

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.

Facultad de Ingeniería Eléctrica.

Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones.

TRABAJO DE DIPLOMA



Antenas para comunicaciones móviles.

Autores: Yuniesky Zamora Barrios.

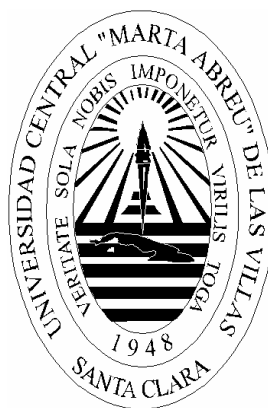
Isuán González Ramirez.

Tutor: MSc. David Beltrán Casanova.

Santa Clara

2004

“Año del 45 Aniversario del Triunfo de la Revolución”.



Hacemos constar que el presente trabajo fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas como parte de la culminación de los estudios de la especialidad de Telecomunicaciones y Electrónica autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma de los Autores.

Los abajo firmantes, certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Tutor.

Firma del Jefe de Dpto.
Donde se defiende el trabajo.

Firma del Responsable de
Información Científico- Técnica.

Pensamiento

*Es tan vana la esperanza de que se llegará
sin trabajo y sin molestia a la posesión del
saber y la experiencia, cuya unión produce
la sabiduría, como contar con una cosecha
donde no se ha sembrado ningún grano.*

Benjamín Franklin.

Agradecimientos

A nuestros padres que nos han apoyado de forma incondicional y han sabido guiarnos por el buen camino.

A nuestro tutor que sin su ayuda no hubiésemos dado el último paso que nos convertirá en profesionales.

A todos los compañeros del aula que de una forma u otra nos han brindado su ayuda, en especial a la "banda".

En fin al resto de nuestros familiares, profesores, amigos y personas buenas que nos han animado y brindado confianza.

Dedicatoria

*Dedicamos este trabajo a nuestros
padres y personas queridas
que nos han apoyado
incondicionalmente.*

Resumen

RESUMEN

En el presente trabajo de diploma se realiza una revisión bibliográfica que brinda las principales características de varios tipos de antenas que, en la actualidad, son usadas en los diferentes sistemas de comunicaciones móviles, así como los requerimientos que son necesarios para su implantación en dichos sistemas. Se describen los diseños de dos tipos de antenas (helicoidal y colineal), además se aborda una tecnología novedosa (antenas inteligentes) que tiene actualmente gran acierto en el mundo por sus ventajas y por último se presenta un catálogo que contiene numerosas antenas para comunicaciones móviles.

Índice

INTRODUCCION.....	1
Capítulo 1. Sistema de antenas móviles terrestres.....	3
1.1 Introducción.....	3
1.2 Problemas de la propagación.....	4
1.2.1 Alturas de las antenas y condiciones de propagación.....	4
1.2.2 Tendencias actuales en la investigación de la propagación.....	5
1.3 Técnicas de antenas en la estación base.....	5
1.3.1 Requerimientos de sistemas de antenas.....	5
1.3.2 Tipos de antenas.....	6
1.4 Diseño de antena de haz conformado.....	7
1.4.1 Distancia de reutilización de la frecuencia.....	7
1.4.2 Haz sectorial.....	8
1.4.3 Conformación del haz en el plano vertical.....	9
1.4.4 Haz conformado con un nivel de lóbulo lateral suprimido.....	10
1.5 Diversidad.....	10
1.5.1 Configuración de las antenas de diversidad en la estación base.....	10
1.5.2 Espaciamiento horizontal para la diversidad.....	11
1.5.3 Espaciamiento vertical para la diversidad.....	11
1.6 Técnicas de antenas de estación móvil.....	11
1.6.1 Requerimientos del sistema y funcionamiento de la antena.....	11
1.6.2 Tipos de antenas.....	12
1.7 Antenas vehiculares de frecuencia dual.....	13
1.8 Antenas de sistemas compatibles.....	14
1.9 Antenas para teléfonos portátiles.....	14
1.9.1 Técnicas y consideraciones de los diseños de antenas usadas en teléfonos portátiles.....	15
1.9.2 Tipos de antenas.....	16
1.9.3 Diversidad de antenas.....	17
1.10 Sistemas de antenas para teléfonos portátiles.....	18
1.11 Sistemas portátiles manuales.....	19
<i>Capítulo 2.....</i>	<i>20</i>
Capítulo 2. Diseño de antenas.....	20
2.1 Diseño de una antena helicoidal.....	20
2.1.1 Introducción.....	20
2.1.2 Aplicaciones.....	20
2.1.3 Geometría de la antena helicoidal.....	20
2.1.4 Patrón de radiación.....	23
2.1.5 Ancho del lóbulo entre los puntos de mitad de potencia.....	24
2.1.6 Ganancia.....	24
2.1.7 Frecuencia.....	25
2.1.8 Impedancia de entrada.....	25
2.1.9 Ejemplo resuelto.....	26
2.2 Diseño de una antena colineal coaxial.....	29
2.2.1 Requerimientos para el diseño.....	29
2.2.2 Cálculos para el diseño.....	31
2.2.3 Preparación del coaxial.....	34
Capítulo 3. Antenas inteligentes.....	36

3.1	Introducción.....	36
3.2	Limitaciones inherentes a los sistemas móviles como GSM y UMTS.....	36
3.2.1	El desvanecimiento por multitrayecto.....	36
3.2.2	La interferencia cocanal.....	37
3.2.3	La dispersión temporal de la señal recibida.....	37
3.3	Definición de antena inteligente.....	37
3.4	Ventajas y desventajas de los sistemas de antenas inteligentes.....	38
3.4.1	Incremento de la zona de cobertura.....	38
3.4.2	Reducción de la potencia transmitida.....	38
3.4.3	Reducción de la propagación multitrayecto.....	38
3.4.4	Reducción del nivel de interferencia.....	39
3.4.5	Mejora de la seguridad.....	39
3.4.6	Introducción de nuevos servicios.....	39
3.4.7	Mayor complejidad de los transceptores.....	39
3.4.8	Mayor complejidad de los procedimientos de gestión.....	40
3.4.9	Cambios en los métodos de planificación.....	40
3.5	Implementación de un sistema de antenas inteligentes.....	40
3.5.1	Haz conmutado.....	40
3.5.2	Haz de seguimiento.....	41
3.5.3	Haz adaptativo.....	41
3.6	Modo de introducción de las antenas inteligentes en una red de comunicaciones móviles.....	42
3.6.1	Receptor de alta sensibilidad (HSR).....	42
3.6.2	Rechazo de interferencias por filtrado espacial (SFIR).....	43
3.6.3	Acceso múltiple por división espacial (SDMA).....	43
3.7	Algoritmos de conformación de haz.....	43
3.8	Cálculo del vector de peso.....	45
3.8.1	Técnicas con referencia temporal.....	45
3.8.2	Técnicas con referencia espacial.....	45
3.8.3	Técnicas con referencia ciega.....	45
3.9	Algoritmos híbridos.....	46
3.9.1	Procesado haz-espacio.....	46
3.9.2	Conformador de banda ancha.....	46
3.9.3	Conformador en el dominio de la frecuencia.....	46
3.9.4	Conformador digital.....	46
3.9.5	Método de la autoestructura.....	47
3.10	Canales involucrados.....	48
3.11	Descripción de una posible implementación de un sistema de antenas inteligentes a UMTS.....	48
3.12	Pruebas realizadas.....	49
3.13	Conclusiones y líneas futuras.....	50
	CONCLUSIONES.....	521
	RECOMENDACIONES.....	532
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53
	GLOSARIO DE ACRÓNIMOS.....	56
	ANEXO 1.....	59

ANEXO 2	64
ANEXO 3	67
ANEXO 4	71

Introducción

INTRODUCCION

Cuando Hertz realizó sus primeros estudios sobre la transmisión inalámbrica de ondas electromagnéticas, comenzó a utilizar las antenas. Pero estas, tal y como las conocemos hoy, se originaron en los experimentos de Marconi y Popov, que desarrollaron las primeras tecnologías sobre este importante aspecto de las radiocomunicaciones.

Durante los últimos años se ha experimentado un incremento espectacular en la investigación, desarrollo e implantación de sistemas y redes de acceso fijo inalámbrico de banda ancha o LMDS. El factor de éxito de estas redes reside principalmente en que son soluciones eficientes en costo y con un alto grado de flexibilidad en su despliegue. En la actualidad se están implantando redes con estas características en todo el mundo, la oferta de equipos comerciales es bastante amplia y se están proporcionando servicios de voz, vídeo y datos a través de dichas redes, lo que ha traído consigo un crecimiento continuo del número de usuarios en los sistemas de comunicaciones móviles, provocando a su vez una necesidad cada vez mayor de incrementar su capacidad. El surgimiento y establecimiento de estas nuevas y novedosas tecnologías, ha entrañado la necesidad de diseñar nuevos y variados tipos de antenas capaces de cumplir con los requerimientos necesarios que imponen estos sistemas para su adecuado funcionamiento.

