la propagación de ondas electromagnéticas por el espacio libre. Los rayos son líneas dibujadas a lo largo de la dirección relativa de propagación de las ondas electromagnéticas. Un Frente de Onda es una superficie de fase constante de una onda, este se forma cuando los puntos de fase idénticas de rayos propagados de la misma fuente, se unen. La Figura 5, muestra una onda plana ó fuente puntual, propagando varios rayos a partir de él y su frente de onda correspondiente; una fuente puntual es un radiador isotrópico, en el cual los rayos son propagados con la misma potencia, en todas direcciones, el frente de onda generado es una esfera de Radio R . En el espacio libre y a una determinada distancia de la fuente, los rayos contenidos dentro de una pequeña área esférica, son casi paralelos, a medida que los rayos se van alejando de la fuente se llega a producir un frente de onda plana.

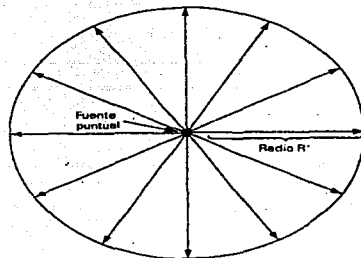


Figura 5. Fuente Puntual.

II.2 Radiación Electromagnética.

Radiación Electromagnética, es la energía que pierden las Ondas de Radio al momento de propagarse sobre el espacio libre.

II.2.1 Densidad de Potencia e Intensidad de Campo.

Las ondas electromagnéticas son flujo de energía en la dirección de propagación, la cantidad de energía que cruza por una superficie determinada, en el espacio libre se llama **Densidad de Potencia** [W/m²]. La **Intensidad de Campo** representa las intensidades del **Campo Eléctrico** E [V/m] y el **Campo Magnético** H [A/m], propias de las ondas electromagnéticas. Matemáticamente la Densidad de Potencia depende tanto del Campo Eléctrico como del Campo Magnético, es decir:

$$\mathcal{P} = \mathcal{E} H \text{ watts por metro cuadrado}$$

1

en donde \mathcal{P} = densidad de potencia (W/m²)
 \mathcal{E} = intensidad de campo eléctrico en rms (V/m)
 H = intensidad del campo magnético en rms (A/m)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

II.2.2 Impedancia Característica del Espacio Libre.

Las Intensidades de los Campos Eléctrico y Magnético de una onda, en el espacio libre, se relacionan por medio de la Resistencia ó Impedancia del espacio libre; para un medio de transmisión sin pérdidas, la impedancia está determinada por la siguiente ecuación:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$$

2

en donde Z_0 = impedancia característica del espacio libre (ohms)
 μ_0 = permeabilidad magnética del espacio libre (1.26×10^{-6} H/m)
 ϵ_0 = permitividad eléctrica del espacio libre (8.85×10^{-12} F/m)

Y sustituyendo los valores de μ_0 y ϵ_0 tenemos:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{1.26 \times 10^{-6}}{8.85 \times 10^{-12}}} = 377 \Omega$$

II.3 Frente de Onda Esférica.

Una fuente puntual ó radiador isotrópico radia potencia de forma uniforme y constante, en todas direcciones, un elemento radiador de este tipo prácticamente no existe; su aproximación es una **Antena Omnidireccional**, esta antena produce un frente de onda esférico de radio R, en esta región todos los puntos de los rayos tienen Densidades de Potencia idéntica, como se muestra en la Figura 6.

Lo anterior nos dice que la **Potencia Total Radiada P_r** [Watts], está distribuida de forma uniforme sobre la superficie de la esfera, por lo tanto, la Densidad de Potencia en cualquier punto de la esfera **P_a** está determinada por el cociente entre la Potencia Total Radiada **P_r** y el Área Total de la Esfera ($4\pi R^2$) ó:

$$\rho_e = \frac{P_t}{4\pi R^2}$$

3

en donde P_t = potencia total radiada (watts)
 R = radio de la esfera (el cual es igual a la distancia desde cualquier punto en la superficie de la esfera a la fuente)
 $4\pi R^2$ = área de la esfera

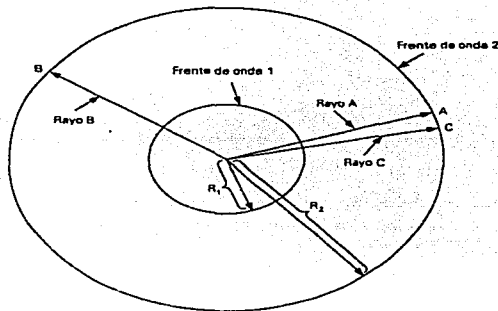


Figura 6. Frente de Onda Esférica para una Fuente Isotrópica.

II.4 Ley Inversa Cuadrática.

Esta ley nos proporciona una cantidad adimensional, la cual **relaciona Densidades de Potencia entre dos puntos cualesquiera**, es decir, conforme un frente de onda se aleja de su fuente, la Densidad de Potencia va disminuyendo, esto es porque el área de la esfera se incrementa en proporción directa a la distancia de la fuente al cuadrado, entonces, la Densidad de Potencia es

inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de la fuente. En forma matemática, de acuerdo con la Figura 6 para los rayos A y C se tiene:

La densidad de potencia del frente de onda 2 es:

$$\mathcal{P}_2 = \frac{P_r}{4\pi R_2^2} \quad \boxed{4}$$

La densidad de potencia del frente de onda 1 es:

$$\mathcal{P}_1 = \frac{P_r}{4\pi R_1^2} \quad \boxed{5}$$

La relación entre las dos densidades de potencia está dada por:

$$\frac{\mathcal{P}_2}{\mathcal{P}_1} = \frac{P_r/4\pi R_2^2}{P_r/4\pi R_1^2} = \frac{R_1^2}{R_2^2} = \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2 \quad \boxed{6}$$

II.5 Atenuación y Absorción de Ondas.

Atenuación.

La ley inversa cuadrática para la radiación, también nos dice que las ondas se alejan más unas de otras cubriendo así un área cada vez más grande, por consecuencia el número de ondas por unidad de área disminuye. La reducción en

la Densidad de Potencia con respecto a la distancia es equivalente a la pérdida de potencia, llamada **Atenuación de Onda γ_a [dB]**, se expresa en términos del logaritmo común, es decir:

$$\gamma_a = 10 \log \frac{P_1}{P_2} \quad \boxed{7}$$

A la reducción en la Densidad de Potencia debida a la propagación sobre el espacio NO libre se llama:

Absorción.

La Atmósfera de la Tierra, se compone de átomos y moléculas de varias sustancias, tales como: gases, líquidos y sólidos; estos materiales son capaces de absorber Ondas Electromagnéticas, una vez absorbida la onda, la energía se pierde, dando lugar a una atenuación en los niveles de voltaje e intensidades de Campo Eléctrico, Campo Magnético y a una reducción considerable en la Densidad de Potencia. La **Absorción** de RF en una atmósfera normal, **depende de la frecuencia de la señal transmitida**, la absorción es insignificante para señales que operan alrededor de los 10GHz. Las condiciones atmosféricas anormales tales como: lluvias fuertes, tormentas eléctricas ó neblina muy densa absorben más energía que una atmósfera normal.

II.6 Propiedades Ópticas de las Ondas de Radio.

II.6.1 Refracción.

La Refracción Electromagnética es el cambio de dirección de una Onda Electromagnética conforme dicha onda pasa oblicuamente de un medio a otro, con

velocidades diferentes de propagación, es decir, la refracción ocurre siempre que una onda de radio pasa de un medio a otro medio de diferente densidad. En la

Figura 7 se aprecia la Refracción de un frente de onda; el medio 1 es menos denso que el medio número 2, esto también quiere decir que la velocidad de propagación en el medio 1 V_1 es mayor que la velocidad de propagación en el medio número 2 V_2 , $V_1 \gg V_2$. En la Figura 8 se presenta la Refracción de un frente de onda el cual se propaga en un medio de transmisión que tiene un gradiente (disminución) de densidad, es decir, tiene un variación gradual en su índice de Refracción.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

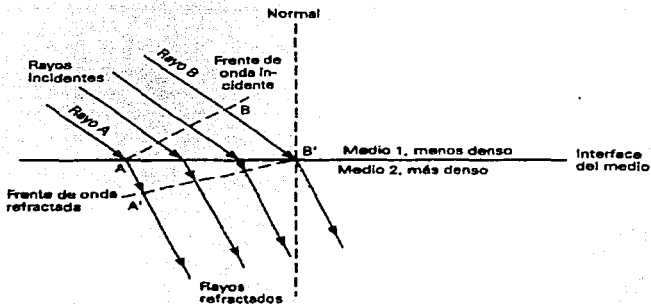


Figura 7. Refracción de un frente de onda.

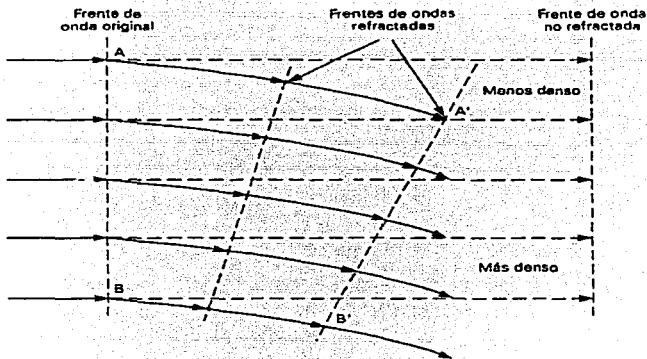


Figura 8. Refracción en un medio con Gradiente de Densidad.

II.6.2 Reflexión.

La Reflexión Electromagnética ocurre cuando una onda incidente choca con la interfaz de dos medios y algo ó toda la potencia incidente no entra al segundo material, tal y como se puede apreciar en la Figura 9. Si todas las ondas reflejadas permanecen en el medio 1, las velocidades de las ondas reflejadas e incidentes son iguales; el ángulo de reflexión θ_r es igual al ángulo de incidencia θ_i , es decir, $\theta_r = \theta_i$.

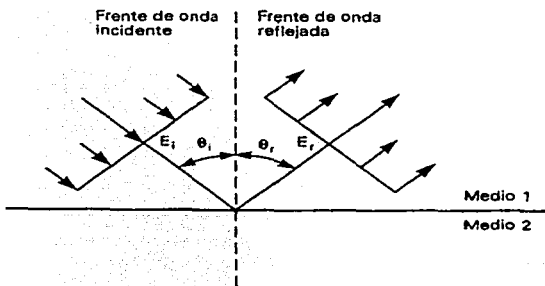


Figura 9. Reflexión de un Frente de Onda.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

II.6.3 Difracción.

La Difracción Electromagnética es la redistribución de la energía dentro de un Frente de Onda cuando pasa cerca del extremo de un objeto, esto permite que las ondas de radio se 'asomen' a la vuelta de las esquinas. Cuando un Frente de Onda pasa cerca de un obstáculo o una discontinuidad de dimensiones comparables en tamaño de una longitud de onda, se hace uso del **Principio de Huygens** para explicar el comportamiento del frente de onda.

Principio de Huygens: "...cada punto de rayo (P_1, \dots, P_n orificios) de un Frente de Onda Esférica determinado se puede considerar como una fuente secundaria de ondas electromagnéticas, desde donde se irradian hacia afuera otras ondas secundarias u ondas pequeñas..." En la Figura 10 se presenta este principio.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

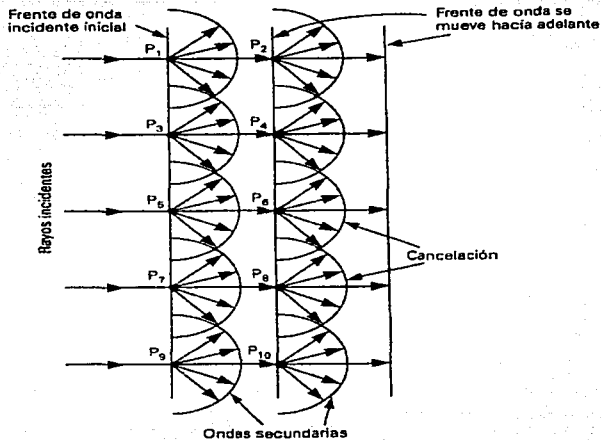


Figura 10. Principio de Huygens.

En la Figura 10, se muestra la Difracción de un Frente de Onda que incide sobre una placa que tiene orificios comparables a una longitud de onda, como se observa existen cancelaciones de ondas secundarias tanto hacia la derecha como hacia la izquierda, debido a que tienen la misma amplitud y fase; se observa también que se mantiene el Frente de Onda original, es decir, en el sentido de avance no ocurre cancelación alguna.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

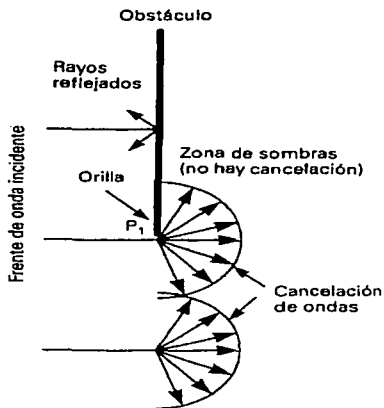


Figura 11. Difracción de un Frente de Onda.

En la Figura 11, se muestra la Difracción de un Frente de Onda del lado derecho del obstáculo la cancelación de ondas es parcial, la Difracción ocurre en el extremo del obstáculo, permitiendo que las ondas secundarias pasen inadvertidas a la zona de sombras.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

II.6.4 Interferencia.

La Interferencia de Ondas de Radio ocurre cuando dos o más Ondas Electromagnéticas se combinan de tal forma que el funcionamiento del sistema se degrada, es decir, cuando dos ondas ocupan simultáneamente el mismo punto en el espacio, en la Figura 12 se presenta la interferencia entre dos Ondas Electromagnéticas (Onda A y Onda B) que están en el espacio libre, puede observarse que en el punto 'X' las dos ondas ocupan la misma área de espacio.

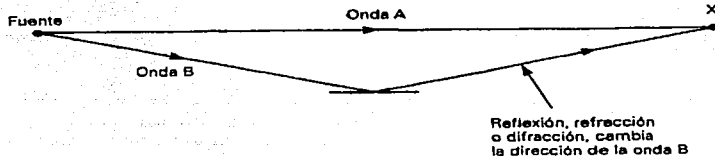


Figura 12. Interferencia de Dos Ondas Electromagnéticas.

II.7 Propagación de Ondas.

Las Ondas Electromagnéticas viajan en línea recta, excepto cuando la Tierra y su Atmósfera alteran su trayectoria, en la Figura 13, se presentan los modos normales de propagación de ondas. Existen tres formas de propagación de las Ondas Electromagnéticas, las cuales son:

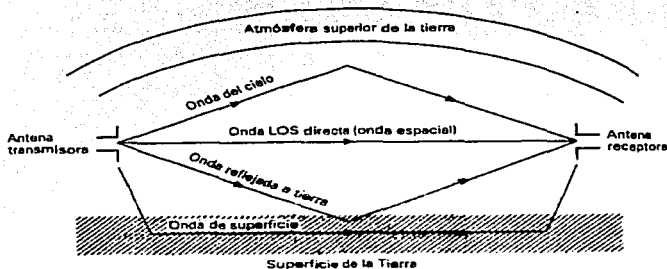
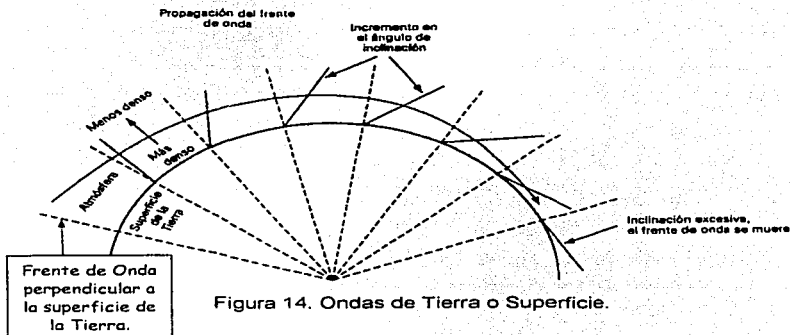


Figura 13. Modos de Propagación de Ondas.

II.7.1 Ondas de Tierra.

Una Onda de Tierra o de Superficie es una Onda Electromagnética que viaja sobre la superficie de la Tierra, estas ondas **deben estar polarizadas verticalmente**, si su campo eléctrico está polarizado horizontalmente el campo de la onda esta paralelo a la superficie Terrestre y da origen a un corto circuito debido a la conductividad de la Tierra, las ondas de Tierra se propagan mejor sobre una superficie que sea un buen conductor, como por ejemplo: agua salada y áreas desérticas muy áridas. En la Figura 14, se muestra la propagación de Ondas de Tierra, la atmósfera Terrestre tiene un gradiente de densidad, es decir, su densidad se reduce gradualmente con la distancia con respecto a la superficie de la Tierra, produciendo que el frente de onda se incline progresivamente hacia delante.



II.7.2 Ondas Espaciales.

La propagación de este tipo de ondas incluye energía radiada que viaja unos cuantos kilómetros, en la parte inferior de la atmósfera Terrestre; dentro de las Ondas Espaciales también tenemos las Ondas Directas y las Ondas Reflejadas de Tierra, como se puede observar en la Figura 15. Las Ondas Directas viajan en línea recta, entre antenas; la propagación de Ondas Espaciales con Ondas Directas se llama Transmisión de Línea de Vista (LOS), este tipo de propagación se ve limitada por la curvatura de la Tierra.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

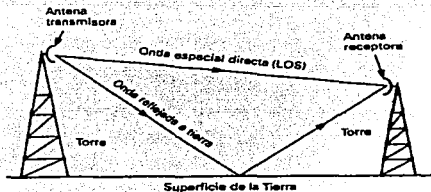


Figura 15. Ondas Espaciales.

II.7.3 Ondas de Cielo.

Las ondas del cielo se envían hacia el cielo, donde son reflejadas o refractadas nuevamente a la Tierra por la ionosfera. La ionosfera es la región de espacio que comprende de 50 a 400 kilómetros arriba de la superficie de la Tierra y es la porción más alta de la atmósfera Terrestre. En la Figura 16 se aprecia la propagación de las Ondas de Cielo.

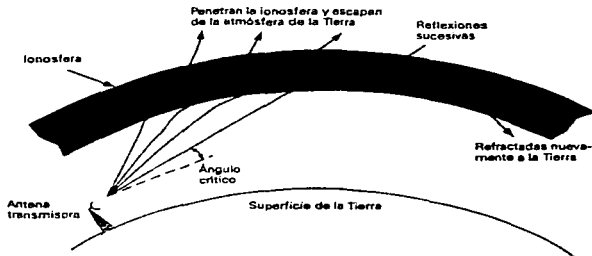


Figura 16. Ondas de Cielo.

II.8 Longitud de Onda.

La longitud de onda es la longitud que un ciclo de una onda electromagnética ocupa en el espacio, es decir, es la distancia entre los puntos semejantes en una onda repetitiva. La longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia de la onda y directamente proporcional a la velocidad de propagación, la velocidad de propagación de la energía electromagnética en el espacio libre se asume que sea la velocidad de la luz, es decir, 300 000 Km /seg. La relación entre la frecuencia, velocidad y longitud de onda se expresa matemáticamente como:

$$\lambda = c / f.$$

Donde:

λ , es la longitud de onda (metros / ciclo)

c , es la velocidad de la luz (300 000 Km /seg.)

f , es la frecuencia (Hertz).

También se sabe que:

$$T = 1 / f$$

Donde:

T , es el periodo de tiempo en que un valor de la onda se repite dos veces (segundos), y el inverso de la frecuencia es el periodo T .

Por lo tanto también podemos escribir:

$$\lambda = c \times T.$$

La energía electromagnética está distribuida a través de un rango de frecuencias casi infinito, el espectro de frecuencias electromagnéticas total que muestra las localizaciones de varios servicios dentro de la banda que se muestra en la Figura 16a, se observa que se extiende desde las frecuencias subsónicas hasta los rayos cósmicos. cada banda de frecuencias tiene una característica única que la hace diferente a las otras bandas.

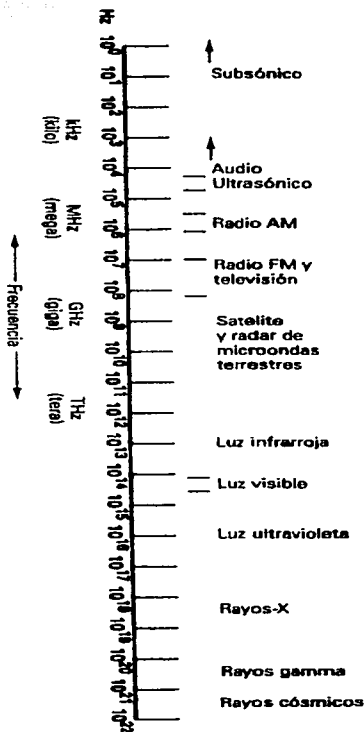


Figura 16a. Espectro Radioeléctrico.

Por ejemplo: Para las señales de radio que tienen frecuencias de operación en KHz (KiloHertz), MHz (MegaHertz) y GHz (GigaHertz), su respectiva longitud de onda es:

Para 1KHz, tenemos:

$\lambda = c / f = 300 \text{ M} / 1\text{K} = 300 \text{ 000 metros}$, por esta razón a este tipo de ondas se les denomina 'ondas kilométricas'.

Para 1MHz, tenemos:

$\lambda = c / f = 300 \text{ M} / 1\text{M} = 300 \text{ metros}$, por esta razón a este tipo de ondas se les denomina 'ondas métricas'.

Para 1GHz, tenemos:

$\lambda = c / f = 300 \text{ M} / 1\text{G} = 300 \text{ milímetros}$, por esta razón a este tipo de ondas se les denomina 'ondas milimétricas'.

II.9 Ionosfera.

La Ionosfera, es la porción más alta de la atmósfera terrestre, por lo que absorbe grandes cantidades de la energía radiante del Sol, que ioniza las moléculas del aire, creando electrones libres. Cuando una onda de radio pasa a través de la ionosfera, el Campo Eléctrico de la onda ejerce una fuerza en los electrones libres, haciéndolos que vibren. *Los electrones vibrantes reducen la corriente, que*

es equivalente a reducir la constante dieléctrica. Reducir la constante dieléctrica incrementa la velocidad de propagación y hace que las ondas electromagnéticas se doblen alejándose de las regiones de alta densidad de electrones no ionizados, hacia regiones de baja densidad de electrones, es decir, incrementando la refracción y reflexión. Conforme la onda se aleja más de la superficie de la Tierra, hay menos moléculas de aire para ionizar. Por lo tanto, en la atmósfera más alta hay un porcentaje más elevado de electrones no ionizados que en la atmósfera más baja. Originando que las ondas regresen nuevamente a la Tierra.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPITULO III.

Antenas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

III.1 Operación Básica de la Antena.

Antena, es un conductor metálico capaz de radiar y recibir ondas electromagnéticas, se utiliza como una interfaz entre un transmisor y el espacio libre ó entre el espacio libre y un receptor.

Radiación, es la pérdida de energía en el espacio libre.

Las **Guías de Onda** y las **Lineas de Transmisión**, son diseñadas de tal manera que la radiación sea mínima.

Las antenas se diseñan para radiar ó recibir energía de la forma más efectiva posible.

En la Figura 17 se muestra un esquema de una Antena la cual consta de: una línea de transmisión de 2 conductores, conectada a un generador ó transmisor de Radio Frecuencia (RF).

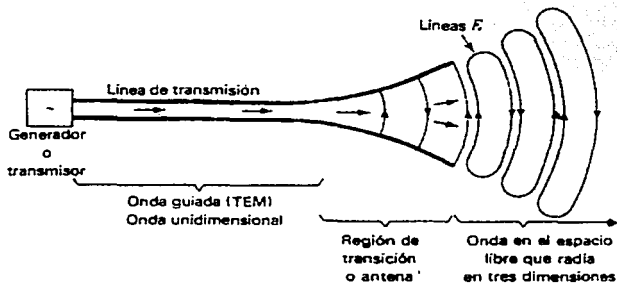


Figura 17. Diagrama Básico de una Antena.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Funcionamiento.

A lo largo de la parte uniforme de la línea, la energía es guiada como una onda plana TEM con poca pérdida, el espacio entre los conductores es una pequeña fracción de longitud de onda; hacia la derecha la línea de transmisión está abierta. Conforme la separación se aproxima al orden de una longitud de onda o más, la onda tiende a ser radiada, de manera que la línea abierta actúa como antena que lanza una onda hacia el espacio libre. Las corrientes en la línea de transmisión fluyen hacia la antena y terminan ahí, pero los campos asociados con ellas, es decir, el campo magnético H y el campo eléctrico E prosiguen.

Antena de Transmisión: es la región de transición entre una onda guiada y una onda en el espacio libre.

Antena de Recepción: es la región de transición entre una onda proveniente del espacio libre y una onda guiada.

III.2 Términos y Definiciones.

III.2.1 Diagrama ó Patrón de Radiación.

Un Patrón de Radiación es un diagrama polar o gráfica que representa la elevación y azimuth de las intensidades de los Campos Eléctrico E [V/m] y Magnético H [A/m] o las Densidades de Potencia P [W/m²] en varias posiciones angulares en relación con una antena. Los diagramas de radiación se pueden representar por cantidades tridimensionales que toman en cuenta la variación del campo o la potencia en función de las coordenadas esféricas θ , ϕ y en forma polar tal y como se muestra en la Figura 19. La Figura 18 muestra un patrón de radiación con distancia radial r proporcional a la intensidad de campo en dirección θ y ϕ . Se

debe tener cuidado en que el diseño de la antena cubra los requerimientos de diseño de la estación base.

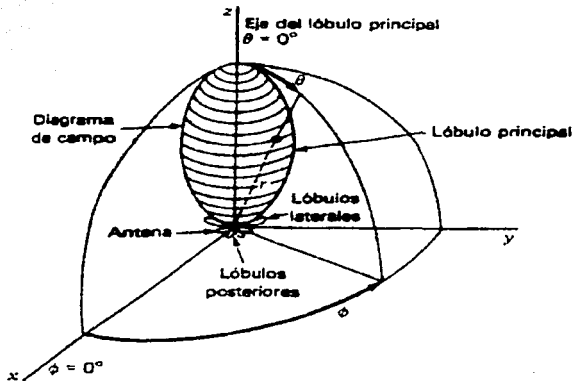


Figura 18. Diagrama de Radiación.

Donde:

El **lóbulo principal** se obtiene una radiación máxima de potencia y refleja la directividad máxima.

Los **lóbulos laterales** se obtiene una radiación mínima, comúnmente recepción no deseada. La importancia en considerar los lóbulos laterales radica en que pueden y crean problemas potenciales al generar interferencias.

Los **lóbulos posteriores** se tiene recepción indeseada.

El diagrama de radiación está formado por 3 patrones, los cuales están relacionados con la intensidad del Campo Eléctrico y la polarización; los cuales son los siguientes:

$E_{\theta}(\theta, \phi)$, la componente θ de E en función de θ y ϕ

$E_{\phi}(\theta, \phi)$, la componente ϕ de E en función de θ y ϕ

$\delta(\theta, \phi)$, la diferencia de fase de $E_{\theta}(\theta, \phi)$ y $E_{\phi}(\theta, \phi)$ en función de θ y ϕ

Si el Patrón de Radiación se traza en términos de la intensidad del Campo Eléctrico o de la Densidad de Potencia, se llama **Patrón de Radiación Absoluto**. Si se traza la intensidad del Campo Eléctrico o la Densidad de Potencia en relación a un valor sobre un punto de referencia, se llama **Patrón de Radiación Relativo**.

Las antenas reales no irradian potencia como las antenas isotrópicas, pero tienen diagramas de radiación en donde podemos encontrar direcciones que irradian más potencia que otras. En la ingeniería de antenas se consideran 2 diagramas de radiación, es decir, un diagrama que irradia potencia sobre el plano vertical y otro en el plano horizontal. La dirección en donde se concentra la mayor cantidad de potencia recibe el nombre de lóbulo principal, haz principal ó lóbulo frontal; mientras que las direcciones en donde se irradia menor potencia se les conoce como: lóbulos laterales ó posteriores, tal y como se observa en la Figura 18.

El Diagrama de Radiación de una antena tiene dos objetivos:

Uno.- Concentrar la mayor cantidad de potencia sobre una dirección ó área específica, con el objetivo de proporcionarle a la señal un camino donde existe mayor potencia para hacer un mejor enlace.

Dos.- Eliminar la potencia radiada que sea posible en alguna otra dirección ya que pueden existir antenas adyacentes a la nuestra y originar interferencia sobre las señales.

En la Figura 19, se observan Diagramas de Radiación en Forma Polar; se puede ver que la radiación máxima está en la dirección de 90° de la referencia. La Densidad de Potencia a 10Kms de la antena es una dirección de 90° es de $10\mu\text{W}/\text{m}^2$. En una dirección de 45° , el punto de igual Densidad de Potencia es 5Kms de la antena; a 180° , está a solamente a 4Kms; y en una dirección de -90° , en esencia no hay radiación.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

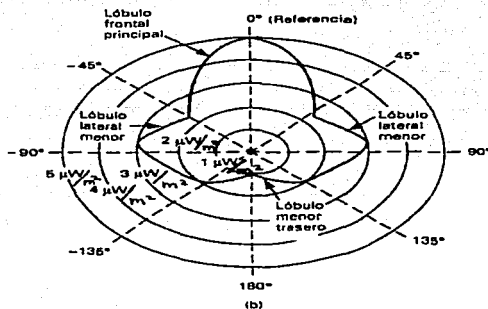
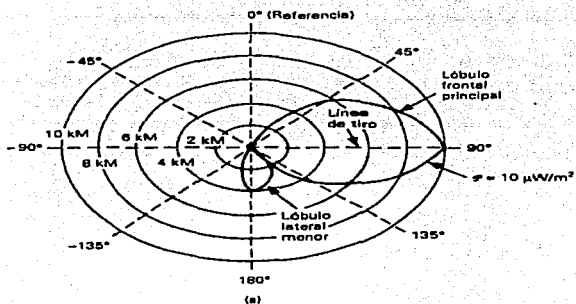


Figura 19. Diagramas de Radiación Polares.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

III.2.2 Relación Frente-Atrás.

Esta es una relación que expresa cuanta energía se dirige en oposición al lóbulo principal de la antena. La norma de la IEEE IS-1983, hace referencia al front-back, como la razón de la máxima directividad de una antena y su dirección específica posterior. A la relación de la Potencia del Lóbulo Frontal con la Potencia del Lóbulo Trasero se llama Relación Frente -Atrás (R_{FB} , $\text{Ratio}_{\text{Front-Back}}$), la cual se puede calcular con la siguiente expresión matemática:

$$R_{FB} = P_{mM} / P_{mB}$$

Donde:

P_{mM} – Es la Densidad de Potencia máxima del Lóbulo Principal [W/m^2]

P_{mB} – Es la Densidad de Potencia máxima del Lóbulo Trasero [W/m^2]

En dB tenemos:

$$R_{FB} = 10 \text{ Log } (P_{mM} / P_{mB})$$

Por lo general, la Intensidad del Campo Relativo y la Densidad de Potencia se trazan en decibeles dB, donde:

$$\text{dB} = 10 \text{ Log } (P_{RMS} / P_{max})$$

$$\text{dB} = 20 \text{ Log } (E_{RMS} / E_{max})$$

En la Figura 20, se muestra un Patrón de Radiación Relativo para la Densidad de Potencia en dB. En la dirección de $\pm 45^\circ$ de la referencia, la Densidad de Potencia es -3dB , es decir, se tiene la mitad potencia radiada relativa a la Densidad de Potencia en la dirección de máxima radiación, es decir, a 0° .

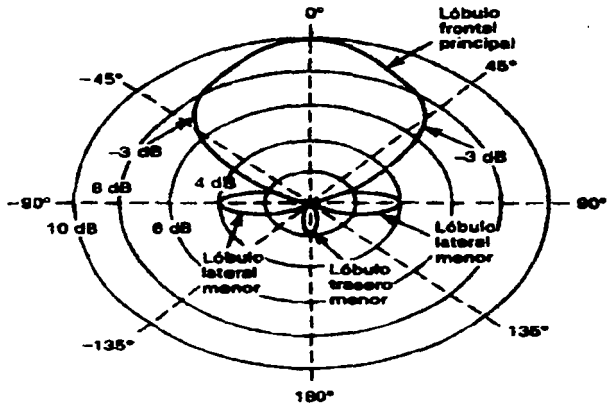


Figura 20. Diagrama de Radiación Logarítmico.

III.2.3 Resistencia de Radiación.

No toda la potencia suministrada a la antena se irradia, parte de ella se convierte en calor y se disipa; la resistencia de radiación es la resistencia de la antena en CA y está determinada por la Ley de Joule en términos de potencia, es decir, $P = V^2 / R = I^2 \cdot R = V \cdot I$, despejando a la resistencia obtenemos la siguiente ecuación:

$$R_r = \frac{P}{I^2}$$

1

donde R_r = resistencia de radiación (ohms)
 P = potencia radiada por la antena (Watts)
 i = corriente de la antena en el punto de alimentación (Amperes)

En la Figura 21 se presenta la antena como un elemento de circuito de 2 terminales, es decir, con una impedancia de entrada 'Z', y la **Resistencia de Radiación R_r** la cual es una cantidad escalar; desde el espacio libre la antena se caracteriza por sus patrones ó diagramas de radiación.