En la actualidad muchas de estas antenas no están incluidas en nuestros planes de estudio por varias razones donde una de ellas es la carencia de información que permita abordarlas en los cursos de pregrado. A pesar del profundo análisis bibliográfico realizado y la búsqueda se han logrado la ubicación de una gran variedad de antenas pero se adolece en buena medida de los métodos de diseño que se emplean en cada caso, lo que representa la principal limitación de este trabajo.

En los objetivos de este trabajo están realizar un estudio de los diferentes tipos de antenas que se utilizan en las comunicaciones móviles, analizar los métodos de diseño y la forma en que se pueden implementar e introducir en los diferentes sistemas, así como elaborar un material que explique las características de cada una de las antenas seleccionadas y exponer algunos métodos de diseño, siempre que sea posible.

Con el fin de poder dar un correcto cumplimiento a los objetivos propuestos para este trabajo, se han planteado un grupo de tareas técnicas y de investigación. Primero búsqueda y análisis bibliográfico para el estudio general de las antenas que se utilizan en las comunicaciones móviles. Segundo elaborar un material que explique las principales características, métodos de diseño (siempre que sea posible), figuras ilustrativas de las antenas y ejemplos prácticos.

El presente trabajo se ha estructurado en tres capítulos donde se abordan las siguientes temáticas:

El capítulo 1 se dedica al estudio de las características y requerimientos para la implantación de algunos de los distintos tipos de antenas que se utilizan en la actualidad en los sistemas de comunicaciones móviles terrestres.

En el capítulo 2 se realiza el diseño práctico de dos tipos de antenas (helicoidal y colineal) que actualmente son usadas en los sistemas de comunicaciones móviles.

En el capítulo 3 se pretende dar una visión general acerca del estado en que se encuentra la tecnología de antenas inteligentes; abordando sus características generales, algoritmos de conformación del haz y los distintos tipos y formas de implementarlas.

Como parte de los materiales que se anexan aparece un catálogo que contiene varios tipos de antenas que en la actualidad tiene un gran uso en las comunicaciones móviles.

Capítulo 1

Capítulo 1. Sistema de antenas móviles terrestres.

1.1 Introducción.

Los sistemas de comunicaciones móviles terrestres emplean estaciones móviles y estaciones bases. En las que son empleadas diferentes tipos de antenas, que además se diferencian en cuanto a su criterio de diseño. En la figura 1 del Anexo 1 se muestran los aspectos fundamentales que han de considerarse en el diseño de la antena de una estación base. Aunque el diseño de antenas en el sentido más estricto significa un diseño eléctrico, en realidad incluye un área más amplia, por lo que es importante analizar las especificaciones de hardware de las antenas para los requerimientos del sistema. A fin de determinar las especificaciones de hardware es necesario una representación y evaluación que compare las características eléctricas y mecánicas y que permita analizar la relación entre el desempeño y el costo de la antena. Las consideraciones de costo y desempeño son algunas veces el primer paso mientras que la determinación del diseño eléctrico y mecánico son el segundo paso.

En el diseño de antenas prácticas, es importante estimar como será instalada la antena después de su construcción, ya que el precio de instalación puede ser en algunos casos mayor que el costo de una antena en si, téngase en cuenta el costo de instalación de la antena de una estación base en el caso de antenas vehiculares. Por esta razón es importante considerar no solo la reducción del costo de producción de la antena, sino también la creación de antenas cuyo diseño sea de fácil instalación. En este sentido las antenas *on-glass* son muy superiores por la facilidad de su montaje.

En la figura 2 del Anexo 1 se muestran los aspectos fundamentales que han de ser considerados en el diseño de antenas de estaciones móviles. Las antenas de las estaciones móviles son clasificadas en dos categorías:

- antenas para montajes móviles (vehículos).
- antenas para montajes en los equipos de radio portátil.

Las antenas para estaciones móviles son más independiente de los parámetros del sistema que las antenas de estaciones bases y deben ser diseñadas para un manejo fácil y a conveniencia del cliente.

Debido a que las antenas de comunicaciones móviles no son diseñadas para operar en condiciones de espacio libre, pero si en ambientes multitrayectos, su ganancia o patrones de radiación deben ser específicos para estos tipos de sistemas, por lo tanto, la ganancia de la antena o los modelos de radiación especificados para el diseño del sistema deben hacerse

teniendo en cuenta las condiciones medio ambientales. Por consiguiente no es, necesariamente, significativo para una antena tener un buen funcionamiento en el espacio libre si su desempeño sufre una degradación en entornos multitrayecto [1], [2], [3].

1.2 Problemas de la propagación.

1.2.1 Alturas de las antenas y condiciones de propagación.

La propagación en las comunicaciones móviles ocurre dentro de una región de difracción y no es una propagación en el espacio libre. Las pérdidas por propagación en espacio libre son simples y proporcionales al cuadrado de la distancia, pero en las comunicaciones móviles depende de varios factores, tales como las condiciones de propagación, la altura de las antenas y la frecuencia. Es importante definir claramente tales términos para poder discutir los problemas de la propagación.

La altura de una antena en la estación base (ver figura 3 del Anexo 1), h_{le} es definida como:

$$h_{le} = h_{ls} - h_{ga}$$

Donde:

h_{ls} : altura en la antena de la estación base con respecto al nivel del mar.

h_{ga} : altura promedio del perfil del terreno respecto al nivel del mar en un área de 3 a 15 km alrededor de la estación base .

La altura de la antena de la estación móvil queda definida como la altura de la tierra en el punto donde se encuentra ubicado el móvil.

Las condiciones de propagación en las comunicaciones móviles son muy complejas, pero pueden ser categorizadas en tres tipos:

- Zona rural: existen pocos obstáculos en el trayecto de propagación. Se consideran condiciones de espacio libre en un área de 300 a 400 m entre la estación base y la móvil.
- Zona suburbanas: existen algunos obstáculos alrededor de la estación móvil pero no son muy densos, áreas de árboles y casas pequeñas.
- Zona urbana: existen muchas construcciones y otros tipos de estructuras muy altas, se habla de área cerrada, un área densamente ocupada por grandes estructuras y árboles altos [1].

1.2.2 Tendencias actuales en la investigación de la propagación.

Los sistemas de comunicaciones móviles terrestre avanzan rápidamente en capacidad y calidad mientras el mundo avanza hacia la digitalización. Los estudios de propagación en sistemas móviles han contribuido al desarrollo de los mismos, lo que ha traído consigo un realce de los sistemas actuales, contribuyendo a la aparición de sistemas íntegramente nuevos de comunicaciones móviles. Con el objetivo de aumentar el número de clientes se han desarrollado métodos para incrementar el número de canales de radio y lograr una utilización más efectiva del espectro de frecuencia. Para incrementar el número de canales de radio nuevas bandas de frecuencia en la región de 1.5 a 3.0 GHz han sido asignadas a los servicios de comunicaciones móviles.

Para una utilización más efectiva del espectro de frecuencia las ondas de radio necesitan ser confinadas en áreas pequeñas. Esto se puede lograr a través de la inclinación del haz de la antena de la estación base y el uso de la zona sectorizada. Los efectos de estas técnicas se aclararon y aplicaron en el sistema actual de teléfonos en automóviles en áreas urbanas. Este sistema emplea una inclinación del haz de 2 a 5°, celdas con un radio de 1.5 km y zonas sectorizadas a 120°. La diversidad de recepción la cual es efectiva para disminuir el ruido térmico y la interferencia cocanal fue investigada, y los coeficientes de correlación entre las antenas tanto para la diversidad espacial como de polarización se obtuvieron teórica y experimentalmente, estos sistemas emplean las técnicas de diversidad en las estaciones bases y en las móviles.

1.3 Técnicas de antenas en la estación base.

1.3.1 Requerimientos de sistemas de antenas.

Para que la estación base se comunique con las estaciones móviles que se localizan en el área de servicio, la energía de la onda de radio se debe radiar uniformemente dentro del área. Además la ganancia de la antena debe ser tan alta como sea posible. Partiendo de que la amplitud del área de servicio ya está especificada no se puede aumentar la ganancia de la antena estrechando el haz en el plano horizontal. Por lo tanto se hace necesario estrechar el haz de la antena en el plano vertical para aumentar su ganancia; para lograr esto es necesario la utilización de antenas direccionales dispuestas verticalmente. Los sistemas celulares normales utilizan antenas con una ganancia de 7 a 15 dBi en las estaciones base. Para que la antena de la estación base se comunique simultáneamente con varias estaciones móviles se deben operar varios canales, lo cual requiere antenas de un determinado ancho de banda y funciones para

combinar los canales. Si la antena es compartida por varios sistemas (ejemplo un teléfono móvil terrestre analógico y un teléfono móvil terrestre digital) se requiere en este caso de antenas con anchos de bandas mayores. Para ser compatible con las regulaciones existentes en cuanto a utilización del espectro de frecuencias, el ancho de banda para un sistema móvil terrestre de 800 MHz varía de 810 a 960 MHz. Así para cubrir este ancho de banda con una antena se necesita un 17% de ancho de banda. Cuando la antena transmite y recibe, la intermodulación pasiva aparece y esto provoca un aumento de la interferencia. Aunque los sistemas celulares tienen sus ventajas en relación a la reutilización de frecuencia, esta eficiencia depende significativamente del patrón de radiación de la antena de estación base.

Una de las características más comunes de las comunicaciones móviles es que la estación base y la móvil, no se encuentran en la generalidad de los casos dentro de la línea de la visual, lo cual hace que el ambiente de propagación sea complejo, dado por los desvanecimientos que constantemente ocurren los cuales hacen que los niveles de señal fluctúen entre 10 dB o más. Una tecnología para evitar el desvanecimiento es la recepción por diversidad la que ha sido estudiada desde los años 60 y su efectividad ha sido comprobada teóricamente y prácticamente [1].

1.3.2 Tipos de antenas.

Las configuraciones de antenas de estación base depende de la forma y el tamaño del área de servicio, del número de celdas y del número de canales. En un sistema de comunicación móvil privado cuya área de servicio es pequeña la antena de estación base es tan pequeña como la antena vehicular utilizada en los sistemas de teléfono de automóviles. Si el área de servicio está limitada dentro de un ángulo restringido en el plano horizontal, se emplea en ocasiones una antena reflector plano esquinado.

Cuando el área de servicio es amplia como en un sistema telefónico marítimo o uno aeronáutico, arreglos lineales de antenas son empleados, los cuales tienen gran directividad en el plano vertical, en la mayoría de los casos son uniformemente excitadas.

En la fase inicial del desarrollo del sistema celular la longitud de la antena de estación base se determinaba por la ganancia requerida. Para lograr una ganancia mayor era usual que una antena direccional se excitará uniformemente. Sin embargo con el objetivo de reutilizar la frecuencia con mayor eficiencia las celdas deben subdividirse. Dada esta situación es más importante para la antena de estación base contar con una elevada relación entre las potencias de señal deseada y no deseada que tener una alta ganancia de la antena. Experimentalmente se

ha demostrado que inclinando el haz principal tanto mecánica como eléctricamente la interferencia cocanal puede reducirse aproximadamente 10 dB, se reconoce que la inclinación del haz es esencial para potenciar la utilización de la frecuencia. La supresión de los lóbulos laterales adyacentes al haz principal, lo cual se logra sintetizando los patrones direccionales de la antena en forma adecuada, es también efectivo para disminuir la distancia de reutilización de la frecuencia.

Es muy común la utilización de la diversidad espacial en la cual dos antenas se separan de 5 a 10 longitudes de onda. Los diferentes tipos de esquemas de diversidad, tales como la diversidad de patrón o la diversidad de polarización se han estado implementando en las antenas de las estaciones bases y son utilizadas en sistemas comerciales. La figura 4 del Anexo 1 categoriza los distintos tipos de las antenas de estación base desde el punto de vista de sus funciones y características.

1.4 Diseño de antena de haz conformado.

Las técnicas de conformación del haz facilitan en gran medida la reutilización de las frecuencias. La antena de una estación base en un sistema celular debe radiar energía al nivel más bajo posible hacia la celda donde se utiliza la misma frecuencia. De forma recíproca se requiere iluminar el área de servicio al nivel más alto que sea posible. Existen dos tipos de antenas de haz conformado: una le da forma al patrón de radiación en el plano horizontal por lo que se necesita un haz de sector y la otra le da forma al patrón en el plano vertical por lo que se necesita un haz cosecante. La inclinación del haz principal no es realmente una técnica del haz controlado pero partiendo que el propósito es el mismo, la configuración simplificada de la antena y las mediciones realizadas de su funcionamiento serán presentadas. Primero se explica la relación entre la distancia de reutilización de la frecuencia y el patrón de radiación de la antena. Segundo se describe el diseño de una antena de haz sectorial y por último se describe el diseño de una antena de haz conformado en el plano vertical para un arreglo lineal de antena direccional. Esta sección limita la discusión acerca del diseño de haz conformado para aplicaciones específicas en los sistemas móviles celulares.

1.4.1 Distancia de reutilización de la frecuencia.

Del sistema que se muestra en la figura 5 del Anexo 1 se deriva:

$$N = 1/3(D/R)^2$$

Donde:

N: número de celdas.

R: radio de la celda.

D: distancia centro a centro entre celdas adyacentes (distancia de reutilización de frecuencia).

El valor peor de la relación portadora a interferencia (CIR) aparece en el borde de la celda y se da por:

$$CIR = -\alpha 10 \log\left(\frac{R}{D-R}\right)$$

Donde:

α : es la constante de atenuación.

En la segunda ecuación no se incluye la diferencia del patrón de la antena entre la dirección de la onda deseada (θ_d, φ_d) y la dirección de la onda de interferencia (θ_i, φ_i) que se expresa en dB.

$$CIR = -\alpha 10 \log\left\{\left(\frac{R}{D-R}\right)\right\} + \left(\frac{C}{I}\right)_{ant}$$

$$\left(\frac{C}{I}\right)_{ant} = P(\theta_d, \varphi_d) / P(\theta_i, \varphi_i)$$

Si la dirección de interferencia se acerca a la dirección deseada (N se hace pequeña) las líneas de interferencia pueden existir en el haz principal así como también en la dirección deseada. Para aumentar (C/I) de la antena en este caso, es necesario aumentar la longitud de la antena o estrechar la amplitud del haz principal con técnicas de conformación del haz, sin incrementar la longitud de la antena.

1.4.2 Haz sectorial.

El patrón horizontal de la antena de estación base es casi siempre omnidireccional sin embargo un haz sectorial puede cubrir un área de servicio de forma efectiva si el área de servicio no es circular. Los sistemas celulares logran menores distancias de reutilización de la frecuencia con

un arreglo sectorial que con un arreglo de zona circular. De ahí que los arreglos sectoriales sean utilizados en los actuales sistemas telefónicos de automóviles.

Una antena de haz sectorial típica es la antena reflector plano esquinado. Esta antena tiene la ventaja que la amplitud del haz puede ajustarse controlando la abertura del ángulo del reflector, además logra una alta directividad al estrechar el haz principal en el plano vertical y puede radiar un haz conformado controlando el coeficiente de excitación.

Los haces sectoriales con amplitud de haz entre 60° y 180° pueden obtenerse disponiendo del ángulo de abertura desde 60° a 270° . Cuando el ángulo de abertura es de 180° la amplitud del haz es aproximadamente 120° . Para obtener un haz de sectorial con una amplitud mayor que 120° se necesita un reflector esquinado con un ángulo de abertura mayor que 180° . Si dos antenas de haces sectoriales de 180° de amplitud de haz se combinan con un espaciamiento adecuado generalmente mayor que 6λ se obtiene un patrón omnidireccional. En el caso de las antenas de haz sectorial se ha reportado un método de diseño de frecuencia dual. Para realizar una antena de frecuencia dual es necesario preparar un radiador primario de frecuencia dual esto es posible colocando un dipolo con un elemento parásito dispuesto cercanamente. Esa antena tiene la ventaja de ser muy compacta. Cuando se utiliza el radiador primario de la figura 6 del Anexo 1 se obtienen haces sectoriales de igual amplitud para las frecuencias f_1 y f_2 [4].

1.4.3 Conformación del haz en el plano vertical.

Si la pérdida de la trayectoria es mayor que la que ocurre en un espacio libre como en el caso de los sistemas de comunicaciones móviles, el significado de un haz conformado específicamente en los celulares puede ser mayor en la supresión de la radiación hacia la celda donde la misma frecuencia es reutilizada que para iluminar la misma zona uniformemente.

Si las frecuencias son reutilizadas y las celdas están dispuestas cercanas unas a otras una parte del haz principal ilumina la celda que reutiliza la frecuencia por lo tanto pudiera ser efectivo inclinar el haz principal hacia abajo para suprimir la interferencia. Aún cuando el nivel de señal recibido dentro de la misma zona se debilita al reducir la amplitud del haz principal para mantener la longitud de la antena es posible incrementar $(C/I)_{ant}$. La idea principal de la técnica de la inclinación del haz es inclinar el haz principal para disminuir el nivel de señal interferente en la dirección de la celda donde se reutiliza la frecuencia y aumentar la relación $(C/I)_{ant}$. En este caso el nivel de portadora disminuye en el borde de la zona, sin embargo el nivel de interferencia disminuye más que el nivel de portadora así el total $(C/I)_{ant}$ aumenta. Esto es una ventaja desde

el punto de vista del diseño del sistema y esta técnica es utilizada en la mayoría de los sistemas celulares del mundo [4].