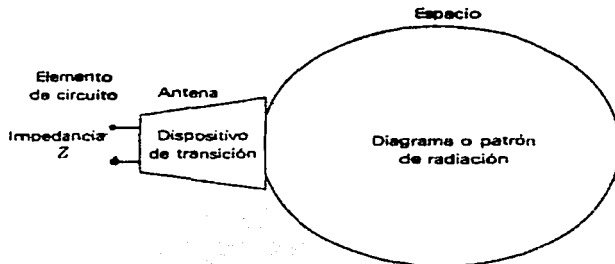


Figura 21. Circuito eléctrico de una Antena.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

III.2.4 Eficiencia de la Antena.

La eficiencia de una antena es la relación de la *Potencia Radiada por la Antena P_r* y la *Potencia Disipada en la Antena P_d* , matemáticamente está determinada por:

$$\eta = \frac{P_r}{P_r + P_d} \times 100$$

2

donde η = eficiencia de antena (%)
 P_r = potencia radiada por la antena (watts)
 P_d = potencia disipada en la antena (watts)

La Figura 22, muestra un circuito eléctrico equivalente simplificado para una antena, parte de la *Potencia de Entrada P_a* se disipa en las 'resistencias efectivas' R_e (resistencia de tierra, dieléctricos imperfectos) y la restante se irradia, el *Total de la Potencia de Entrada es la suma de la Potencia Disipada y la Potencia Radiada*, es decir, $P_a = P_r + P_d$, por tanto la eficiencia de la antena está determinada por la siguiente expresión:

3

$$\eta = \frac{i^2 R_r}{i^2 (R_r + R_e)} = \frac{R_r}{R_r + R_e}$$

donde η = eficiencia de la antena
 i = corriente de la antena (amperes)
 R_r = resistencia de radiación (ohms)
 R_e = resistencia de la antena efectiva (ohms)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

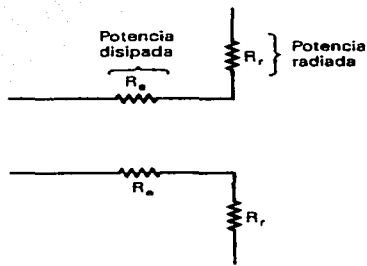


Figura 22. Circuito eléctrico equivalente de una antena.

III.3 Ganancia Directiva

La ganancia directiva ó directividad, es la relación de la *Densidad de Potencia Radiada P* en una dirección y punto en particular con la densidad de potencia radiada en el mismo punto y dirección por una antena de referencia, la antena de referencia comúnmente es una antena isotrópica; la máxima ganancia directiva para toda antena está determinada por la siguiente relación:

$$D = \frac{P}{P_{ref}}$$

4

donde D = ganancia directiva (sin unidades)
 P = densidad de potencia en algún punto de una antena determinada (W/m^2)
 P_{ref} = densidad de potencia en el mismo punto de una antena de referencia (W/m^2)

En dB's tenemos: $D = GdB = 10 \log (P / Pref)$

Nota: Se puede mejorar usando reflectores.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

III.4 Ganancia de Potencia.

La ganancia de potencia es igual a la ganancia directiva excepto que se usa el total de potencia que alimenta a la antena, es decir, la potencia de entrada y se toma la eficiencia de la antena, matemáticamente está expresada como:

$$A_p = D\eta$$

5

III.5 Polarización de la Antena.

Se refiere a la orientación del vector Campo Eléctrico E radiado desde ésta, el cual oscila en intensidad a la frecuencia de la onda radiada y puede conservar su orientación (polarización lineal) o girar alrededor del eje de propagación con velocidad angular (polarización elíptica y circular), una antena puede polarizarse en forma lineal ya sea horizontal ó verticalmente, en forma elíptica y circular. Por ejemplo, si se considera una antena que irradia una onda plana que se desplaza hacia fuera de la página, como se muestra en la Figura 23(a), con el Campo Eléctrico en la dirección 'Y', se dice que la antena está polarizada linealmente en la dirección 'Y'. En general, el Campo Eléctrico de una onda que viaja en la dirección 'Z' tiene una componente 'Y' y una componente 'X', tal y como se muestra en la Figura 23(c), si $E_x = 0$ la antena está polarizada Verticalmente con un ángulo de 90° , tal y como se aprecia en la Figura 23.1, si $E_z = 0$ la antena está polarizada Horizontalmente con un ángulo de 0° .

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

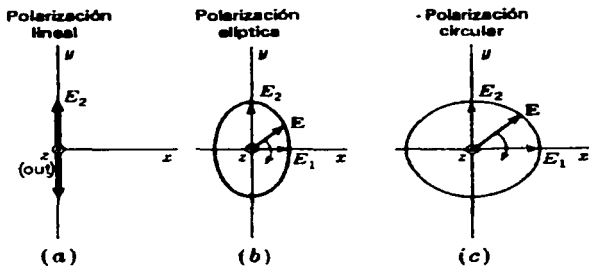


Figura 23. Polarización de una Onda Radiada por una Antena.



Figura 23.1. Polarización Lineal.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

III.6 Ancho del Haz de la Antena.

Es la separación angular entre los dos puntos o direcciones de media potencia – 3dB en el lóbulo principal del patrón de radiación de la antena, es donde toda la potencia de una antena transmisora será emitida, en la Figura 24, se presenta un diagrama de radiación sobre el plano principal en coordenadas polares con escala logarítmica en dB, el ancho del haz es el ángulo θ formado entre los puntos 'A', 'X' y 'B'; los puntos 'A' y 'B' son los puntos de media potencia.

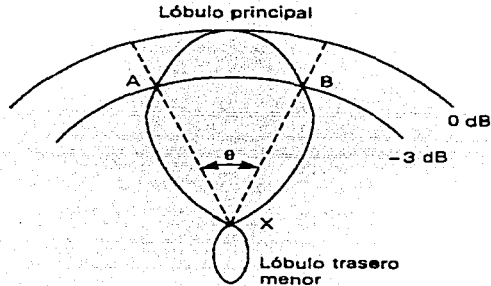


Figura 24. Ancho del Haz ó Angulo sólido del haz.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

III.7 Impedancia de Entrada de una Antena Z_0 ó Z_{entrada} .

La radiación proveniente de una antena es el resultado directo del flujo de corriente de RF; el punto de alimentación de una antena presenta una carga en CA a la línea de transmisión, llamada Impedancia de Entrada de la Antena, esta impedancia normalmente es de 50 Ohms que se acopla a la del cable coaxial conectado al transmisor, un valor mucho mayor en la impedancia de entrada obviamente afectará la transferencia de energía. Es la relación del voltaje de entrada y la corriente de entrada de la antena y generalmente es compleja, la impedancia de entrada de una antena está determinada por la siguiente expresión:

$$Z_{\text{entrada}} = \frac{E_i}{I_i}$$

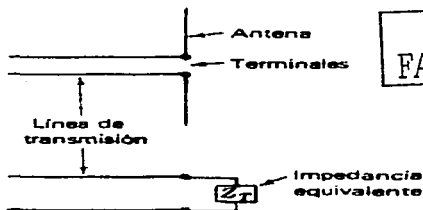
$$\begin{matrix} \angle \pm \gamma \\ \angle \pm \alpha \end{matrix} \quad \boxed{6}$$

donde Z_{entrada} = impedancia de entrada de la antena (ohms)

E_i = voltaje de entrada de la antena (volts)

I_i = corriente de entrada de la antena (amperes)

$\angle \pm \gamma$, $\angle \pm \alpha$ son los ángulos de fase.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 25. Circuito equivalente para la Impedancia de Entrada para una antena.

III.8 Ancho de Banda de una Antena.

Este se define como el rango de frecuencias sobre las cuales la operación de la antena es satisfactoria, también se refiere a las variaciones en la impedancia de entrada de la antena. El Ancho de Banda de una antena depende de la Frecuencia a la cual va a trabajar ' f ' y el Factor de Calidad ' Q '; está determinado por la siguiente ecuación:

$$BW = f / Q \text{ [Hz].}$$

Donde: f – es la frecuencia de operación.

Q – es el Factor de Calidad y está determinado por la siguiente ecuación.

$$Q = \pi * Z_T / 4 * R_r \text{ [adimensional].}$$

Donde: R_r – es la Resistencia de Radiación [Ω]

Z_T – es la Impedancia en el punto de Alimentación. [Ω].

$$Z_T = 120 \text{ [Ln (H / a - 1)].}$$

III.9 Intermodulación.

Es la cantidad de interferencia que la antena introduce a la red por la presencia de fuertes señales, debe ser verificada al correrse la prueba. Por ejemplo algunos fabricantes proponen la distorsión por intermodulación (IMD) a 2 tonos, mientras que otros proponen 3 o múltiplos de 3. El punto es además de conocer el nivel de la señal que la IMD genera, se necesita saber el nivel que causó la IMD.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

III.10 Ondas Incidentes y Reflejadas.

Una línea de transmisión ordinaria es bidireccional, es decir, la potencia puede propagarse en ambas direcciones. El voltaje que se propaga, desde la fuente hacia la carga, se llama *voltaje incidente* y el voltaje que se propaga, desde la carga hacia la fuente se llama *voltaje reflejado*. En forma similar, hay corrientes incidentes y reflejadas. En consecuencia, la **Potencia Incidente P_i** , se propaga hacia la carga y la **Potencia Reflejada P_r** , se propaga hacia la fuente. Cuando $Z_0 = Z_L$ (Z_0 es la impedancia de la línea de transmisión y Z_L es la impedancia de la carga), la carga absorbe toda la potencia incidente y la radia, a esto se le conoce como *línea acoplada*. Cuando $Z_0 \neq Z_L$, parte de la potencia incidente es absorbida por la carga y parte se regresa (refleja) a la fuente, esto se conoce como *línea desacoplada*; con una línea de este tipo, hay 2 ondas electromagnéticas que viajan en direcciones opuestas y están presentes en la línea todo el tiempo a las que se les da el nombre de ondas viajeras, dichas ondas establecen un patrón de interferencia conocido como *onda estacionaria*, tal y como se muestra en la Figura 26.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

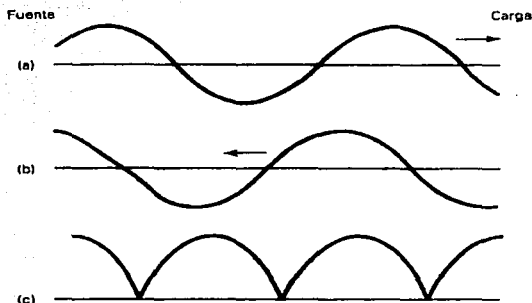


Figura 26. Desarrollo de una onda estacionaria en una línea de transmisión: a) onda incidente, b) onda reflejada y c) onda estacionaria.

III.10.1 Relación de Onda Estacionara. SWR ó VSWR (Voltage Standing Wave Ratio).

La relación de onda estacionara SWR, se define como la relación del voltaje máximo con el voltaje mínimo, o de la corriente máxima con la corriente mínima de una onda estacionaria en una línea de transmisión. SWR frecuentemente se llama relación de onda estacionara de voltaje (VSWR). Esencialmente, la VSWR es una medición del acoplamiento entre la impedancia de carga Z_L y la impedancia característica de la línea de transmisión Z_0 , matemáticamente, la VSWR es:

$$VSWR = 1 + |\rho_v| / 1 - |\rho_v| .$$

$$\rho_v = Z_L - Z_0 / Z_L + Z_0$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ρ_v , es el coeficiente de reflexión para el voltaje.

La relación de onda estacionaria de voltaje puede adquirir valores comprendidos entre 1 (adaptación perfecta), esto significa que la antena recibe toda la potencia que radia el emisor, en forma de ondas electromagnéticas, convirtiendo la atenuación debida al cable como despreciable e infinito ∞ (desadaptación total). El máximo del voltaje ($V_{\text{máximo}}$) ocurre cuando las ondas incidentes (V_i) y reflejadas (V_r) están en fase, es decir, que sus picos máximos pasan el mismo punto en la línea con la misma polaridad; el mínimo de voltaje ($V_{\text{mínimo}}$) ocurre cuando las ondas incidentes y reflejadas están 180° fuera de fase, entonces:

$$V_{\text{máximo}} = V_i + V_r$$

$$V_{\text{mínimo}} = V_i - V_r$$

Por lo tanto:

$$VSWR = V_i + V_r / V_i - V_r$$

Además de la ecuación anterior puede verse que cuando las ondas incidentes y reflejadas son iguales en amplitud (desacoplamiento total), la $VSWR = \text{infinito}$, lo cual es el peor de los casos. Cuando no hay una onda reflejada ($V_r = 0$), la $VSWR = V_i / V_i = 1$, esta situación ocurre cuando $Z_0 = Z_L$ y es la situación ideal.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

III.11 Construcción.

Los atributos de construcción asociados con sus dimensiones físicas, los requerimientos del montaje, los materiales usados, la carga del viento, los conectores y el color constituyen esta figura de mérito. Por ejemplo, es cuanto a materiales empleados, es necesario considerar el tiempo de vida de estos, si soportan la corrosión, en especial en zonas tropicales debido a la presencia de agua salada.

III.12 Costo.

Este es un punto muy importante, ya que debe buscarse una antena que cubra los requerimientos de la estación base al menor costo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPITULO IV.

Características de una Antena de Radio Base en un Sistema Celular.

IV.1 Términos y Definiciones para Antenas de Radio Bases y Antenas Móviles.

IV.1.1 Azimuth.

Azimuth se define como el ángulo de apuntamiento horizontal de una antena, normalmente se mide en una dirección, según las manecillas del reloj, en grados del norte verdadero. Como se observa en la Figura 27.

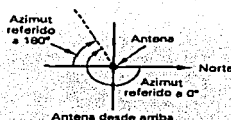


Figura 27.

IV.1.2 Angulo de Elevación.

El ángulo de elevación es el ángulo formado entre la dirección de viaje de una onda radiada desde una antena y la horizontal. Como se observa en la Figura 28.



Antena vista de lado

Figura 28.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

IV.1.3 Diagrama de Antena.

Es una representación gráfica, donde se puede observar la cobertura tanto en el plano horizontal como en el plano vertical, la Potencia y la forma de la cobertura. Es muy útil en el momento de diseñar diversos enlaces.

IV.1.4 Ancho de Banda.

El ancho de banda es el rango de frecuencias en el que la antena opera de forma eficiente, como por ejemplo, el panel de antenas para una aplicación del estándar IS-95CDMA tiene un ancho de banda que comprende desde los 820 a 960MHz.

IV.1.5 Ganancia.

Representa que tanto de la potencia que alimenta a la antena es disipada por esta última en forma de calor y que obviamente no está siendo irradiada, para una antena transmisora con una ganancia moderada o alta con un bajo consumo relativo de potencia es conveniente, ya que esto significa que nuestra señal se está irradiando y no se disipa en la estructura de la antena.

IV.1.6 Altura.

La altura de la Antena con respecto a tierra significa tener una mejor cobertura del sistema. De cualquier forma si la cobertura del sistema es muy buena, existe interferencia la cual es originada por otras células, pudiendo ocasionar algunos problemas tanto de recepción ó transmisión. La propagación de ondas de radio es estadística, es decir, que existen ciertos lugares donde encontramos una buena recepción y transmisión de la señal para algún punto lejano con respecto a la

estación base. Por lo tanto la altura de la antena de una radio base es muy importante, pues con esto eliminamos parcialmente algunos eventos bastante dañinos para nuestra señal.

IV.1.7 Impedancia de Entrada.

Es la resistencia compleja que presenta la antena en su punto de alimentación, esta resistencia es la suma de la resistencia óhmica y la componente reactiva (inductiva y capacitiva) normalmente dicha impedancia debe oscilar entre los 50, 72 y 75 Ohms; si la impedancia de entrada es muy superior a los valores citados, la mayor parte de la potencia de entrada se disipará en la componente resistiva de la antena y no se irradiará hacia la atmósfera, esto también se ve reflejado en la eficiencia de la antena.

IV.1.8 Rigidez Mecánica.

Si la antena se dobla ó flexiona con facilidad con el viento, ocasiona que nuestras señales no sean captadas adecuadamente, es decir, existen pequeños cortes, además el doblamiento continuo ocasiona que el metal se debilite en la zona donde se presenta el esfuerzo cortante, dando por resultado que nuestra antena sufra una fractura, este punto es importante para diseñar y seleccionar la antena con la rigidez mecánica apropiada para un determinado sitio donde se realizará la instalación de la radio base.

IV.1.9 Polarización.