1.4.4 Haz conformado con un nivel de lóbulo lateral suprimido.

La supresión del lóbulo lateral debe realizarse con cuidado partiendo de que está localizado cercano a la dirección del haz principal y el nivel del lóbulo lateral está muy relacionado a la amplitud del haz principal. Kijima obtuvo un haz principal, el 30% más estrecho que uno excitado uniformemente suprimiendo solamente varios lóbulos laterales cerca del haz principal y disponiendo los otros lóbulos laterales a un nivel comparativamente alto. Una antena con este patrón de radiación puede aumentar el nivel en el borde de la zona en aproximadamente 1.5 dB si el nivel de interferencia es constante.

1.5 Diversidad.

1.5.1 Configuración de las antenas de diversidad en la estación base.

Las antenas de diversidad se disponen con incrementos angulares de 120° en algunos países y en otros los sistemas se componen de 6 antenas sectoriales con amplitud de haz de 3 dB y 60° y el puerto con mayor nivel de recepción se selecciona para cubrir la línea límite de la zona .

Se emplean tres tipos de configuraciones de diversidad:

- Diversidad de espacio.
- Diversidad de patrón.
- Diversidad de polarización.

La que más se utiliza es la de diversidad de espacio.

En la figura 7 del Anexo 1 se muestra un esquema de diversidad. Esta configuración ubica las dos antenas a 90° una de otra. Mientras que en las antenas de haz de sector de 180° para sintetizar un patrón omnidireccional, que se ubica en espacios apartes, los centros de las antenas omnidireccionales coinciden con el centro de la plataforma y el espacio entre las dos antenas es cero. Cuando el espacio de una antena de haz sectorial de 180° es de 6λ , las mediciones han demostrado que el coeficiente de correlación entre las dos antenas es menor que 0.2 en áreas urbanas. La figura 8 del Anexo1 muestra un ejemplo de una antena que emplea la diversidad de polarización, aparenta una antena simple y tiene la ventaja de poseer un volumen pequeño. El elemento de esta antena es una antena de microcinta de disco circular con dos puertos de alimentación para la recepción de diversidad, los cuales son ortogonales. El coeficiente de correlación es suficientemente bajo, 0.2 en zonas urbanas. No obstante como resultado de esta

onda incidente mayormente polarizada verticalmente la potencia recibida en cada puerto difiere considerablemente, el mejoramiento de la potencia recibida no es tan grande como el que se logra en otros esquemas de diversidad, se utiliza solamente donde es limitado el espacio de instalación [1].

1.5.2 Espaciamiento horizontal para la diversidad.

La relación entre el espacio de una antena y el coeficiente de correlación en áreas urbanas y suburbanas, es de la siguiente forma. Las alturas de las antenas son 120 m, 45 m y 65 m. De aquí que el espacio entre las antenas debe ser más grande que 5λ en áreas urbanas para lograr un coeficiente menor que 0.6, mientras que más de 20λ se requiere para áreas suburbanas, se entiende por demás que el coeficiente de correlación aumenta con la altura de la antena.

1.5.3 Espaciamiento vertical para la diversidad.

La diversidad espacial vertical no se ha empleado aún en las estaciones bases de los sistemas de comunicaciones móviles, es típico su empleo en las antenas de estaciones móviles. Sin embargo un coeficiente de correlación suficientemente bajo se puede obtener cuando la altura de la antena está por encima de la altura promedio de las edificaciones existentes. Esto puede ser práctico en un área urbana.

1.6 Técnicas de antenas de estación móvil.

Las antenas móviles deben diseñarse para reducir la potencia de transmisión del equipo de radio móvil satisfaciendo a la vez la calidad de servicio requerido ejemplo (calidad de escucha, cobertura de servicio). Un diseño óptimo permite obtener pequeñas unidades de teléfonos móviles que a la vez son económicos.

1.6.1 Requerimientos del sistema y funcionamiento de la antena.

La primera generación de sistemas de radios móviles celulares fueron sistemas analógicos que utilizaron bandas de 400 MHz o de 800-900 MHz. Los requerimientos para las antenas incluyen la frecuencia de operación, ancho de banda, directividad, características del patrón, polarización y la base de recepción de diversidad. Los requerimientos de operación de frecuencia, ancho de banda, y directividad de las antenas son diferentes en los sistemas de cada país. Partiendo de

que una estación móvil típica se mueve al azar en una zona de radio que requiere de un patrón de azimut direccional para antenas móviles. En particular en las áreas suburbanas la estación base y la móvil logran el enlace a través de la línea de la visual de ahí que si el patrón de antena no fuera omnidireccional el nivel de señal recibido pueda variar considerablemente. Por tanto las antenas omnidireccionales se requieren en sistemas radio móviles. Resultados experimentales en ambientes urbanos y suburbanos indican que las ondas que llegan extendidas de 0-50° en elevación son muy comunes ya que el ángulo de elevación medio de su distribución depende del ambiente, una antena móvil cuyo ángulo de elevación de radiación máximo pudiera ajustarse al ángulo de elevación medio de la distribución de onda de incidencia, asegura la potencia de recepción máxima. Sin embargo en el presente la práctica demuestra que el patrón de radiación debe ser máximo en la dirección horizontal. Es común el empleo de la polarización vertical en la mayoría de los sistemas móviles porque permite desarrollar con facilidad antenas omnidireccionales de banda ancha, antenas dipolos y fijas, se sabe que la recepción de diversidad es muy efectiva para contrarrestar el desvanecimiento multitrayecto. No obstante en la mayoría de los sistemas móviles celulares la recepción de diversidad es una tecnología opcional dentro de las especificaciones del sistema [1].

1.6.2 Tipos de antenas.

Antena sleeve.

En una antena *sleeve* el centro conductor de un cable coaxial se conecta a un elemento cuya longitud es un cuarto de la longitud de onda y el conductor externo del cable coaxial se conecta a una cubierta cilíndrica cuya longitud es un cuarto la longitud de onda. Esta envoltura cilíndrica coaxial funciona como un regulador de $\lambda/4$ y así la mayor cantidad de corriente de la antena no sale a la superficie exterior del cable coaxial. Al adicionar reguladores en la parte inferior del cable coaxial mejora el patrón de radiación y evita la salida de corriente de la envoltura. Como resultado esta antena tiene casi las mismas características que la antena de dipolo $\lambda/2$. Esta antena no requiere de un plano terrestre de esta forma la degradación de la ganancia es menor que la experimentada en las antenas monopolo de $\lambda/4$.

Antena monopolo de $5/8 \lambda$.

Estas antenas tienen una directividad mayor en la dirección horizontal. Por ello esta antena generalmente se utiliza como una antena de alta ganancia en combinación con un plano de

tierra. El elemento de antena es casi siempre un material flexible y por ello también se llama antena de $5/8 \lambda$ flexible. La razón por la cual su ganancia es mayor que la de la antena monopolo $\lambda/4$ es que la abertura de la antena es mayor y la elevación del haz de radiación es menor que la de la antena monopolo $\lambda/4$ dado porque el plano terrestre es finito.

Antena colineal.

Una vía fundamental de realizar una antena de alta ganancia es formar un arreglo colineal en la cual varios elementos radiadores colineales se alimentan en fase. La longitud de los elementos radiadores es casi siempre $\lambda/2$ y los espirales de carga para el logro de una alimentación en fase se insertan entre los elementos del radiador (ver figura 9 del Anexo 1). Este tipo de antena también se conoce como antena de carga y se adopta en ocasiones como una antena vehicular para el uso de radio aficionados. En estas antenas la alimentación en fase depende de la longitud de los radiadores y la distancia entre ellos. Su ancho de banda es generalmente estrecho, por lo que no es aconsejable su empleo en sistemas de comunicaciones móviles de banda ancha. Sin embargo pueden utilizarse en sistemas de banda estrecha tales como el TDMA. Su ganancia directiva es teóricamente 3 dB mayor que la de un dipolo de media longitud de onda [6].