La polarización de una antena es la dirección del Campo Eléctrico **E** para una recepción máxima de la antena receptora o la dirección del Campo Eléctrico **E** transmitido por una antena. Para fines de este trabajo de Tesis la polarización de

los Panels de Antenas están diseñados para una recepción y transmisión con una polarización Lineal y sobre el eje Vertical (véase Especificaciones pag. 99).

IV.2 Tipos de Antenas.

- **IV.2.1 Isotrópica.** Es utilizada como referencia (de potencia) para todas las demás antenas, radia energía uniformemente y constante en todas direcciones.
- **IV.2.2 Dipolo.** Emplea un conductor cuya longitud física es igual a la mitad de la longitud de onda $\lambda/2$ de la señal en que va a operar el sistema, normalmente es acoplada por el centro y tiene una impedancia característica de entrada de 73 Ohms.
- **IV.2.3 Monopolo.** Conocida también como antena Marconi, tiene una longitud física igual a la mitad de un dipolo, es decir, $\lambda/4$ debido a que utiliza un plano de tierra, para producir un patrón similar al de una antena de semionda. La impedancia característica es generalmente de 36 Ohms. Una ventaja con respecto al dipolo es que casi duplica la densidad de potencia.
- **IV.2.4 Lazo.** Existen circulares y rectangulares, las características físicas de la antena determinan la longitud de onda para la frecuencia deseada. Este tipo de antenas tiene aplicaciones en dispositivos móviles PCS ('teléfonos sin antena') y en los localizadores.
- **IV.2.5 Microcinta.** Consiste de una superficie conductora la cual está separada de un plano de tierra por un material dieléctrico. Puede ser rectangular o circular, sus principales ventajas son el tamaño y el costo, lo cual las hace muy adecuadas para aplicaciones inalámbricas. Este tipo de antenas tiene

aplicaciones en dispositivos móviles PCS ('teléfonos sin antena') y en los localizadores.

IV.3 Antenas de la Radio Base.

Existen muchas antenas que pueden ser usadas e instaladas en una radio base, todo depende del diseño del sistema, es decir, que tipo de antenas se emplearan para los enlaces de los suscriptores (Transmisión y Recepción), cuales para el centro de control, monitoreo y las antenas usadas para enlaces entre radio bases. Dentro de las antenas empleadas en la práctica tenemos las siguientes:

- Antenas Direccionales.
 - Antenas Colinelaes con reflectores.
 - Antenas Logo-Periódicas.
 - Antenas Yagui.

Ventajas:

1. Patrón de Radiación en una dirección en especial.
2. Facilidad para el crecimiento del Sistema, mediante el reuso de Frecuencias.
3. Delimitar el contorno del Sistema ó Zona de Cobertura.

- Antenas Omnidireccionales.
 - o Antenas Colinelaes.

Ventajas:

1. Proporciona un patrón de Radiación, en 2 direcciones en especial.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

El presente trabajo sólo va a comprender el análisis de las antenas que se instalan para la transmisión y recepción de los suscriptores, es decir, las Antenas Directivas Colineales con reflector, los análisis de los demás tipos de antenas van más allá de los objetivos del presente trabajo.

Las Antenas Directivas Colineales, están constituidas con un arreglo de elementos de dipolo los cuales operan en fase. La radiación máxima se da en la dirección al eje del arreglo de dipolos, como se puede apreciar en la Figura 29.

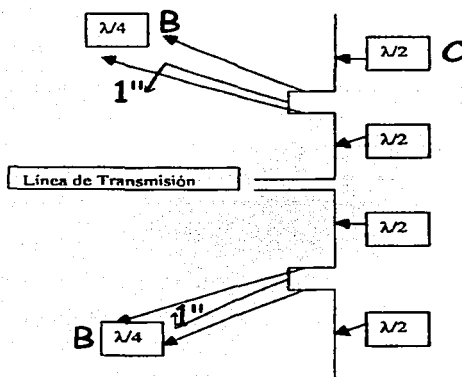


Figura 29. Arreglo Colineal de 4 Dipolos.

IV.4 Diversidad.

Los sistemas inalámbricos utilizan transmisión de línea de vista, es decir, tiene que existir una ruta de señal directa, de línea de vista, entre las antenas de transmisión y recepción. En consecuencia, si esa ruta de señal experimenta una degradación severa, ocurrirá una interrupción del servicio. La diversidad sugiere que hay más de una ruta de transmisión o método de transmisión disponible, entre un transmisor y un receptor. En un sistema inalámbrico, el propósito de utilizar la diversidad es incrementar la confiabilidad del sistema o dicho con otras palabras incrementando su disponibilidad. Cuando hay disponible más de una ruta de transmisión o método de transmisión, el sistema puede seleccionar la ruta o método que produce la señal de más alta calidad recibida. Aunque hay muchas formas de lograr la diversidad, los métodos más comunes que se utilizan son: frecuencia, espacio, polarización, tiempo y ángulo.

IV.4.1 Espacio.

Cuando se utiliza la diversidad de espacio, es importante que la distancia eléctrica de un transmisor a cada una de sus antenas y de un receptor a cada una de sus antenas sea un múltiplo igual al largo de sus longitudes de onda ($d \geq n\lambda$, $n = 2,4,6, \dots$) ya sea horizontal o vertical. Esto es para asegurar que cuando dos o más señales de la misma frecuencia llegan a la entrada de un receptor, estén en fase y se puedan agregar, de lo contrario se cancelarán y en consecuencia resultará con menos potencia la señal recibida; con la diversidad de espacio, hay más de una ruta de transmisión, entre transmisor y receptor. Cuando existen condiciones atmosféricas adversas, es poco probable que una de las rutas esté experimentando la misma degradación que otra, un método de la diversidad en espacio utiliza una sola antena de transmisión y dos antenas receptoras separadas verticalmente, dependiendo de las condiciones atmosféricas en un

momento determinado, una de las antenas receptoras deberá recibir una señal adecuada. Como se aprecia en la siguiente Figura 30.

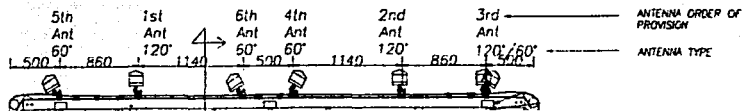


Figura 30. Diversidad de Espacio Horizontal, (Cortesía de AxTel). Act:mm.

IV.4.2 Polarización.

Esta forma de diversidad en recepción comprende el uso de 2 ramas ó 2 antenas que son polarizadas en planos ortogonales, es decir, un campo eléctrico esta en la dirección X y el otro en la dirección Y. La ventaja principal de la polarización sobre los sistemas de comunicación es que requiere un reducido número de antenas. Y el reuso de la frecuencia.

IV.4.3 Tiempo.

En esta técnica de diversidad todas las unidades móviles trabajan en la misma frecuencia pero, cada móvil tiene un lapso de tiempo para transmitir toda la información que en ese tiempo le sea posible y así sucesivamente hasta terminar el enlace, como se ve es bastante tedioso, por lo que mejor la diversidad en tiempo es usualmente explotada en corrección de errores en retroceso. Sin embargo, una de la desventaja con el uso de esta técnica es el proceso de tiempo requerido para recolectar y correlacionar todas las señales repetidas y perdidas en el proceso.

IV.4.4 Frecuencia.

Comprende la técnica de transmisión de información en dos diferentes frecuencias, es decir, se usa una frecuencia para realizar el enlace de la estación base hacia el móvil, este canal de comunicación es llamado "Forward Channel", para el caso de la transmisión desde el móvil hacia la estación base se usa otro canal o frecuencia al que se le llama "Reverse Channel". Pero todo esto dentro del ancho de banda dedicado para este servicio.

IV.4.5 Angulo.

Esta técnica de diversidad cuenta con un ángulo de recepción de la señal y otro ángulo diferente para la transmisión, en lugar de tener con una separación física de antenas para responder a diferentes características de atenuación de la misma señal.

IV.5 Aislamiento de la Antena.

El aislamiento que se debe tener entre la antena de transmisión y la de recepción se puede hacer con la separación física de las antenas o con el uso de filtros en el sitio celular. El aislamiento se expresa en términos de los Decibelios dB's de atenuación que la señal del transmisor sufrirá cuando pase frente a la antena receptora.

En el caso de la atenuación originada por la separación vertical, es decir, VI-Vertical Isolation, se tiene la siguiente relación matemática:

$VI = 28 + 40 \text{ Log (separación vertical / la longitud de onda de la señal a transmitir)}$.

Para el caso anterior la separación vertical debe ser mayor a la longitud de onda de la señal a transmitir. Generalmente una separación vertical brinda un mayor aislamiento que una separación horizontal, pero si este fuera el caso, es decir, HI - Horizontal - Isolation, se puede hacer uso de la siguiente relación matemática.

$$HI = 22 + 20 \text{ Log (separación horizontal / longitud de onda de la señal a transmitir).}$$

Nota: En la ecuación anterior el cociente debe ser mayor a 10 para que sea aplicable.

Cuando se da el caso de una combinación de separaciones, vertical y horizontal, es decir, SI- Slant Isolation, se debe considerar el ángulo entre las antenas θ y usar la relación siguiente:

$$SI = (VI - HI) * ((\theta/90^\circ) + HI)$$

IV.6 Ganancia.

Otro método para calcular la Ganancia es conociendo los valores en grados ($^\circ$) de los anchos de haz de media potencia en los 2 planos principales, es decir, θ_E - Angulo en -3dB plano E Campo Eléctrico [$^\circ$], θ_H - Angulo en -3dB plano H Campo Magnético [$^\circ$], esta ecuación tiene unidades dBi (decibeles referidos a una antena isotrópica), la cual se describe a continuación.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En la Figura 31, se pueden ver los efectos que se tienen en los patrones de radiación de un dipolo y los efectos que se tienen al poner un elemento más.

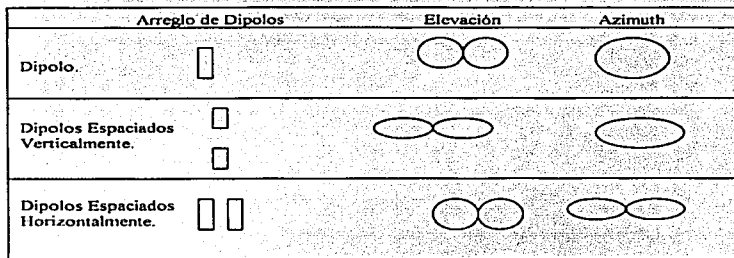


Figura 31. Diagramas de Radiación para diferentes arreglos de Dipolos.

Para calcular la ganancia se ocupa la fórmula de abajo donde se observa la relación entre la ganancia y el ancho del lóbulo.

$$G = 10 \text{ Log } 10 [(n \cdot 41253^{\circ 2}) / (\theta_E \cdot \theta_H)]$$

Donde:

G – Ganancia de la Antena, dBi.

n – factor de eficiencia ≤ 1 .

θ_E – Angulo en -3dB plano E [°]

θ_H – Angulo en -3dB plano H [°]

$4\pi \text{ sr} = 4\pi \cdot (180 / \pi)^2 = 41253^{\circ 2}$, ángulo sólido del haz dentro de una esfera.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Nota: El término dBi se usa para referir la ganancia de una antena con respecto a la ganancia de una antena isotrópica, es decir, que se tomó de referencia la ganancia que tiene un radiador isotrópico.

La relación muestra que si el tamaño vertical de la antena se incrementa al doble, la anchura del lóbulo de la antena en el plano vertical o de elevación disminuye a la mitad de su valor original.

IV.7 Conectores.

En los sistemas inalámbricos de comunicaciones se emplean muchos conectores de diferentes tipos, la elección de estos depende de las aplicaciones que se manejen. El conector elegido eléctricamente es una ampliación del cable coaxial instalado. Los tipos que normalmente se utilizan se listan a continuación:

- Tipo N.
- 7/16 DIN.
- EIA Flange.
- SMA.
- TNC.
- Mini UHF.
- UHF.

De los conectores listados anteriormente los más comunes para instalar son:

- Tipo N.
- 7/16 DIN.

Cuando se selecciona un conector, se necesita conocer los siguientes puntos:

1. Tamaño del Cable.
2. Rango de Frecuencia de Operación.
3. Método de Acoplamiento.
4. el SWR. (Standing Wave Ratio, Relación de Ondas Estacionarias).
5. Supresión de Intermodulación.
6. Instalación.
7. Mantenimiento.

IV.8 Selección de la Antena.

El proceso de selección de la Antena puede ser directo, pero se recomienda que la antena seleccionada satisfaga los requerimientos deseados para el sitio celular y el sistema. La antena seleccionada para la aplicación deberá cumplir como mínimo los siguientes puntos:

1. Los patrones de elevación y azimuth deben cumplir con los proyectados.
2. La antena expondrá la ganancia apropiada deseada.
3. La antena estará disponible en un stock común, es decir, en el inventario de la compañía.
4. La antena se podrá montar adecuadamente en la ubicación, es decir, será montada físicamente en la ubicación deseada.
5. Las antenas no afectarán adversamente la torre, viento, y el hielo que caiga en ellas, para la instalación.
6. El impacto visual negativo debe ser minimizado en la fase de selección y diseño.
7. La antena cumplirá las especificaciones deseadas de desempeño.

IV.9 Inclinación de la Antena.

Un punto importante en los ajustes de fase es la inclinación de la antena, pues son los efectos del terreno sobre el modelo mismo. Frecuentemente el ángulo que llevará la antena se elige únicamente con base en el patrón de elevación de la antena. Para encontrar el ángulo de inclinación se debe

partir de un valor de potencia deseado en un punto específico. De allí se empieza a hacer un barrido para buscar un punto dentro del espectro de radiación que cumpla con este requisito de potencia. Así en el momento de cumplir con la potencia deseada, se obtiene el ángulo de inclinación de la antena.

IV.10 Procedimiento de Barrido.

Un procedimiento de barrido, es la detección de posibles fallas a futuro, es decir, hay que tener en cuenta los parámetros de pérdida de todos los elementos que intervienen en ello; para que estos sean los adecuados para las mediciones que se involucren en el barrido.

Un método de 'barrer' un sistema de antenas es mediante el uso de un reflectómetro en el dominio del tiempo TDR. El TDR es una herramienta muy valiosa para detectar problemas en la línea de alimentación, es decir, rizado de los cables debido a curvas excedentes. El TDR tiene la desventaja de no ofrecer características de frecuencia del sistema de antenas.

Otro método es mediante el uso de un generador de rastreo y un servicio de monitor o analizador de espectros. Este tiene la ventaja de determinar las características en frecuencia del sistema de antenas y ofrece pocos o ningún dato de posición para determinar donde hay una falla, en el caso de que exista.

Un tercer método y muy recomendado es hacer uso de un analizador de red que tiene la capacidad de hacer el análisis tanto en el dominio de la frecuencia como en el dominio del tiempo.

IV.11 Panel de Antenas (Antena Direccional).

La función primordial de la antena en una radio base sobre una macrocélula, es proporcionar una cobertura parcial de una zona en el plano horizontal (azimuth), la antena proporciona directividad sobre el plano vertical, en la actualidad se están diseñando y fabricando antenas las cuales ofrezcan la posibilidad de que toda la potencia de entrada sea dirigida en su mayor parte a la tierra y en menor proporción hacia el cielo. Necesitamos entonces una cobertura parcialmente omnidireccional, por otra parte la directividad vertical es proporcionada por un arreglo vertical de dipolos, los dipolos están en fase con respecto a la señal de entrada; usualmente este arreglo de dipolos recibe el nombre de arreglo colineal o antena lineal y tiene la apariencia a simple vista de un monopolo. Un típico patrón de radiación para este tipo de antena se muestra en la Figura 32.

TESIS CON
FALLA DE ONSCF

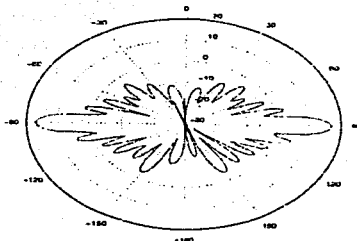


Figura 32. Patrón de Radiación sobre el plano Horizontal de una Antena Lineal.

En ocasiones se desea limitar la cobertura en el plano horizontal, con el objetivo de dividir un área en sectores de cobertura, esto usualmente se logra diseñando un arreglo de elementos individuales en una dirección vertical construidos dentro de un **Panel de Antenas**, tal y como se muestra en la Figura 33. La elección del ancho del haz de la antena sobre el plano horizontal es muy importante ya que puede originar el traslape de señales entre otros sectores de la estación, también ofrece un enlace adecuado, se tiene un control en la interferencia entre los canales existentes en la estación, lo anterior es el punto principal de la división de un área en sectores. Un patrón típico de un ancho de haz para un panel de antenas con un espaciamiento de 120° entre sectores, (3 sectores) se muestra en la Figura 34.

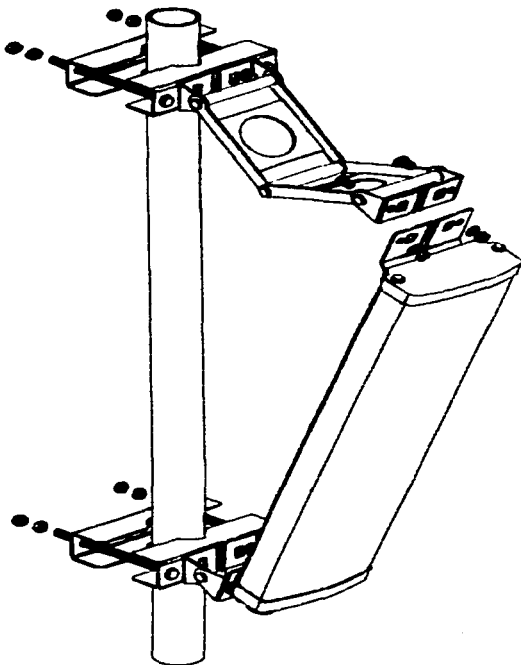
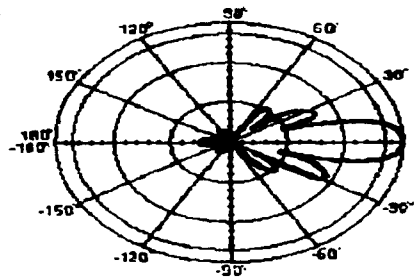
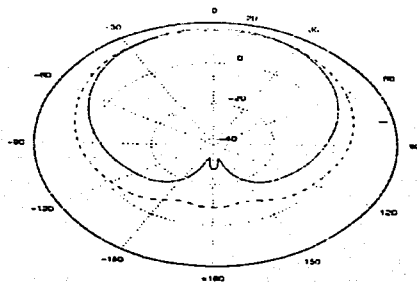


Figura 33. Panel de Antenas para una Macrocelula.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



a)

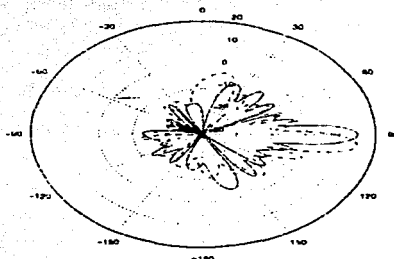


b)

Figura 34. Patrones de Radiación de una Panel de Antenas sobre: a) Eje Vertical E-Plano, b) Eje Horizontal H-Plano.

El ángulo de elevación dentro del diagrama de Radiación de la antena se debe diseñar cuidadosamente, ya que este permite delimitar la cobertura de la célula, sobre el plano vertical, esto se logra haciendo uso del "downtilt", la cual es una inclinación mecánica hacia abajo con un ángulo arbitrario sobre el plano del Campo Eléctrico, en donde la fase dentro del Panel es seleccionada para producir un patrón de radiación sobre un punto en especial; por ejemplo, si el downtilt es igual a 0° , entonces el eje de la antena se mantiene en posición totalmente vertical.

La inclinación Eléctrica se usa con más regularidad porque proporciona una cobertura satisfactoria sobre el plano vertical evitando lanzar señales al cielo, un



ejemplo de este tipo de inclinación se presenta en la Figura 35, donde se aprecian los efectos de la variación del ángulo de elevación o downtilt.

Figura 35. Efectos del ángulo de elevación o downtilt: 0° (—), 6° (- - -).

IV.11.1 Descripción del Panel de Antenas.

Un Panel de Antenas está constituido por un arreglo colineal en fase de 4 elementos, el patrón de radiación de este arreglo es transversal con respecto al

arreglo de elementos, además para ofrecer mayor directividad y cobertura (en área) tienen implementado un reflector, tal y como se puede observar en la Figura 36. Para comprender mejor el desempeño del Panel de Antenas, primero analizaremos algunas características principales de los arreglos lineales y por último el desempeño al implementarle un reflector de lámina.



Figura 36. Corte Transversal de un Panel de Antenas.

IV.11.2 Arreglos de Antenas.

Muchas antenas se diseñan para producir un patrón o diagrama de radiación direccional. La configuración de varios elementos o dipolos radiadores se conoce como 'arreglo de antenas' ó simplemente 'arreglo'. Varias antenas pequeñas pueden ser usadas en un arreglo con el objetivo primordial de obtener un desempeño similar al de las antenas grandes o para que opere como una sola antena (en lo referente al diagrama de radiación). Por otro lado el constante cambio de fase en las corrientes existentes en cada dipolo del arreglo sobre su diagrama de radiación, es el motivo principal por el cual es llamado 'arreglo de fase'. Los arreglos se pueden encontrar en muchas configuraciones geométricas, pero el más importante de ellos es el arreglo lineal o colineal, donde los dipolos se acomodan longitudinalmente siguiendo una línea recta. El diagrama de radiación de un arreglo lineal es determinado por el tipo de dipolos individuales que se usarán para su diseño, las orientaciones de los mismos, la posición de éstos en el espacio, la amplitud y fase de las corrientes con la que están alimentados. Básicamente un arreglo colineal está constituido por dipolos de $\lambda/2$, es decir, cada

arreglo consiste de una sección 'C' de $\lambda/2$ separadas por una sección 'B' de $\lambda/4$, la posición de este último nos permite mantener una fase constante proveniente de la señal de excitación para todos los elementos de nuestro arreglo tal y como se aprecia en la Figura 37; por otro lado el resultado del diagrama de radiación total de un arreglo depende de una variable llamada ' Factor del arreglo ' ó 'factor del Sistema'.

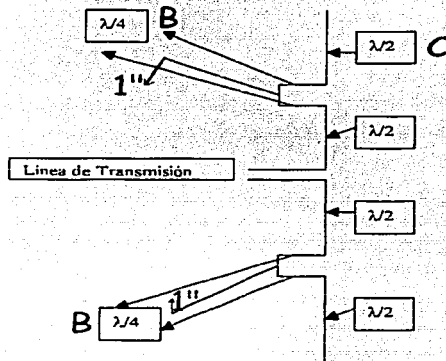


Figura 37. Arreglo Colineal de Dipolos.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

IV.11.3 Teoría de sistema de Antenas.

Mucho de la teoría de antenas implica algo más que la adición apropiada de las contribuciones de campo de todas las partes de una antena. Debe estudiarse el campo y no la potencia ya que es necesario incluir la magnitud y fase.

IV.11.3.1 Dos Fuentes Puntuales Isotrópicas.

Considérense 2 fuentes puntuales isotrópicas separadas por una distancia d , como se muestra en la Figura 38(a); una fuente puntual es una idealización de un radiador isotrópico que ocupa un volumen cero. Por reciprocidad los patrones de radiación de los sistemas de antenas de tales fuentes caso transmisión son idénticos a los patrones de radiación cuando el sistema de antenas se use como una antena receptora.

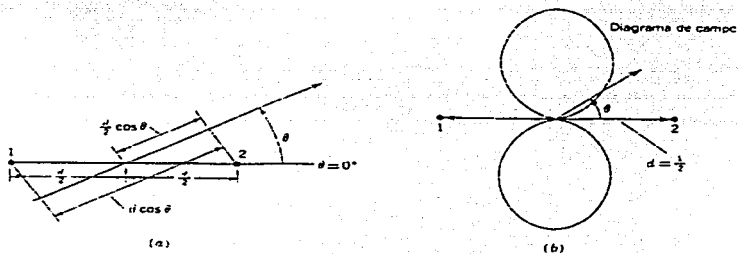


Figura 38. Dos Fuentes Puntuales Isotrópicas separadas una distancia d .

Sean idénticas en amplitud las 2 fuentes puntuales y en la misma fase, también ambas fuentes tienen la misma polarización; esto es, estén polarizadas ambas con E perpendicular a la página. Cuando el punto de referencia de la fase se toma a la mitad entre las fuentes, el campo lejano en la dirección θ y con un espaciamiento de $\lambda/2$ el patrón o diagrama de radiación del campo es como se muestra en la Figura 38(b).

IV.11.3.2 Multiplicación del Diagrama de Radiación.

"El diagrama de radiación del campo total de un sistema de antenas no isotrópicas, pero similares, es el producto del diagrama de radiación individual de una antena y el diagrama de un sistema de antenas puntuales isotrópicas ubicadas cada una en el centro de fase de la antena individual, con la amplitud relativa y fase de la antena, mientras el diagrama total de fase es la suma de los diagramas de radiación de fase de las antenas individuales y el sistema de antenas puntuales isotrópicas". El diagrama de radiación de la antena individual es el mismo cuando está en el sistema que cuando está aislada.

Para un sistema uniforme con n fuentes isotrópicas de igual amplitud y espaciamiento, como en

la Figura 39, el campo lejano total $[E]$, está expresado con:

$$E = nE_0$$

1

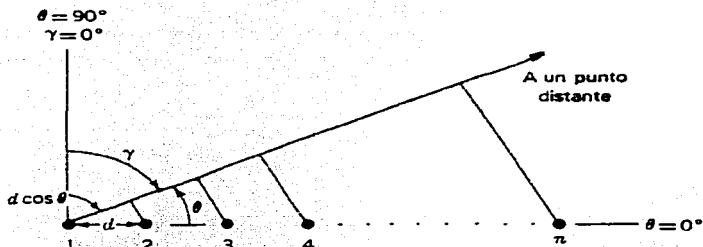


Figura 39. Sistema de n fuentes puntuales isotrópicas de igual amplitud y espaciamiento.

La expresión 1 es el valor máximo del campo lejano [E], es decir, es n veces el campo de una

fuente sola.

Además el Diagrama de Radiación Normalizado, está expresado con la siguiente ecuación:

$$E_n = E / nE_0$$

2

En la Figura 40, se ejemplifica la definición de la Multiplicación de los Diagramas de Radiación.

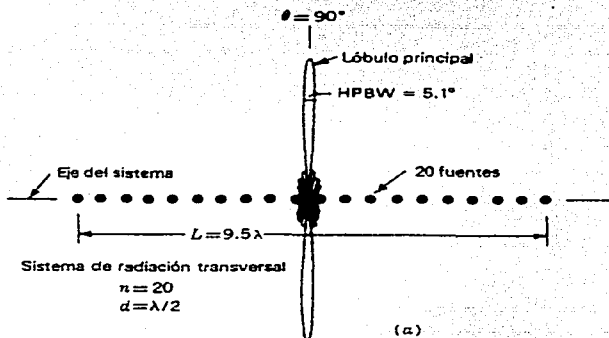


Figura 40. Sistema de radiación transversal de 20 fuentes puntuales de igual amplitud y espaciamiento $\lambda/2$.

Para lograr una Ganancia Directiva mayor se hace uso de los Reflectores Diedricos.

IV.11.4 Antenas Reflectoras.

Se llaman antenas reflectoras (de espejo) a aquellos dispositivos en los que se utiliza el fenómeno de la reflexión de las ondas sobre un reflector (espejo) para transformar las ondas electromagnéticas no direccionales o débilmente direccionales creadas por el radiador primario (Dipolo de media onda) en ondas direccionales emitidas al espacio.

Habitualmente, en calidad de reflector (espejo) se emplea un cilindro parabólico como el que se muestra en la Figura IV.11.4, el cilindro parabólico, se traza desplazando una parábola a lo largo de 2 rectas paralelas llamadas generatrices del cilindro. Se llama abertura u orificio a la parte del plano limitada por los bordes externos del reflector, la abertura de un cilindro parabólico tiene la forma de un rectángulo con lados a y b ; la línea focal FF de un cilindro parabólico a la línea paralela a las generatrices del cilindro que pasa por el foco de la parábola.

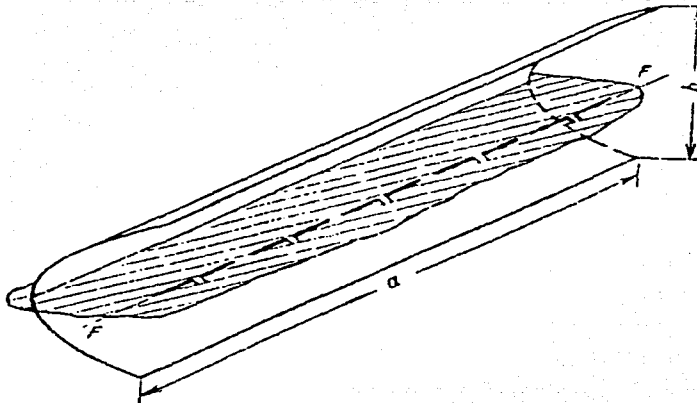


Figura IV.11.4 Antena Reflectorora Cilindro Parabólico.

VI.11.4.1 Reflectores Diedros.

La abertura del cilindro parabólico constituye una superficie de coincidencia de fase de forma rectangular. El diagrama de directividad del cilindro parabólico, en el plano Eléctrico que pasa por la línea focal, se determina por la relación entre su longitud a y la longitud onda λ . Mientras que el diagrama de directividad en el plano magnético se determina por la relación entre el tamaño b del reflector y la longitud de onda λ . Como $a \gg b$, la anchura del ángulo del diagrama de directividad en el plano Eléctrico es considerablemente menor que el correspondiente ángulo en el plano magnético, es decir, la antena de cilindro parabólico da un diagrama de directividad en forma de abanico, tal como se

presenta en la Figura 41 en la parte inferior de este párrafo. Por otro lado las anchuras de los lóbulos principales del diagrama de directividad en los planos Eléctrico y Magnético están determinadas por las siguientes relaciones:

$$20'_E = (56 \text{ a } 68 (\lambda/a))^\circ$$

$$20'_H = (60 (\lambda/b))^\circ$$

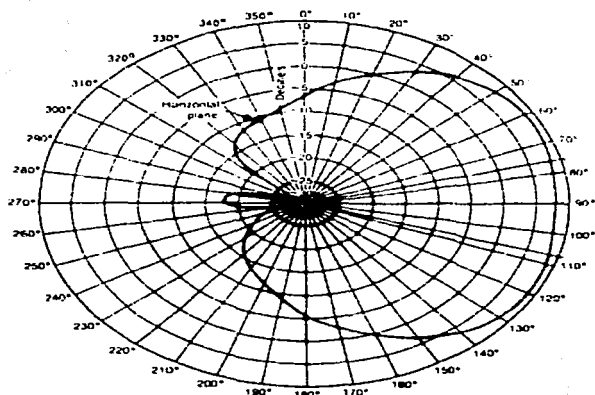


Figura 41. Diagrama de Radiación sobre el plano Horizontal.

Un reflector diedro consiste en 2 láminas reflectoras planas que se interceptan en ángulo, como se muestra en la Figura 42. Cuando el ángulo diedro es de 90° las láminas se encuentran en ángulo recto, formando un reflector diedro rectangular.

Con un elemento excitado colocado como se muestra en la Figura 41(d), el arreglo es una antena direccional activa para un amplio intervalo de ángulos diedros $0 < \theta_0 < 180^\circ$. Sin elemento excitado un diedro rectangular es un reflector de onda pasivo Figura 41(e) en un amplio intervalo de ángulos de incidencia $0 < \theta_i < \pm 45^\circ$, es decir, la onda reflejada se dirige hacia atrás a lo largo de la dirección de la trayectoria de la onda que llega, como se muestra en la Figura 41(e). Por lo que el reflector diedro pasivo actúa como un retroreflector.

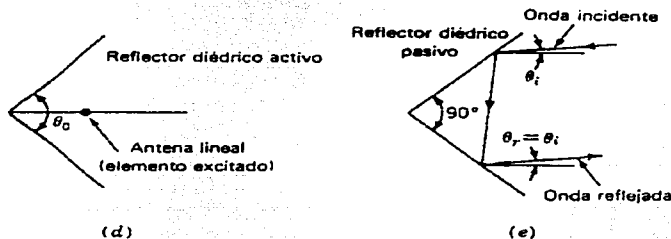


Figura 42. Reflector Diédrico: (d) con elemento excitado (activo), (e) sin elemento excitado (pasivo).

El diagrama o patrón para un elemento excitado aislado (sin reflector) sobre el plano Horizontal, se muestra en la Figura 43.

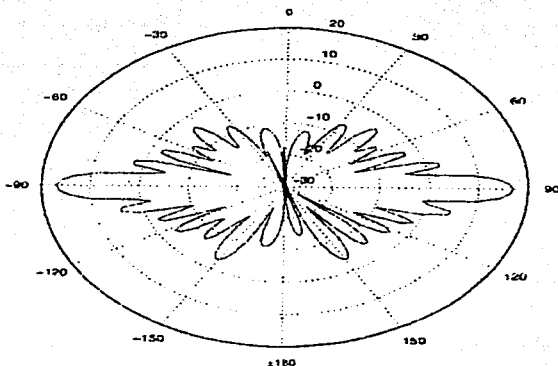


Figura 43. Diagrama de Radiación sin Reflector.