1.7 Antenas vehiculares de frecuencia dual .

Para satisfacer el rápido crecimiento de los teléfonos móviles se hace necesario en ocasiones adicionar una nueva banda de frecuencia al sistema existente por ejemplo si la banda de 800 MHz se satura, se necesita aumentar el número de canales utilizando una nueva banda de frecuencia de banda como la de 1.5 GHz. Para este caso la estación móvil usualmente requiere de dos antenas un para cada banda de frecuencia. Si una antena sencilla puede operar en bandas de frecuencia dual el sistema pudiera expandirse fácilmente. Si se le agrega un elemento parásito cuya longitud corresponda a $\lambda/2$ de la frecuencia mayor, la antena dipolo, logra una operación de frecuencia dual. Una antena que se diseña para operar en la banda de 800 MHz es el dipolo impreso con carga capacitiva. Para hacer posible la operación de frecuencia dual se le agrega un elemento parásito cerca del excitador de la antena original. Las dimensiones de las antenas son aproximadamente de 90 mm de ancho, 70 mm de profundidad y una altura de 60 mm. Esta puede ubicarse en la parte trasera del espejo retrovisor [1].

1.8 Antenas de sistemas compatibles.

Cuando se expande la cobertura de telefonía móvil a nivel internacional es ineficiente cubrir el área de servicio utilizando un solo sistema móvil terrestre como es el sistema móvil celular. Un sistema por satélite es mucho más eficiente para cubrir un área amplia donde existen pocas estaciones móviles.

Es común que el sistema móvil terrestre y el sistema por satélite utilicen diferentes frecuencias y diferentes estados de polarización. Además el patrón de antenas que se requiere para estaciones móviles individuales en cada sistema puede diferir.

La Motorola anunció un sistema de teléfono portátil que utiliza satélites de baja órbita. Este requiere de una antena compatible con el sistema móvil terrestre y el sistema de satélite móvil sería entonces un reto. Esto indica la necesidad de una antena compatible al sistema para realizar duales sofisticados.

1.9 Antenas para teléfonos portátiles.

A consecuencia de la capacidad de carga limitada, la potencia de transmisión de las unidades de teléfonos portátiles deben ser menores que la de las unidades de teléfono vehiculares. Además la ganancia de la antena es generalmente menor que la de las unidades telefónicas vehiculares porque solamente se utilizan pequeñas antenas que sufren degradación en la ganancia debido a la cercanía al cuerpo humano. Bajo estas condiciones, los requerimientos de la antena para unidades de teléfonos portátiles deben desarrollar la mayor ganancia posible en el ancho de banda requerido. Al mejorar la ganancia efectiva de la antena se puede reducir el tamaño y peso de las unidades de teléfonos portátiles.

Existen algunas características distintivas de las antenas que se agrupan en unidades telefónicas portátiles. La primera característica es que la dirección de la polarización y el patrón de radiación no están fijos porque la unidad telefónica portátil es orientada aleatoriamente cuando se utiliza. La segunda característica es que su patrón de radiación y eficiencia de radiación varían considerablemente cuando está cercana al cuerpo humano.

Análisis teóricos realizados consideran la variación del patrón de radiación debido al efecto de la cubierta de la unidad, la degradación de la eficiencia de la radiación de la antena debido al efecto de proximidad del cuerpo humano, y la variación del patrón y la polarización debido a la manipulación humana.

Es importante tener en cuenta y determinar las características siguientes para diseñar una antena:

- 1- La ganancia efectiva en un ambiente de propagación de multitrayecto.
- 2- La ganancia efectiva cuando la unidad portátil se opera en las posiciones de hablar, trasladar y discar.

1.9.1 Técnicas y consideraciones de los diseños de antenas usadas en teléfonos portátiles.

La tendencia de la tecnología de teléfonos portátiles en los últimos años ha sido la dramática reducción en el tamaño y el peso de la unidad. En 1984, los teléfonos celulares portátiles tenían cerca de 570 centímetros cúbicos de volumen (incluyendo baterías) y pesaban cerca de 850 gramos. Sólo 7 años después, los teléfonos celulares portátiles tienen un volumen de 190 centímetros cúbicos y pesan menos de 220 gramos. Estos cambios tan dramáticos en el volumen y en el peso han ido acompañados una rápida evolución de las antenas usadas para estos teléfonos. Los esfuerzos de diseño han sido el mantener aproximadamente el mismo desempeño de la antena en términos de ganancia, cobertura, y ancho de banda a la par de los rápidos requerimientos de reducción del tamaño. Serán analizadas las antenas que operan en la banda de los 800 a los 1000 MHz, la cual cubre la mayoría de los sistemas celulares actuales. Estas antenas se pueden usar a frecuencias mayores simplemente reduciendo su tamaño.

Los principales factores que afectan el diseño de las antenas de teléfonos celulares portátiles son el amplio ancho de banda relativo (~10%), necesidad de pequeño tamaño y necesidad de proveer cobertura uniforme sobre el ángulo azimutal. Los requerimientos de cobertura y tamaño son contradictorios en cuanto al hecho de que la antena se mantiene cerca de la cabeza del usuario, la cual es aproximadamente una elipse dieléctrica absorbente con el eje mayor de una longitud de onda. La cabeza del usuario absorbe y dispersa la energía electromagnética que se genera de la antena, así que la cobertura azimutal nunca es uniforme, si la cabeza está cerca del radiador de energía. Una manera sencilla de lograr la cobertura azimutal uniforme es elevar la antena por encima de la cabeza del usuario.

Esta solución requiere una estructura de soporte no radiadora para la antena de aproximadamente 15 cm de largo. La antena, en este caso un dipolo de media onda o algo similar, con una longitud aproximada de 15 cm, lo cual da un total de 30 cm en la antena y el soporte. Este tamaño no es aceptable, dado que la máxima longitud del celular debe ser de 25 cm, que es la distancia aproximada que hay entre la boca y las orejas de un adulto. Una estructura de 30 cm presentaría serios problemas mecánicos en el volumen tan pequeño de los celulares. Estructuras alternativas requerirían la separación del radio de la antena, que se colocaría en un sombrero, o alguna clase de soporte montado en la cabeza, lo cual no sería

aceptado por el usuario, pues resultaría impráctico. Hasta ahora, solamente antenas relativamente pequeñas han logrado aceptación en el mercado de celulares de tan rápido crecimiento. Se analizarán 4 tipos de antenas:

- El dipolo cubierto.
- Antena helicoidal.
- Antena de lazo de un cuarto de onda.
- Antena dipolo helicoidal.

Estas antenas representan la mayoría de las antenas radiadoras usadas en la tecnología de teléfonos celulares [1].

1.9.2 Tipos de antenas.

Dipolo cubierto.

Este tipo de antena es esencialmente un dipolo de media onda alimentado en un extremo por una línea coaxial. La estructura tiene una simetría cilíndrica, por lo que en el espacio libre posee una excelente uniformidad en el patrón de radiación en azimut. La estructura de radiación es un dipolo asimétrico hecho de conductores de diferentes diámetros y de, ligeramente, distintas longitudes. El radiador es más delgado y es, por lo general, el conductor interno de la línea coaxial que alimenta a la antena. Este conductor debe tener una apropiada longitud para lograr un buen desempeño de la antena en la banda de operación (800 a 900 MHz). El conductor, de diámetro mayor, tiene una función crítica en la operación adecuada de la antena y se debe diseñar con mucho cuidado. El conductor de diámetro mayor debe proveer obturación efectiva de las corrientes de RF en su extremo abierto y también a la mitad del dipolo radiador.

Antenas helicoidales.

Estas antenas son usadas normalmente en radios portátiles en las bandas de baja frecuencia (30 a 150 MHz), con el fin de reducir el tamaño del radiador a longitudes confortables. Con una adecuada selección de parámetros, el dipolo helicoidal de modo normal, tiene una estructura de radiación eficiente, con desempeño de patrón y de ganancia similar a los dipolos de media onda. El ancho de banda de un dipolo helicoidal pequeño y eficiente es menor que el ancho de banda de una antena de media onda debido a su factor Q más alto, que depende del número y diámetro de las vueltas de la antena. La aplicación de las antenas helicoidales en la banda de los 800 a 900 MHz, además de la pérdida de ganancia, presenta otra desventaja respecto a su uso en frecuencias menores.

Si el encapsulado es más largo que un cuarto de longitud de onda, parte de las corrientes del encapsulado estarán en oposición con las corrientes de la antena dando como resultado pérdida de ganancia en el horizonte. Los primeros modelos de celulares portátiles tienen un encapsulado de unos 20 cm de largo. En lo que se refiere a mediciones en el patrón de radiación de la antena helicoidal de un teléfono portátil cerca de la cabeza de un humano, muestra una pérdida de ganancia promedio de unos 12 dB con respecto a un dipolo en el espacio libre de media onda. Las pérdidas en el patrón de radiación y en RF causan que las antenas helicoidales sean difíciles de usar en las aplicaciones de radio celular en la banda de 800 a 900 MHz, excepto por el tamaño reducido de la antena, lo cual las hace muy atractivas para aparatos pequeños. La mayoría de los problemas que existen para las antenas helicoidales se presentan en las antenas de lazo de un cuarto de onda, aunque su patrón de radiación es ligeramente más eficiente. Debido a que no existe una verdadera ventaja en usar antenas de lazo de un cuarto de onda sobre las antenas helicoidales, las antenas de lazo han gozado de aceptación en el mercado de los teléfonos portátiles [7], [8].

1.9.3 Diversidad de antenas.

El pobre desempeño de las antenas helicoidales para teléfonos portátiles pequeños en la banda de 800 a 900 MHz ha forzado a los diseñadores a fabricar un radiador alternativo para las antenas helicoidales pequeñas. Las antenas usan dos hélices:

- Una hélice primaria fija de aproximadamente 2 cm de largo (longitud eléctrica de un cuarto de onda).
- Una hélice resonante secundaria de unos 10 cm (longitud eléctrica de media onda) que puede ser comprimida en el encapsulado del radio.

Una vez que son extendidas, la hélice secundaria se convierte en el radiador dominante, debido a que es libre de pérdidas causadas por la mano del usuario que sostiene el aparato. La hélice secundaria es alimentada por la antena primaria y presenta un excelente desempeño en el espacio libre, dependiendo de su propia longitud y de las pérdidas debidas a la resistencia en el alambre de metal de que está hecha la hélice. En el extremo de la antena secundaria hay una barra dieléctrica de 2 cm de largo para desacoplar las dos hélices, cuando la antena secundaria se encuentra retractada, logrando de esta manera que la inducción de RF sea mínima en el encapsulado a través de esa trayectoria. Este arreglo especial ha proporcionado una mejora en el rango de comunicación en los teléfonos de bolsillo con antenas helicoidales. Aunque el desempeño de estas antenas está lejos de ser el óptimo, el teléfono celular de bolsillo se ha

vuelto extremadamente popular, lo cual demuestra que la perfección en la ingeniería no es siempre una condición para lograr éxito en el mercado [1].

1.10 Sistemas de antenas para teléfonos portátiles.

Las dos principales características de diseño de cualquier antena para teléfono portátil son:

- Debe estar montada en el encapsulado del teléfono portátil.
- Durante la operación el aparato será manipulado por un humano, quién lo apuntará aleatoriamente hacia cualquier dirección.

Debido a que la antena se coloca muy próxima al encapsulado, la corriente de la antena se induce no sólo en la antena misma, sino también en la parte conductora del encapsulado. Esta corriente de dispersión cambia la forma del patrón de radiación original. La eficiencia de radiación se degrada posteriormente por la proximidad de la antena al cuerpo humano, pues la antena necesariamente se usa cerca de un operador. La polarización del patrón de radiación también es afectada por los cambios en la dirección de la antena causados por los movimientos del operador. Estas dificultades de diseño imperativas se complican debido a la necesidad de desarrollar antenas muy pequeñas para cumplir con las demandas de equipos compactos y portátiles; la eficiencia de radiación y el ancho de banda se degradan conforme el tamaño de la antena se reduce. Además de estas imperativas de diseño, que no son comúnmente encontradas en aplicaciones de telefonía portátil, las consideraciones típicas como la seguridad del ancho de banda de la frecuencia especificada y la necesidad de sustentar la diversidad en la recepción de la antena deben tomarse en cuenta. El principal problema que debe ser tratado es la ganancia efectiva de las antenas en un ambiente de propagación de multitrayecto. La clave está en el estudio de estos temas de manera sistemática y maximizar la ganancia efectiva lo más que sea posible en el rango de frecuencias deseado. Una alta ganancia efectiva permite que el tamaño y el peso se puedan reducir, mientras que el tiempo de uso se incrementa. No solamente permite que el teléfono portátil sea usado en áreas de baja intensidad de campo eléctrico, sino también permite que la potencia transmitida se reduzca. Esta reducción en la potencia transmitida es extremadamente efectiva en la reducción de la capacidad de la batería (el peso del teléfono portátil) o la extensión del tiempo de uso de la batería. Por lo tanto, la ganancia efectiva de las antenas montadas en un teléfono portátil debe ser examinada para desarrollar aparatos telefónicos pequeños y de alto desempeño [1].

1.11 Sistemas portátiles manuales.

Muchas clases de teléfonos portátiles manuales han sido desarrolladas para la banda de 900 MHz en sistemas de comunicaciones móviles terrestres. La antena más popular para las unidades portátiles manuales es la antena de lazo, que no solamente tiene características de ancho de banda relativamente amplias, sino que también se puede guardar dentro de la unidad. Además la antena de lazo tiene otras tres ventajas: estructura simple, volumen pequeño y son de fácil instalación. Sin embargo, las corrientes de la antena son impares no solamente en la antena misma, sino también en la parte conductora del encapsulado. Debido a lo anterior el patrón de radiación depende del tamaño del encapsulamiento. En el caso de las antenas de lazo de un cuarto de onda, las corrientes en la antena y el encapsulado no están en fase, y da como resultado un patrón de radiación con cuatro lóbulos de radiación vertical, y la degradación de la directividad en el plano horizontal es considerable. La ganancia efectiva depende principalmente de la longitud de la antena de lazo y la longitud de la parte conductora del encapsulado. Por lo que, en este tipo de unidades manuales portátiles, se puede optimizar el desempeño de la antena seleccionando las longitudes apropiadas [1].

Capítulo 2

Capítulo 2. Diseño de antenas.

2.1 Diseño de una antena helicoidal.

2.1.1 Introducción.

En 1946 John Kraus propone el diseño de la antena helicoidal, aunque pudo lograr resultados increíbles en su primer experimento, tardaría años antes de entender las razones por la cual la antena operaba de un modo adecuado, descubrió que la antena helicoidal tenía polarización circular en la banda de radiodifusión siendo muy direccional. Su directividad y frecuencia central pueden ser ajustadas por la geometría de la antena. El diseño propuesto por Kraus en 1946 se reconoce como uno de los más populares y usados en las antenas de polarización circular.

2.1.2 Aplicaciones.

Debido a su polarización circular, alta directividad, y la simplicidad relativa, la antena helicoidal encuentra una aplicación natural en las comunicaciones satelitales. Ha sido usada en satélites internacionales, así como en sistemas de comunicaciones punto a punto. Esta antena actualmente se usa en equipos que utilizan la banda de 2-5 GHz.

2.1.3 Geometría de la antena helicoidal.

La antena helicoidal puede construirse de forma fácil, duradera y a muy bajo costo. Consiste de un alambre que, partiendo desde un plano de tierra, forma una espiral de n vueltas con diámetro D y espaciadas a una distancia S entre cada una, normalmente la cantidad de vueltas es mayor que cuatro [9], [10], [12]. En la figura 1 se muestra un esquema de esta antena.

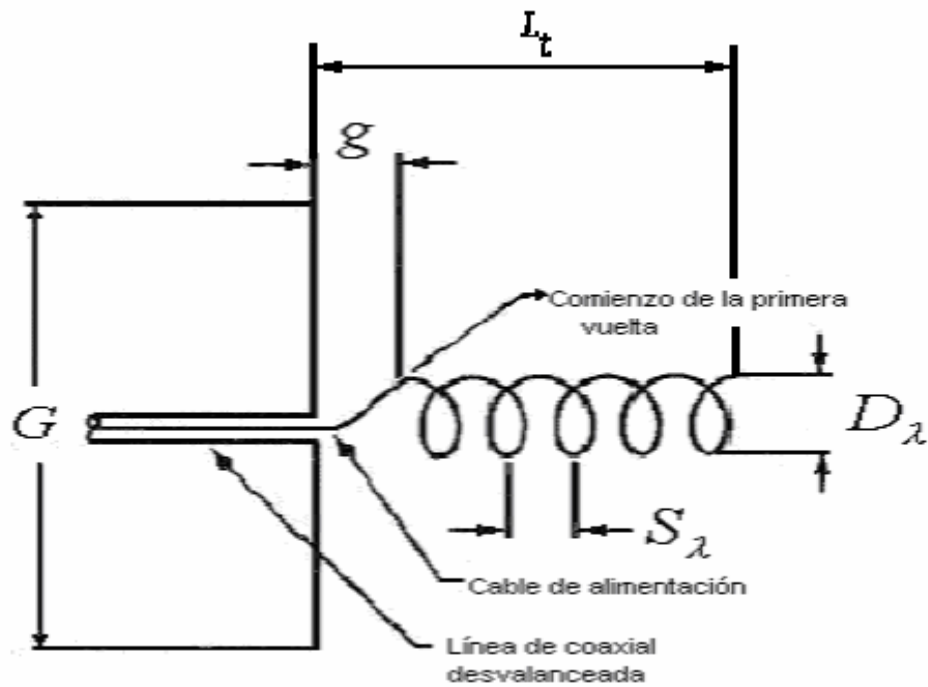


Figura1. Antena helicoidal.

Dimensiones de la antena:

n : número de vueltas de la espiral.