Si el elemento excitado es de $\lambda / 2$ de longitud y para una separación típica del elemento excitado a la esquina $s = \lambda / 4$ la ganancia de la antena de reflector diédrica rectangular sobre una antena dipolar de $\lambda / 2$ es $G = 10.2\text{dB}$ y su directividad es de $D = 12.35\text{dBi}$. El reflector diédrico se emplea ampliamente en muchas aplicaciones de televisión, de comunicación punto a punto y de radioastronomía.

Para una aplicación de 3 sectores, es decir, 120° entre cada panel de antenas, el diagrama de radiación del reflector tanto sobre el plano horizontal como el vertical se presentan en la Figura 44.

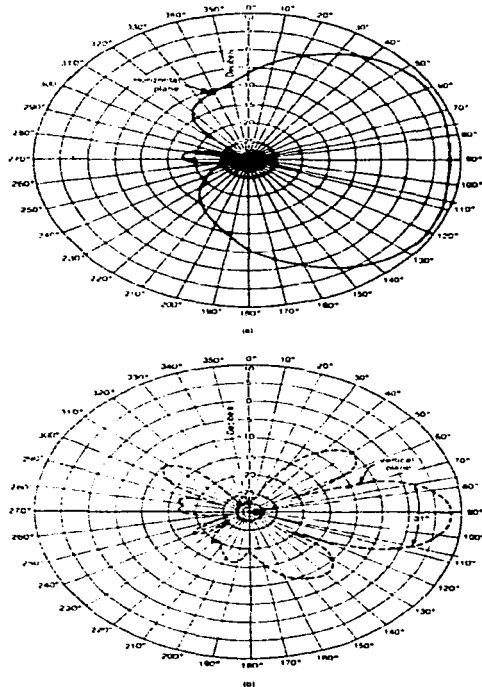


Figura 44. Diagrama de Radiación de una antena direccional con reflector a 120°:
a) Azimuth 8dB, b) Vertical 8dB.

IV.11.5 Parámetros de Enlace.

La ganancia de una antena es el parámetro más importante en el diseño de un sistema de antenas; también la ganancia depende de la apertura de la antena, A [m^2]. La cantidad de potencia captada por una antena está determinada por la siguiente ecuación:

$$P = \rho A$$

1

Donde:

P – es la Potencia [W].

ρ - es la Densidad de Potencia [W/m^2].

A – es el área de apertura [m^2]

La ganancia de una antena se puede definir ya sea con respecto a una antena isotrópica o con respecto a un dipolo de $\lambda/2$ y normalmente se hace el análisis para el caso de una antena de transmisión. El término dBi se usa para referir la ganancia de una antena con respecto a la ganancia de una antena isotrópica, así mismo el término dBd es utilizado para referir la ganancia de una antena determinada con respecto a la ganancia de un dipolo de $\lambda/2$, además $0\text{dBd} = 2.1\text{dBi}$.

Al diseñar un sistema de antenas se debe poner mucha atención en las hojas técnicas de las mismas, para seleccionar adecuadamente la figura de ganancia; como regla general, si la ganancia de la antena no se encuentra en términos ya sea en dBd ó dBi, por default la ganancia está en dBi a no ser que se especifique lo contrario.

Para una antena isotrópica, tenemos la siguiente relación que nos proporciona la densidad de potencia de recepción P_R a una distancia determinada r , en el espacio libre.

$$P_R = P_T / 4\pi r^2$$

Donde: P_T - es la potencia en la entrada de alimentación de la antena. [W]

P_R - es la densidad de potencia de recepción por unidad de área. [W /m²].

Una antena isotrópica es una antena idealizada a menudo es usada como referencia para realizar mediciones y diseñar otras antenas. Las antenas reales tienen densidades fuertes de potencia en algunas direcciones y densidades débiles de potencia sobre otras direcciones. El objetivo primordial en el diseño de una antena es diseñar un diagrama de radiación en donde la densidad de potencia

sea alta en la dirección que nosotros deseamos y tener una densidad de potencia baja en otras direcciones.

IV.11.5.1 Pérdidas de Trayectoria en el Espacio Libre.

Considerando el sistema mostrado en la Figura 45, donde una antena transmisora de una macrocélula tiene una cobertura con un nivel promedio de potencia denotado por P_T , la antena de transmisión con ganancia denotada por G_T , un receptor que se localiza a una distancia r , con nivel promedio de potencia denotado por P_R y con una ganancia de recepción denotada por G_R , la Densidad

de Potencia de recepción a una distancia r dentro del área de cobertura está determinada por la ecuación 2.

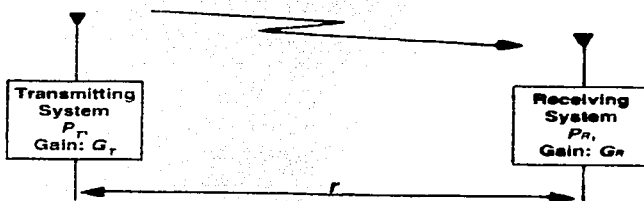


Figura 45. Modelo sencillo para las Pérdidas Originales por la Trayectoria sobre el Espacio Libre.

Por otro lado el área está relacionada con la ganancia de una antena receptora G_R con la siguiente ecuación:

$$G_R = 4\pi A_R / \lambda^2$$

3

Donde:

$$\lambda = c / f \text{ [mts]}$$

f – es la frecuencia de transmisión [Hz]

$c = 300\,000$ Km/seg. Es la velocidad de propagación de las ondas en el espacio libre.

A_R – es el área efectiva,

Entonces la potencia total recibida P_R , está denotada por la siguiente ecuación:

$$P_R = A_R A_R$$

4

Sustituyendo en la ecuación 4 los valores de A_R de la ecuación 2 y despejando A_R de la ecuación 3, junto con la ganancia de la antena receptora G_R y la ganancia de la antena transmisora G_T , tenemos:

$$P_R = (\lambda / 4\pi r)^2 * P_T G_T G_R$$

5

La ecuación anterior es conocida como **Fórmula de Friis**, la cual relaciona la potencia transmitida, la potencia recibida, la ganancia de la antena transmisora y receptora, la longitud de onda y la distancia entre el transmisor y el receptor.

La ecuación 5 sólo contiene las pérdidas de potencia de propagación sobre el espacio libre de las ondas transmitidas, si existen otras pérdidas, tales como absorción atmosférica o pérdidas óhmicas provenientes de líneas de transmisión o guías de onda, la ecuación 5 toma la siguiente forma:

$$P_R = (\lambda / 4\pi r)^2 * (P_T G_T G_R / L_0)$$

6

$$P_R = (P_T G_T G_R / L_0 L_p)$$

7

Donde:

L_0 es el factor de pérdida para otras posibles pérdidas de potencia adicionales que se presenten en el diseño.

$L_p = (4\pi r / \lambda)^2$, representa las pérdidas asociadas con la propagación de las OEM de transmisión, recepción y viceversa. L_p depende de la frecuencia de la portadora y la distancia r de separación, además siempre está presente.

Si expresamos la ecuación 7, en términos de dB, tenemos entonces:

$$P_R \text{ (dBW)} = 10 \log_{10} (P_T) + 10 \log_{10} (G_T) + 10 \log_{10} (G_R) - 10 \log_{10} (L_0) - 10 \log_{10} (\lambda / 4\pi r)^2.$$

8

El producto $P_T G_T$ es llamado Potencia Isotrópica Radiada Efectiva (PIRE) y el término $10 \log_{10} (\lambda / 4\pi r)^2$ se refiere a la pérdida en el espacio libre, es decir, L_p en dB.

IV.11.5.2 Ruido de Recepción.

El movimiento de los electrones en los dispositivos electrónicos no es constante, pero las fluctuaciones aleatorias de pérdida de energía en forma de calor son llamadas 'ruido térmico', por esta razón el ruido se expresa en grados, Watts ó Volts. Los elementos pasivos tales como las resistencias tienen una temperatura de ruido idéntica a su temperatura física, los elementos activos tales como: transistores, circuitos integrados y tubos de vacío tienen una temperatura de ruido más alta en comparación con su temperatura física. Los efectos del ruido térmico o temperatura de ruido también se le conoce como potencia de ruido y ésta es generada internamente; en este caso para el receptor se puede calcular la potencia de ruido con la siguiente ecuación:

$$P_{N \text{ int}} = k T_e BW.$$

9

Donde:

$P_{N \text{ int}}$ – Potencia de ruido interna. Power noise internal.

$k = 1.31 \times 10^{-23}$ J / °K la cual es la constante de Boltzman.

BW - es el ancho de banda [Hz]

T_e - Temperatura de ruido efectiva del dispositivo o elemento y es igual a:

$$T_e = T_0 (NF - 1)$$

Donde:

$T_0 = 290^\circ\text{K}$ a 300°K , es la temperatura ambiente

NF - es la figura de ruido del receptor, [$^\circ\text{K}$ ó dB].

La figura de ruido es propia del receptor y el correcto diseño del mismo es llamado etapa inicial de recepción. En general, todas las etapas generan ruido aunque sea una mínima parte y estas se tienen que sumar para así obtener un ruido térmico total; en la actualidad con los modernos semiconductores, las figuras de ruido tienen una pérdida comparada a 1dB.

Por otro lado si llegamos a diseñar un receptor perfecto con 0dB en su figura de ruido, entonces el único ruido térmico es originado por la línea de transmisión que alimenta a la antena y la temperatura de ruido de la antena, por lo que hay que sumar la temperatura de ruido de la antena T_{ant} y el equivalente de temperatura de ruido de los accesorios que conforman el sistema, los cuales están denotados por T_n y T_e , por lo que tenemos:

$$P_{N_{int}} = k (T_{ant} + T_e + T_n) BW = k T BW. \quad 10$$

La temperatura de antena no se refiere a la temperatura física propia de la antena, sino que la antena está inmersa dentro de una determinada atmósfera, para el caso del espacio libre, se tiene una temperatura ambiente de 290°K aproximadamente, por lo que para este caso la $T_{ant} = 290^\circ\text{K}$, representa una suma de fuentes de ruido las cuales dependen de la orientación de la antena y la banda de frecuencia de operación de la señal recibida.

Dividiendo la ecuación 5 entre la ecuación 2, obtenemos la relación señal a ruido, la cual está expresada de la siguiente forma:

$$SNR = P_R / P_{N_{int}} = (\lambda / 4\pi r)^2 [P_T G_T G_R / L_0 k T BW] \quad \boxed{11}$$

Ejemplo: Consideremos una Estación Base (BS, Base Station) que está transmitiendo a un móvil (MS, Mobil Station); y los parámetros del sistema de comunicaciones son los siguientes:

- a).- La distancia entre BS y MS es de 8Km.
- b).- La PIRE de la BS es de: $G_T = 20\text{dB}$, $P_T = 10\text{W}$, $G_T * P_T = 30\text{dBW}$.
- c).- La frecuencia de transmisión es de: 1.5GHz, por lo que $\lambda = 0.2\text{mts}$.
- d) La ganancia de recepción de la antena del MS es igual a $G_R = 3\text{dB}$.
- e).- El total de las pérdidas adicionales del sistema, son $L_0 = 6\text{dB}$.
- f).- La figura de ruido del MS es igual a $N_f = 5\text{dB} = 3.162^\circ\text{K}$
- g).- La temperatura de ruido de la antena del MS es de 290°K .
- h).- El ancho de banda del receptor MS es igual a $BW = 1.25\text{MHz}$.
- i).- Despreciando cualquier pérdida en la línea de transmisión en la BS.

Calcular la potencia de la señal recibida P_R y la SNR de la misma señal en el MS

Solución:

$$P_R = -20 \text{ Log } (\lambda / 4\pi r) + P_T + G_T + G_R - L_0$$

$$SNR = P_R / P_{N_{int}} = (\lambda / 4\pi r)^2 [P_T G_T G_R / L_0 k T BW]$$

$$L_p = -20 \text{ Log } [0.2 / 4\pi \times 8000] = -114\text{dB. Pérdidas sobre el espacio libre.}$$

$$G_T * P_T = 30\text{dBW}$$

$$L_0 = 6\text{dB}, G_R = 3\text{dB}$$

$$P_R = -114 + 30 + 3 - 6 = -87\text{dBW.}$$

$$P_{N\text{int}} = k (T_{\text{ant}} + T_e + T_n) BW = k T BW$$

$$T_{\text{ant}} = 290^\circ\text{K}$$

$$T_e = 627^\circ\text{K.}$$

$$P_{N\text{int}} = 1.38 \times 10^{-23} (627 + 290) (1.25 \times 10^{-6}) = 1.58 \times 10^{-14} \text{ W} = 10 \text{ Log } 1.58 \times 10^{-14} \text{ W}$$

$$= -138\text{dBW}$$

$$\text{SNR} = P_R / P_N = -87 / -138 = 0.630$$

IV.12 Selección de Sitios.

Un sitio o radio base es la localidad física donde está el equipo de radio para recibir, transmitir o ambos. En las comunicaciones de radio frecuencia de los sistemas celulares y PCS, hay una gran variedad de configuraciones de sitios de comunicación. Existen sitios celulares, tales como macro, micro, y pico. Un sitio de comunicación se puede componer básicamente como se observa en la Figura 46, en la Figura 47 se presenta la torre o estructura donde se montarán nuestras antenas, en la Figura 48 se presenta la disposición de las antenas y en la Figura 51 se muestra las partes básicas de nuestro sistema de comunicaciones.

IV.12.1 Microcélula.- Sitios celulares pequeños, regularmente usadas para incrementar la capacidad de un macrocélula en lo referente a cobertura, estos sitios o radio bases están en el rango de unos cuantos cientos de metros llegando hasta un kilómetro.

IV.12.2 Macrocélula.- Son sitios celulares muy grandes, es decir, la cobertura de cada radio base está en el rango de Kilómetros. Muchos sitios PCS tienen características de una macrocélula. Las múltiples configuraciones de los sitios de

comunicaciones dependen de cada tipo de plataforma tecnológica seleccionada para un sistema de comunicaciones, como por ejemplo: IMT, GSM, CDMA y PCS, entre otros, todos estos pueden ser configurados tanto como una célula direccional de 3 sectores o 6 sectores dependiendo de las aplicaciones que maneje.

IV.12.3 Picocélula.- Son sitios celulares muy pequeños, son utilizados para proporcionar alta capacidad de transmisión y recepción en interiores, como por ejemplo en los pisos de los edificios.

IV.12.4 Sitios Direccionales.

Los sitios direccionales son usados para locaciones cercanas a los bordes del sistema o cuando no se desea dar cobertura a una determinada área. Por ejemplo, la cobertura puede desearse a lo largo de una sola trayectoria y no en ninguna otra parte, es decir, que solamente se desea cubrir una porción recta de alguna autopista. En este caso el uso de un sitio direccional puede ser directamente aplicado.

Otra aplicación para el sitio direccional es cuando se está en el borde del sistema y no se desea el traslape con otro carrier, es decir, con otro proveedor del servicio. El punto aquí es determinar la superposición física que se permite en el sistema. Esto es más un punto de negocio que un punto técnico. Para este ejemplo se

presume que algún nivel de la superposición de extensión se permite pero no lo suficiente para que un sitio omnidireccional garantice el nivel de potencia deseado.