S : distancia entre las vueltas de las espiral (normalmente como un porcentaje de la longitud de onda, S_λ).

C : perímetro de la circunferencia de una espira (normalmente como un porcentaje de la longitud de onda, C_λ).

D_λ : diámetro del enrollado en longitudes de onda.

G : diámetro del plano de tierra reflector.

g : distancia entre la primera vuelta y el plano de tierra reflector.

L_t : longitud total de la antena.

L_n : longitud total del alambre.

L_0 : longitud total del alambre entre cada vuelta.

A continuación se muestran las expresiones necesarias para el cálculo de los elementos que se requieren para el diseño de la antena helicoidal [4], [9], [10], [11], [12]:

$$G = 0.8\lambda \text{ a } 1.1\lambda$$

$$g = 0.12\lambda \text{ a } 0.13\lambda$$

La longitud del conductor de una vuelta se puede calcular como:

$$L_0 = \sqrt{S_\lambda^2 + (\pi D_\lambda)^2} \quad (2.1)$$

mientras que la longitud total del conductor que requiere la antena para su construcción es:

$$L_n = n \cdot L_0 \quad (2.2)$$

Si se multiplica el número de vueltas n por el espaciamiento que existe entre cada una, se obtiene la longitud total de la antena:

$$L_t = nS \quad (2.3)$$

El perímetro de una espira del enrollado C_λ se calcula como:

$$C_\lambda = D_\lambda \cdot \pi \quad (2.4)$$

y debe estar entre:

$$C_\lambda = 0.75\lambda \text{ a } 1.33\lambda$$

$$S_\lambda = 0.2126C_\lambda \text{ a } 0.2867C_\lambda$$

El rango de esta relación resulta de los requerimientos del ángulo de inclinación α de la hélice, que debe estar entre 12° y 16° [3].

Donde:

$$\alpha = \arctan \frac{S_\lambda}{C_\lambda} \quad (2.5)$$

Cuando $\alpha = 0^\circ$ la antena helicoidal se reduce a una antena de lazo de n vueltas, si $\alpha = 90^\circ$ entonces la antena se reduce a una antena lineal. Se tendrán antenas helicoidales si $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ con una circunferencia más grande que cero pero más pequeña que la circunferencia cuando la hélice se reduce a un lazo ($\alpha = 0^\circ$).

Para una operación ideal:

$$S_\lambda = \frac{1}{4}$$

$$C_\lambda = 1 \text{ (El plano de tierra } G \text{ se asume infinito).}$$

La antena helicoidal opera principalmente en dos modos:

1. Modo normal (broadside): el campo radiado por la antena es máximo en el plano normal al eje de la hélice, en este modo $n \cdot L_0 \ll \lambda$.
2. Modo axial (end-fire): en este modo de operación sólo hay un lóbulo principal y su máxima intensidad de radiación se encuentra a lo largo del eje de la hélice. Los lóbulos secundarios se encuentran formando ángulos oblicuos respecto al eje.

2.1.4 Patrón de radiación.

La antena Helicoidal puede considerarse como un conjunto de n fuentes isotrópicas dispuestas a lo largo del eje de la antena, lo que genera un patrón altamente directivo, donde la expresión para la intensidad del campo viene dado por la ecuación:

$$E = \sin\left(\frac{\pi}{2n}\right) \cdot \frac{\sin\left(\frac{n\psi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\psi}{2}\right)} \quad (2.6)$$

Donde:

$$\psi = s(\cos\phi - 1) - \frac{\pi}{n} \quad (2.7)$$

2.1.5 Ancho del lóbulo entre los puntos de mitad de potencia.

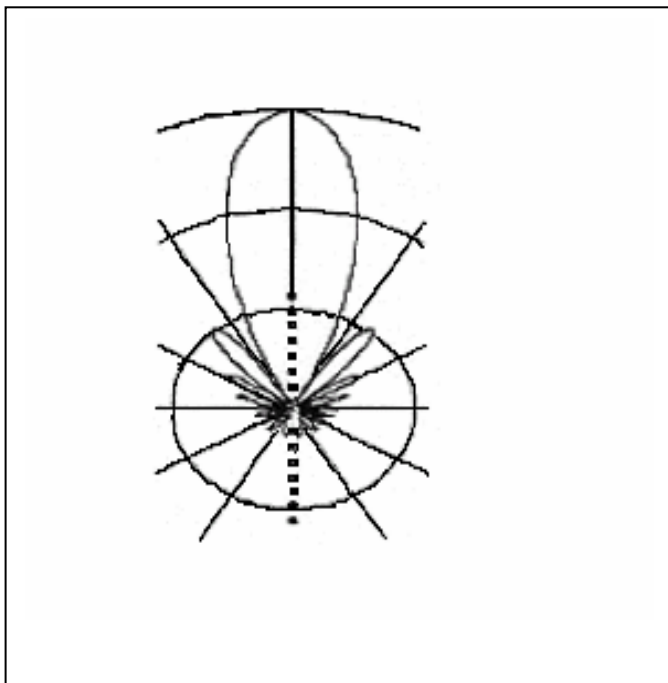


Figura 2. Patrón de radiación.

$$HPBW \approx \frac{52}{C_\lambda \sqrt{nS_\lambda}} \quad (2.8)$$

Con el incremento del número de vueltas el ancho de banda se hace más pequeño y la antena más direccional. Con la disminución del número de vueltas, la antena se convierte en una antena de lazo con un patrón más fuerte en el plano horizontal que a lo largo del eje de la hélice.

2.1.6 Ganancia.

Como se observa de la ecuación (2.8), la directividad y la ganancia están en función de la circunferencia, el espaciamiento entre ellas y el número de vueltas:

$$Gain_{(dBi)} = 11.8 + 10 \cdot \log(C_\lambda^2 \cdot n \cdot S_\lambda) \quad (2.9)$$

Las circunferencias y las distancias entre ellas son determinadas por la frecuencia, el diseñador de la antena sólo necesita ajustar n para una aplicación apropiada. Por ejemplo, si la antena se encuentra en un satélite de GPS, se requiere un elevado número de vueltas para aumentar la directividad y la eficiencia de la transmisión. Si la antena está en un receptor de GPS, un bajo número de vueltas será requerido para aumentar la ganancia en el horizonte.

2.1.7 Frecuencia.

El ancho de banda de una antena helicoidal es relativamente más grande que la mayoría de las antenas, en el orden de 2:1. La frecuencia central se fija por la circunferencia de las espiras.

2.1.8 Impedancia de entrada.

La impedancia de entrada de la antena helicoidal es altamente resistiva. Esta cambia, dependiendo de la ubicación del punto de alimentación y del diámetro del conductor de las espiras. La naturaleza resistiva de la impedancia cambia como una función de la frecuencia, dada por las ecuaciones:

Para la alimentación en el centro de la antena (en el eje):

$$Z \approx 140C_\lambda \text{ ohms.} \quad (2.10)$$

Para la alimentación en la periferia de la antena (en su circunferencia):

$$Z = \frac{150}{\sqrt{C_\lambda}} \text{ ohms.} \quad (2.11)$$

Nótese que con el aumento de C_λ (debido a un aumento de frecuencia), la impedancia aumentará o disminuirá dependiendo de la situación del punto de alimentación. Sin embargo,

para el caso ideal ($C_\lambda = 1$), la localización de la alimentación tiene sólo un efecto menor en la impedancia.

2.1.9 Ejemplo resuelto.

Ejemplo 1: Diseñar una antena helicoidal que opere a la frecuencia de 2.425GHz para ser utilizada en dispositivos de comunicaciones inalámbricas en la banda intermedia de ISM (2.402–2.485GHz). El diámetro de la circunferencia de las espiras es de 40 mm. Se desea que la antena tenga un total de 12 vueltas.