SITIOS A NIVEL DE PISO (RAW LAND)

ESQUEMA TIPICO

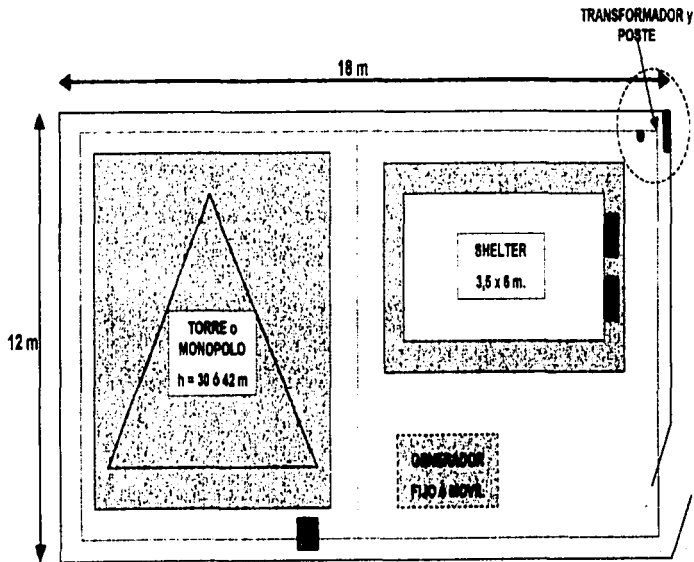


Figura 46. Esquema Básico de un sitio celular

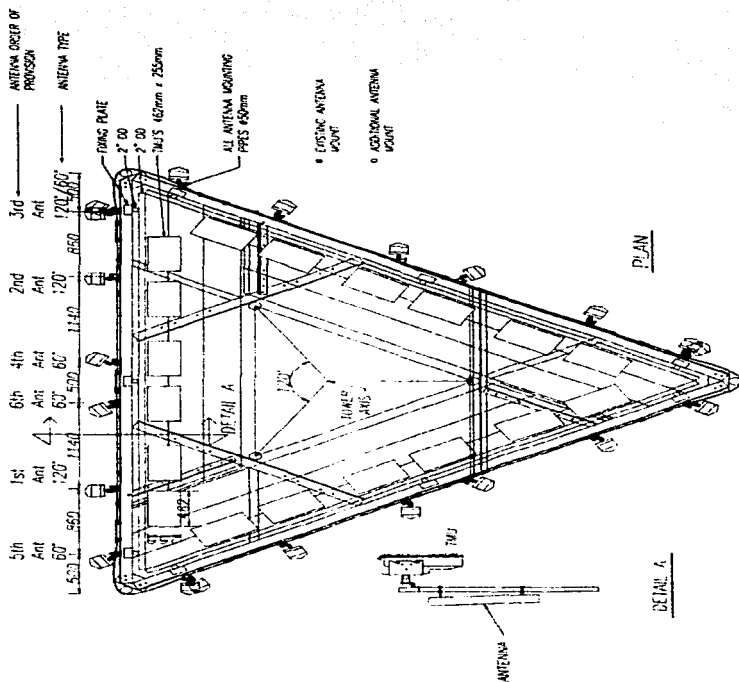


Figura 48. Esquema de la disposición de Antenas para 3sectores.

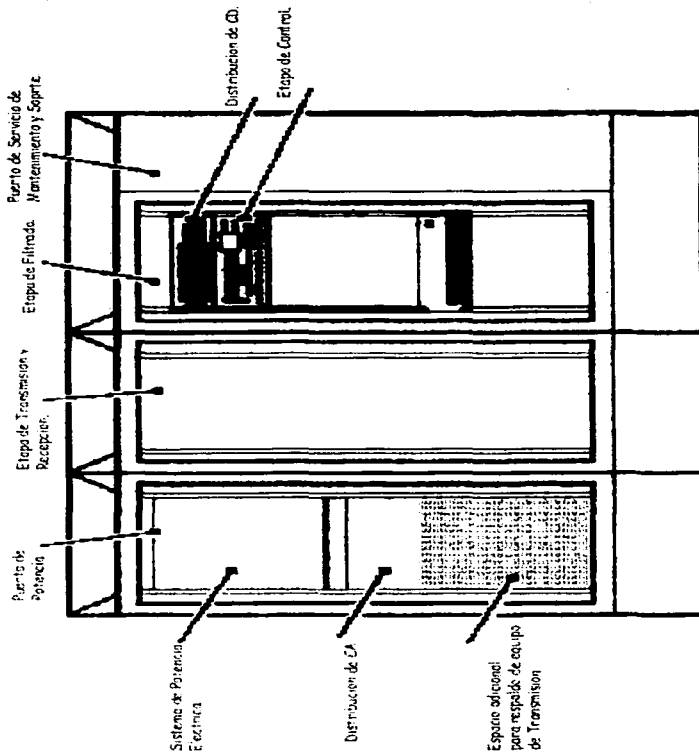


Figura 49. Esquema Básico de Equipo de Comunicaciones.

IV.12.4.1 Tres sectores.

El sitio celular de 3 sectores es una de las configuraciones para sitios celulares más populares utilizados en la industria inalámbrica. Estas células tiene como su nombre lo indica 3 sectores que cubren 120° cada uno, véase Figura 50; teniendo 3 sectores se tiene la cobertura de un círculo completo. Hay una gran variedad de combinaciones para transmisión y recepción que pueden ser usados para establecer un sitio celular de 3 sectores.

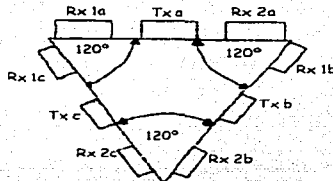


Figura 50. Configuración Básica de la Instalación de antenas para una cobertura de 3 sectores.

El número de antenas se puede reducir con el uso de duplexores, uno por cada sector.

IV.12.4.2 Seis sectores.

El uso de un sitio celular de 6 sectores cubren 60° , cada uno aumenta el número disponible de erlangs por kilómetro o milla cuadrada, es decir, aumenta la capacidad de tráfico que se pueda manejar, como se observa en la Figura 51.

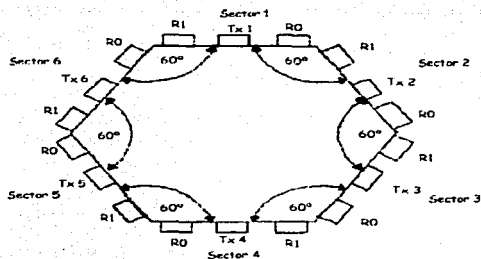


Figura 51. Configuración Básica de la Instalación de Antenas para una cobertura de 6 sectores.

Se puede manejar una sola antena de transmisión por sector o incluso 2 si así es requerido y también se pueden usar duplexores.

IV.13 Instalación de una Radio Base.

Existen muchos elementos que se deben considerar en la instalación de una célula, entre ellos tenemos los siguientes:

IV.13.1 Cableado.

Se refiere al cable que va desde el sistema de la antena hasta los equipos de la estación base, es muy importante tener cuidado al momento de diseñar la radio base en decidir cual camino se va a seguir, de lo contrario se podrá tener que rodear mucho y con ello emplear más cable.

IV.13.2 Montaje de la Antena.

A continuación se muestra una lista de los principales puntos que se deben verificar en el montaje de la antena:

1. Cuantas antenas y de que tipo serán instaladas.
2. Máxima longitud permitida del cable proporcionada por el fabricante de la antena.
3. Identificar y ordenar por importancia las posibles obstrucciones que alterarán la cobertura deseada.
4. Adecuado espaciamiento entre la antena de recepción y la de transmisión (Diversidad de espacio).
5. Requerimiento de aislamiento con otros servicios.
6. Parámetros de montaje de la antena.
7. Completar el análisis de intermodulación.
8. Verificar el análisis de línea de vista (en el caso que sea aplicable).

Nota: Esta lista puede variar de acuerdo a la situación específica con la que se esté trabajando.

IV.13.3 Diversidad de Espacio.

Es importante que la distancia eléctrica de un transmisor a cada una de sus antenas y de un receptor a cada una de sus antenas sea un múltiplo igual al largo de sus longitudes de onda ($d \geq n\lambda$, $n = 2,4,6,\dots$) ya sea horizontal o vertical.

IV.13.4 Torres.

Los 3 tipos más comunes de torres utilizados en las redes inalámbricas son: auto-soportadas, arriestradas y monopolo; las sostenidas por cables o arriestradas requieren una mayor área para su instalación pero son las más económicas, por su parte las auto-soportadas pueden soportar antenas de varios carriers por ejemplo: 24 antenas, pero son las más caras, las monopolo tienen un precio inferior que el de las auto-soportadas y pueden soportar varias antenas, como por ejemplo: 18 antenas.

IV.14 Intermodulación.

La intermodulación es la mezcla de 2 o más señales que producen una tercera o cuarta frecuencia, la cual no se desea. Todos los sitios celulares producen intermodulación dado que hay más de un canal en el sitio. Por lo tanto el reporte de intermodulación debe ser prerequisite para cualquier visita de sitios.

La intermodulación puede ser producida incluso dentro del equipo debido a malos conectores, antenas o fallas en los sistemas de tierra, pero la mayoría de los problemas son generados en el sistema de antenas del sitio y está dentro del control del operador corregirlos.

Para resolver este problema es recomendable seguir un procedimiento, el cual se describe a continuación:

Procedimiento de Revisión de Intermodulación.

- 1.- Conocer si hay algún transmisor (Radio Base) instalado en las inmediaciones.
- 2.- Recopilar la siguiente información sobre cada transmisor (Estación Base).

Tipos de antenas.

Tipo de emisión.

Potencia de transmisión.

Ubicación de antenas.

Operador de equipo.

Número de licencia de la FCC o COFETEL (Ciudad De México).

- 3.- Hacer un reporte de estudio de intermodulación que muestre la naturaleza del problema ya sea en su propia banda o en otra.
- 4.- Asignar el tiempo suficiente para hacer la revisión del reporte.
- 5.- Determinar si existe un problema potencial.
- 6.- Formular una hipótesis de la causa del problema y una solución de ingeniería.

Basado en el problema actual encontrar la solución puede tomar una de las siguientes formas:

1. ¿La identificación del problema es posible?
2. ¿ El problema puede resolverse en forma aislada?
3. ¿El problema está relacionado con una sobrecarga del receptor?

Si el problema es debido a la asignación de frecuencias, se tendrá que cambiar el plan de frecuencias, si el problema es por un receptor sobrecargado, se puede colocar un filtro en la ruta de recepción, si esto es causado por una frecuencia discreta; si es producido por celulares móviles se soluciona colocando un atenuador en la ruta de recepción, antes del primer amplificador, con lo que se reducirá la sensibilidad del receptor.

IV.15 Aislamiento.

El grado de aislamiento necesario para un sistema de comunicación depende de ciertos elementos, tales como:

1. La dirección de la potencia tanto del transmisor como del receptor.
2. La tecnología de la plataforma instalada.
3. La sensibilidad del receptor.

Especificaciones
del
Panel de Antenas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

PANEL BASE STATION Antenna for 2400 ISM/WLAN

Version 1.2

BSW24-09012-BFL

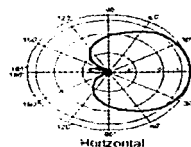
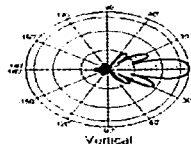
Electrical Specification

Frequency range / MHz	2300- 2500MHz
Gain / dBi	12 dBi
VSWR Max	1.5
Polarization	Linear vertical
3dB beamwidth / H-plane	85°
3dB beamwidth / E-plane	18°
Front to back ratio	25 dB
Downtilt	0°
Power handling	50W (CW) 2KW peak
Impedance	50 Ohms
Connector / Cable Length	N type female



Environmental & Mechanical Characteristics

Survival wind speed	100 km/h
Temperature	-40° C to +60° C
Humidity	100% @ 25° C
Lightning protection	DC ground
Radiator color	Gray/White
Radiator material	PVC
Housing material	AL6063
Weight	2.4 kg



PANEL BASE STATION Antenna for 2400 ISM/WLAN

Version 1.2

BSW24-06517-BFL

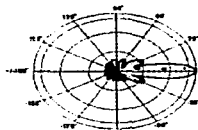
Electrical Specification

Frequency Range / MHz	2300- 2500MHz
Gain / dBi	17 dBi
VSWR Max.	1.3
Polarization	Linear vertical
3dB beamwidth / H-plane	65°
3dB beamwidth / E-plane	7°
Front to back ratio	25 dB
Down tilt	0°
Power handling	250W (CW) 1kW peak
Impedance	50 Ohms
Connector (Cable Length)	N type- female

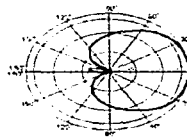


Environmental & Mechanical Characteristics

Survival wind speed	120 km/h
Temperature	-40° C to +80° C
Humidity	100% @ 25° C
Lightning protection	DC ground
Radiation color	Gray-White
Radiation material	PVC
Housing material	Al 6063
Weight	2.4 kg

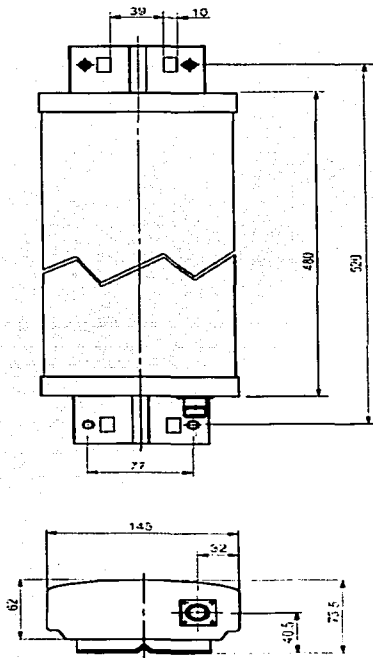


Vertical



Horizontal

Dimensions (mm)



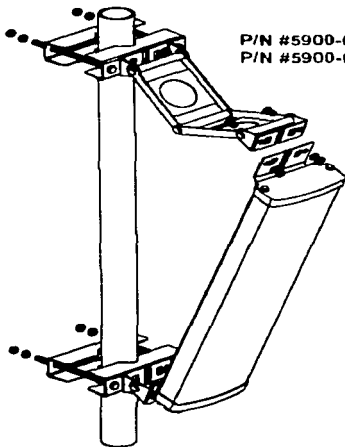
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

PANEL BASE STATION Antenna for 2400 ISM/WLAN

Version 1.2

Mounting Configuration

Use downtilt kit together
with 2 clamps



Clamps type



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Panel Base Station Antenna for IS-95 CDMA

Version 1.1

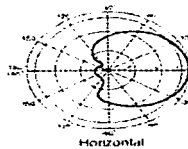
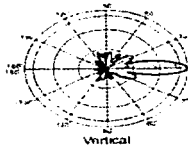
BSA08-06517-CFL / BFL

Electrical Specification

Frequency range	820 MHz - 900 MHz
Gain	17.0 dBi
VSWR	1.5 : 1 Max.
Polarization	Linear, vertical
HPBW / horizontal	65°
HPBW / vertical	8°
Front to Back ratio	25 dB
Down tilt	0°
Power handling	500 W (cw)
Impedance	50 Ohms
Connector	7/16 female or N female

Environmental & Mechanical Characteristics

Survival wind speed	200 km/hr
Temperature	-40° C to +80° C
Humidity	100% @ 25° C
Lightning protection	DC ground
Radome color	Gray-white
Radome material	ABS, UV resistant
Housing material	AL6063
Weight	11.4 kgw
Dimensions	1960 x 262 x 70 mm



Pico Cell Patch Antenna

Preliminary

PCD18-07008-BFL

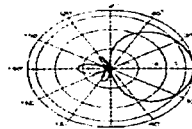


Electrical Specification

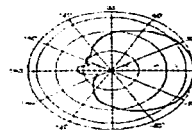
Frequency range	1710 MHz - 1880 MHz
Gain	8.0 dBi
VSWR	1.5 - 1 Max.
Polarization	Linear, vertical
HPBW / horizontal	70°
HPBW / vertical	65°
Front to back ratio	15 dB
Power handling	50 W (cw)
Impedance	50 Ohms
Connector	N- female
Intermodulation IM3 (2 x 43 dBm carrier)	-150dBc

Environmental & Mechanical Characteristics

Survival wind speed	216 km/hr
Temperature	-40°C to +80°C
Humidity	100% @ 25°C
Lightning protection	DC ground
Random color	Gray-white
Random material	ABS, UV resistant
Housing material	Al 6063
Weight	0.3 kgw
Dimension	120 x 120 x 43 mm



Vertical



Horizontal

GLOSARIO.

Absorción.- Es la capacidad de la atmósfera de la tierra para absorber la energía electromagnética de las señales de radiofrecuencia.

Ancho de Banda.- Es la diferencia entre dos frecuencias dadas. Rango de frecuencias ocupado por una señal.

Angulo de Azimuth.- Angulo de apuntamiento de una antena con respecto al Norte geográfico en el sentido de las manecillas del reloj.

Angulo de Elevación.- Angulo de apuntamiento de una antena con respecto al plano Horizontal.

Antena.- Es un sistema conductor metálico capaz de radiar y recibir ondas electromagnéticas; es la interfaz entre un transmisor y el espacio libre ó el espacio libre y un receptor, también acopla la energía de salida de un transmisor a la Atmósfera de la Tierra.

Antena Direccional.- Dispositivo que irradia o recibe energía de y hacia una dirección en especial.

Ancho del Haz.- Es el ángulo formado entre los puntos de media potencia (-3dB) sobre el lóbulo principal en un diagrama de radiación.

Arreglo Colineal de Dipolos.- Es un arreglo lineal de dipolos de media longitud de onda, separados una distancia igual a un cuarto de longitud de onda, con el objetivo de recibir e irradiar señales para que mantengan una fase constante.

Atenuación.- Término general para denotar una disminución en la magnitud de una señal en una transmisión de un punto a otro. Puede ser expresada como la relación entre la magnitud de entrada y la magnitud de salida, o en dB's.

Atenuación por Lluvia.- Pérdida o reducción de las características de potencia y polarización de las ondas radioeléctricas debido a la lluvia o nubes muy densas. Varía de región a región de acuerdo a la tasa de pluviosidad.

Back off.- Nivel de reducción de potencia e a la entrada de un amplificador para asegurar su operación en la región lineal, logrando con esto reducir al mínimo posible el ruido por intermodulación.

Banda de Frecuencias.- Conjunto de frecuencias comprendidas entre límites determinados.

Banda Ancha.- De manera general, es un equipo o sistema a través del cual se transmite información a muy alta velocidad. Un sistema de comunicación de banda ancha puede incluir la transmisión simultánea de varios servicios tales como: video, voz y datos.

Banda Base.- Banda de baja frecuencia que ocupan las señales antes de modular la señal portadora de transmisión.

Barrido del Sistema de Antenas.- Técnica gráfica utilizada para detectar por medio de analizador de espectros las posibles pérdidas de potencia en un sistema de comunicaciones.

Broadcast.- Transmisión unidireccional a múltiples puntos receptores. Radiodifusión.

Conductividad.- Propiedad de los materiales para transportar energía electromagnética.

Constante de Boltzmann.- Relación de la energía promedio de una molécula a la temperatura absoluta del medio. Su valor es $k = 1.38^{23}$ joules / °kelvin = 228.5992 dBJ / °K.

CDMA.- Acceso Múltiple por División de Código; también conocida como Acceso Múltiple de Espectro Disperso. Técnica de acceso a los sistemas PCS actuales mediante la cual la señal es transmitida dentro de un determinado ancho de banda en ciertos periodos de tiempo a través de un código de transformación.

Cobertura.- Región de Tierra que es alcanzada por la radiofrecuencia emitida por una Radio Base, también se le denomina área de servicio.

Cobertura Configurable.- Capacidad de la Radio Base o Sistema Celular para cambiar su área de cobertura.

dB.- Unidad estándar para expresar la relación entre dos parámetros utilizando logaritmos de base 10. Se utiliza debido a que facilita los cálculos cuando intervienen cantidades muy grandes y muy pequeñas.

dBc.- Decibeles referidos al nivel de potencia de la portadora.

dBi.- Decibeles referidos a la potencia radiada por una antena isotrópica.

dBm.- Decibeles referidos a la potencia expresada en miliwatts.

dBW.- Decibeles referidos a la potencia expresada en Watts.

dBd.- Decibeles referidos a la potencia radiada por un dipolo de media longitud de onda.

Densidad de Potencia de Ruido.- Es la potencia de ruido generada por unidad de ancho de banda o en un determinado ancho de banda de frecuencias.

Densidad de Potencia.- Es la cantidad de energía que cruza por una superficie determinada, se expresa en W/m^2 .

Diagrama de Radiación.- Es un diagrama polar ó expresión gráfica que representa la elevación y azimuth de las Intensidades tanto del Campo Eléctrico como del Campo Magnético y de la Densidad de Potencia en varias posiciones angulares en relación con una antena.

Difracción.- Propiedad óptica de las ondas de radio, la cual permite una redistribución de la energía electromagnética dentro de un frente de onda cuando éste pasa cerca del extremo de un objeto (montaña, edificio, vehículo, etc...).

Diversidad.- Son técnicas de acceso al sistema, es decir, sugiere más de una ruta de transmisión y recepción disponible; o en otras palabras es incrementar la confiabilidad del sistema incrementando su disponibilidad.

Eficiencia de la Antena.- Es una medida la cual nos dice en que grado la potencia de nuestra señal es radiada hacia la atmósfera terrestre o hacia una dirección en especial.

Figura de Mérito (G/T).- Es un indicador de la sensibilidad del sistema de recepción. Se define como la relación de la ganancia de la antena a la recepción con respecto a la temperatura de ruido del sistema a la recepción; sus unidades normalmente son dB/K .

Figura de Ruido.- Representada como la relación señal a ruido a la entrada de un sistema con respecto a la relación señal a ruido a la salida del mismo sistema. Es la medida de la degradación de la relación señal a ruido en un sistema de comunicaciones.

Frente de Onda.- Es una superficie de fase constante, la cual contiene una determinada Densidad de Potencia y a la vez es originado por una Antena.

Guía de Onda.- Dispositivo para conducción de ondas electromagnéticas.

GSM.- Global System Mobile, fue el primer estándar del sistema europeo celular digital, desarrollado en los años 90's, en cual es compatible con los actuales sistemas celulares del mundo, también estableció la modulación digital y la arquitectura de red de los sistemas celulares actuales.

Inclinación de la Antena o Downtil.- Es la inclinación física hacia abajo con la cual se logra un ajuste en la fase de las señales, es decir, el ángulo de inclinación debe de partir de un valor de potencia deseado en un punto específico dentro del diagrama de radiación.

Interferencia.- En comunicaciones es cuando existe otra señal en nuestra señal de interés o la señal original, dando origen a una distorsión en esta última.

IMT-2000.- International Mobile Telecommunications 2000, es el estándar universal para las telecomunicaciones inalámbricas, en especial para la tercera generación. Originalmente tenía el nombre de FPLMTS Future Public Land Mobile Telephone System, a mediados de 1995 se le cambió el nombre por IMT-2000.

Línea de Transmisión.- Es el medio físico (cable) que interconecta a una antena con un transmisor y un receptor con una antena.

Macro célula.- Sitio celular, el cual tiene una cobertura que comprende arriba de los 1000mts.

Micro célula.- Sitio celular, el cual tiene una cobertura que comprende abajo de los 1000mts, sirven para incrementar la capacidad de una macro célula, lo que se refiere a cobertura.

Multiplicación del Diagrama de Radiación.- Es el producto del diagrama individual de una fuente y el diagrama de un sistema de antenas de fuentes puntuales.

Ondas Electromagnéticas.- Son la esencia de la acción electromagnética a distancia, las cuales se propagan como ondas transversales, es decir, su Campo Magnético es transversal a su Campo Eléctrico, así mismo con respecto a la dirección de propagación.

Picocélula.- Sitios celulares muy pequeños, utilizados para proporcionar alta capacidad de transmisión y recepción dentro de edificios.

PIRE.- Potencia Isotrópica Radiada Efectiva, es el resultado de la combinación de la potencia del transmisor con la ganancia de la antena en una dirección determinada: desde la radio base hacia el móvil, se expresa en dBW.

Portadora.- Señal de frecuencia fija generalmente, que es modulada por la señal de información a fin de ser transportada.

Polarización.- Es la orientación del Campo Eléctrico E radiado desde una antena, por otro lado una antena puede estar polarizada en forma vertical, horizontal, elíptica y circular, las cuales son las más comunes.

PCS.- Personal Communications System, es la puerta de entrada para la tercera generación en sistemas inalámbricos, es decir, puede transportar varios tipos de información, tales como: voz, datos y video; dando servicio a regiones con alta y baja demanda de tráfico de aplicaciones a muy altas velocidades.

Radiar.- Producir o generar Potencia de forma uniforme y constante en una dirección y punto determinados.

Radiación Electromagnética ó Radiación.- Es la pérdida de energía electromagnética en el espacio libre.

Radio Base.- Estación fija en un sistema de radio móvil utilizada para la comunicación entre las unidades móviles (celulares, pagers, etc) y la red pública de telefonía. La Radio Base puede estar instalada en el centro o en el límite de una cobertura regional (célula),

está constituida en su forma más general por canales de radio o equipo de radio comunicación, generadores de potencia eléctrica, antenas receptoras y transmisoras montadas sobre una torre (estructura metálica).

Reflexión.- Propiedad óptica de las ondas electromagnéticas, la cual es cuando la onda incide sobre una determinada superficie o cuando choca con la interfaz de dos medios diferentes y toda o parte de la energía se refleja o entra al segundo medio.

Refracción.- Propiedad óptica de las ondas de radio, es el cambio de dirección de la onda al momento de pasar de un medio a otro, por ejemplo del aire al agua, con velocidades diferentes de propagación.

Relación Portadora a Densidad de Ruido (C/No).- Relación de potencia entre la portadora y la densidad de potencia de ruido en un ancho de banda de 1Hz, se expresa en dB/Hz.

Relación Portadora a Ruido (C/N).- Relación de la potencia de una portadora digital con respecto a la potencia de ruido en el ancho de banda que ocupa, se expresa en dB.

Relación Señal a Ruido.- Relación de la potencia de una señal analógica con respecto al nivel de ruido, se expresa en dB.

Rigidez Mecánica.- Propiedad mecánica tanto de las antenas como de la estructura donde son montadas, es decir, en que grado la estructura es resistente a fenómenos naturales, como por ejemplo: ráfagas de viento y sismos.

Ruido.- Señales indeseables en un circuito de comunicaciones, se expresa en dB.

Ruido Térmico.- Ruido producido por el movimiento aleatorio de los electrones tanto en un medio de transmisión como en los equipos de comunicación.

Ruido de Intermodulación.- Se presenta cuando una o más señales pasan a través de un dispositivo no lineal con niveles de entrada demasiado altos produciendo señales espurias.

Shelter.- Cuarto donde se encuentran los equipos de telecomunicaciones, baterías y equipo de respaldo entre otros.

VSWR.- Voltage Standing Wave Ratio, Relación de Ondas Estacionarias que se presentan en la línea de transmisión, es una medición del desacoplamiento entre la impedancia de carga Z_L (Antena) y la impedancia característica de la línea de transmisión Z_0 (transmisor y cable coaxial).

$4\pi sr = 4\pi (180 / \pi)^2 = 41253^{\circ 2}$, representa el ángulo sólido del haz subtendido dentro de una esfera hipotética, sus unidades son los grados cuadrados.

CONCLUSIONES.

Las comunicaciones inalámbricas o las comunicaciones que usan la radio frecuencia RF para enviar datos o voz a través de grandes distancias se están volviendo en la actualidad muy importantes; ya que en estos momentos, es decir, en los inicios del siglo XXI se vive una etapa de comercio e información electrónica, esto se observa en las constantes comunicaciones tanto terrestres como vía satélite, con el objetivo de confirmar algún embarque de Importación o Exportación, con ayuda de las comunicaciones vía Radio Frecuencia se reduce considerablemente el tiempo de enlace entre punto a punto ó punto a multipunto.

Los primeros Capítulos contenidos en este trabajo, es decir, Capítulo I y Capítulo II, comprendieron investigaciones importantes en su tiempo, estamos hablando de alrededor del los siglos XIX y XX, época cuando se formulan las primeras Hipótesis y Teorías tanto de Campos Electromagnéticos como de Propagación de Ondas a través del espacio libre o Atmósfera Terrestre. Y que en la actualidad son Teorías consolidadas.

En lo referente a los Campo Electromagnéticos se abordaron subtemas como los siguientes: bajo que condiciones existen y porqué se les da ese nombre, su comportamiento especialmente en el aire, dentro de éste contexto se observaron parámetros fundamentales e importantes que nos permiten tener un buen criterio para el diseño de un enlace.

Con la Propagación de Ondas, observamos y conocimos la definición básica de lo que significa el término 'Propagar ondas de radio', los efectos indirectos y directos que sufren estas ondas conforme se alejan de su fuente; por último se mencionaron las diversas técnicas fundamentales de cómo se pueden propagar las ondas y los nombres que reciben, por ejemplo: Ondas Directas, Ondas Reflejadas y Ondas de Superficie sólo por mencionar algunas.

En los dos últimos Capítulos, se abordaron contextos que comprenden en un sentido más estricto, el origen o fuente de los Campo Electromagnéticos

mencionados casi al principio de esta Conclusión; ya que la fuente de éstos es un dispositivo ideado por Hertz y Marconi principalmente el cual se le dio el nombre de Antena, el cual gracias a sus características puede irradiar o recibir Energía Electromagnética. Ya que tocamos este dispositivo, también se analizaron parámetros y definiciones propias de este último tales como: Diagrama de Radiación, Impedancia de Entrada, Polarización y Ancho de Banda, por mencionar algunos; los cuales son de suma importancia pues gracias a estos podemos diseñar y fabricar diversas antenas para nuestras propias necesidades de comunicación.

En el último Capítulo se estudió una aplicación en particular del diseño de una Antena, exactamente el nombre apropiado del dispositivo se llama 'Panel de Antenas', el cual es un diseño especial para las comunicaciones inalámbricas que trabajan alrededor de los 2GHz de frecuencia este ancho de banda se divide tanto para transmisión como recepción. Aquí también se abordó un posible método a seguir para el diseño y la construcción de este Panel, como por ejemplo: se presentó y se estudió el Arreglo de Dipolos y el uso de Reflectores para lograr una mayor Directividad con una máxima cobertura sobre el plano Horizontal. Además se presentaron pequeñas situaciones de enlace, en particular entre la antena de la Radio Base y el móvil, es decir, se estudiaron los parámetros que se deben tomar en cuenta para el diseño de un enlace, como por ejemplo: las pérdidas de trayectoria, pérdidas originadas por el medio ambiente, pérdidas sobre circuitería y líneas de transmisión propias tanto del receptor como del transmisor.

Para finalizar se presentó una serie de consideraciones para la instalación de una Radio Base, así como la elección de su cobertura, es decir, si se instala una macrocélula de 3 o 6 sectores, normas de mantenimiento, expansión y actualización de equipo. Por último se presentaron algunas hojas técnicas de las especificaciones de algunos Panel de Antenas, obviamente para diferentes clases de tráfico y tipo de red inalámbrica, como por ejemplo: IS-95CDMA, PCS..., IMT2000..., entre otras.

Sin embargo como mencioné al principio de esta Conclusión se está viviendo una época de desarrollo tecnológico la cual crece a un ritmo impresionante, por lo que el trabajo aquí presentado es una aplicación que podría yo llamarle básica y transitoria. Además cada día vemos una íntima relación con la Informática, ¿qué quiero decir con esto?, lo que quiero decir es que existe un incremento continuo de volumen de información, lo cual nos origina consumir un mayor ancho de banda para poder transmitir y recibir, datos tales como: gráficas, fotografías, estados de cuenta de muchos años, video conferencias, etcétera.

Bueno pero por otro lado lo que me reconforta es que mi generación y las que vienen lograrán aportar ideas y soluciones para los problemas como los mencionados arriba (Ancho de Banda) que se puedan presentar y, ¿por qué no? También diseñar e implementar nuevas tecnologías y redes de telecomunicaciones.

Para una mayor información o consulta posterior y tendencias de las comunicaciones inalámbricas, en el apartado referente a la Bibliografía se proponen diversos Libros y Sitios Web para estudiar y entender los temas aquí expuestos.

BIBLIOGRAFIA.

- 'Teoría Electromagnética'. William Hayt, Jr. McGraw-Hill 5ta Edición.
- 'Electromagnetismo' Krauss, J. D. McGraw-Hill 3ra Edición.
- 'Electromagnetismo Conceptos y Aplicaciones' Stanley V. Mashall
Richard E. DuBroff Gabriel G. Skitek
Prentce-Hall 4ta Edición.
- 'Radiación Electromagnética y Antenas' Jorge Roberto sosa Pedroza. LIMUSA
- 'Wireless Network Communications: Concepts, Technology and Implementation' Regis J. Bates McGraw-Hill
- 'Wireless and Personal Communications Systems' Vijak, K. Garg
Joseph, E. Wilkes
Prentice-Hall
- 'Wireless Access and the Local Telephone Network' George Calhoun
Artech House , Boston & London
- 'Smart Antenna Systems and Wireless LAN's'
Garret T okamoto
Kluwer Academic Publishers
- 'Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems' Simon R. Saunders
Ed. Wiley & Sons Inc.
- 'Mobile Cellular Telecommunications: Analog and Digital Systems' William C. Y. Lee
McGraw-Hill
- 'Wireless Communication Principlies and Practice' Theodore S. Rappaport Prentice-
Hall

'Antenna and Radiowave Propagation' Robert e. Collin

International Student Edition

'Mobile Radio Signal Correlation Vs Antenna Height and Space'

William C. Y. Lee.

IEEE

'Mobile Communications Design Fundamentals'

William C. Y. Lee

John Wiley & Sons Inc.

'Antenna Theory Analysis and Design'

Constantine A. Balanis

John Wiley & Sons, Inc.

'Practical Antenna HandBook'

Joseph J. Carr

TAB Books.

'Radio Frecuency Transmission Systems Design and Operation'

Jerry C. Whitaker

McGraw Hill

'Antenna Theory and Design'

Warren L. Stutzman

Gary A. Thiele.

John Wiley & Sons, Inc.

Web Sites:

<http://www.smartant.com/>

<http://www.hdcom.com/>

<http://www.nortelnetworks.com/>

<http://www.att.com/>

<http://www.axtel.com.mx>

<http://www.ieee.org/>

<http://www.telcel.com/>

<http://www.telco.com/>