Solución:

Datos:

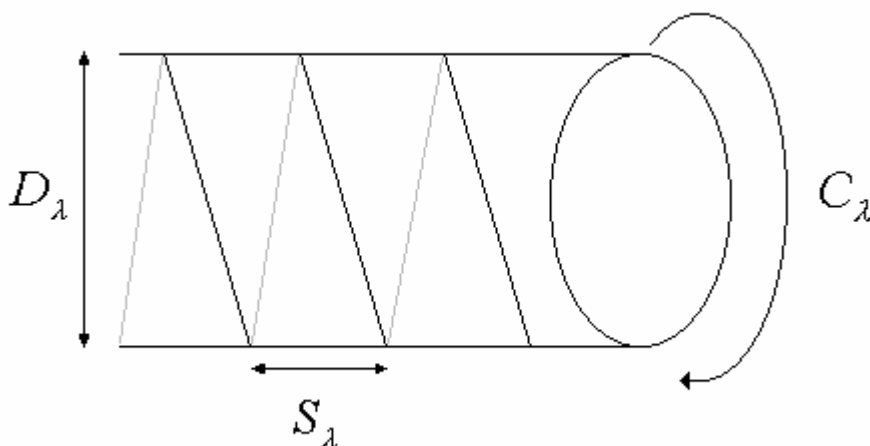
$$f = 2.425 \text{ GHz}, \quad D = 40 \text{ mm}, \quad n = 12$$

λ se calcula como:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{2.425 \cdot 10^9} = 0.123711 \text{ m}$$

Donde:

c : es la velocidad de la luz.



$$D_\lambda = \frac{D}{\lambda}$$

$$D_{\lambda} = \frac{0.04}{0.123711}$$

$$D_{\lambda} = 0.3233$$

para calcular el perímetro de la circunferencia de una espira se utiliza la expresión (2.4)

$$C_{\lambda} = D_{\lambda} \cdot \pi = 0.3233 \cdot 3.14 = 1.01516$$

$$S_{\lambda} = 0.2126C_{\lambda} = 0.2126 \cdot 1.01516$$

$$S_{\lambda} = 0.2158$$

el ángulo de inclinación se halla aplicando (2.5)

$$\alpha = \arctan \frac{S_{\lambda}}{C_{\lambda}}$$

$$\alpha = \arctan \frac{0.2158}{1.01516}$$

$$\alpha = 12^{\circ}$$

Ganancia

Para el cálculo de la ganancia debe utilizarse la ecuación (2.9)

$$Gain_{(dBi)} = 11.8 + 10 \cdot \log \left(C_{\lambda}^2 \cdot n \cdot S_{\lambda} \right)$$

$$Gain_{(dBi)} = 11.8 + 10 \cdot \log \left(1.01516^2 \cdot 12 \cdot 0.2158 \right)$$

$$Gain_{(dBi)} = 16.06 \text{ dBi}$$

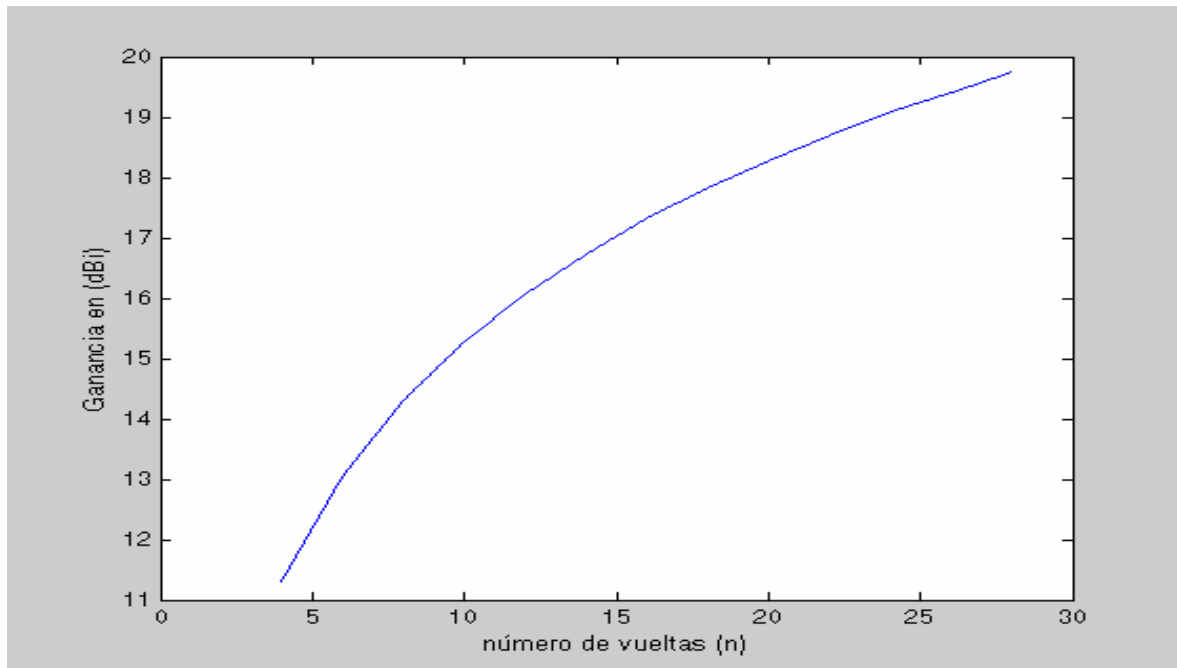


Figura 4. Relación del número de espiras y la ganancia.

Si se realiza el análisis de la gráfica de la figura 4 (obtenida del Matlab) se puede observar como la antena helicoidal para poder aumentar su ganancia en 3 dBi tiene que duplicar el número de espiras, lo que trae consigo el aumento de la longitud de la antena.

Impedancia.

Para el cálculo de la impedancia se asume que la alimentación se realiza en el centro de la antena por lo que ha de usarse la expresión (2.10).

$$Z \approx 140C_{\lambda}$$

$$Z \approx 140 \cdot 1.01516$$

$$Z \approx 142.12 \Omega$$

Longitud del conductor.

Primero se halla la longitud del conductor de una vuelta mediante (2.1) y luego se aplica (2.2):

$$L_0 = \sqrt{S_{\lambda}^2 + (\pi D_{\lambda})^2}$$

$$L_n = n \cdot L_0$$

$$L_0 = \sqrt{0.2158^2 + (3.14 \cdot 0.3233)^2}$$

$$L_0 = 1.0378\lambda \quad (0.1284 \text{ m})$$

$$L_n = 12 \cdot 1.0378\lambda$$

$$L_n = 12.45\lambda \quad (1.54 \text{ m})$$

Longitud total de la antena.

A partir de (2.3) se tiene que:

$$L_t = n \cdot S$$

$$L_t = 12 \cdot 0.2158\lambda$$

$$L_t = 2.59\lambda \quad (0.3204 \text{ m})$$

Ancho del lóbulo entre los puntos de mitad de potencia.

$$HPBW \approx \frac{52}{C_\lambda \sqrt{nS_\lambda}}$$

$$HPBW \approx \frac{52}{1.01516 \sqrt{12 \cdot 0.2158}}$$

$$HPBW \approx 31.83^\circ$$

2.2 Diseño de una antena colineal coaxial.

2.2.1 Requerimientos para el diseño.

Para la construcción de una antena colineal coaxial se requiere de varias secciones de cable coaxial. La antena se conforma al unir el conductor interno de una sección con el externo de la siguiente como muestra la figura 5. Por lo tanto, las ondas se propagan tanto en los conductores internos como externos de los elementos de la antena, [13]. Cada sección debe tener un largo efectivo de media longitud de onda del dieléctrico del cable coaxial. Con esto se

mantendrá la misma polarización a lo largo de la antena. Así entonces, debido al intercambio entre los conductores de cada cable coaxial y su largo de $\lambda/2$, se producirá en cada sección una corriente con la misma polaridad e idéntica fase, [16].

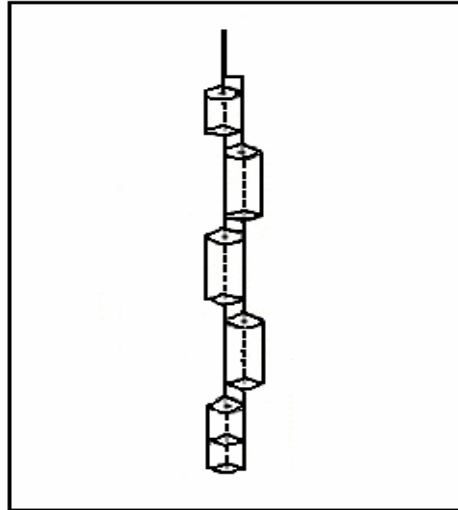


Figura 5. Antena colineal coaxial.

La longitud de onda en el aire λ_o es mayor que la propagada en el dieléctrico del cable λ' , según $\lambda' = \frac{\lambda_o}{\sqrt{\epsilon_r}}$, donde ϵ_r es el dieléctrico del cable coaxial. Es por esto que el largo de la

sección de cable coaxial es un poco menor a la mitad de la longitud de onda en el aire $\lambda_o/2$.

La longitud de cada sección de cable será:

$$\lambda' = \frac{\lambda_o}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{c}{f \sqrt{\epsilon_r}} = \frac{c}{f} v \quad (2.12)$$

En la ecuación, $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ es la velocidad de la luz en el vacío, f es la frecuencia para la cual se diseñará la antena y v la velocidad de propagación de la onda en el cable coaxial. Al centro de cada sección de cable coaxial, cuando se recorre éste en forma longitudinal, el voltaje es cero y la corriente es máxima. En la parte inferior, la antena lleva un disco de radio $\lambda_o/4$, que actúa como plano de tierra, evitando radiaciones bajo este punto y suprimiendo corrientes externas al cable de alimentación [15], [16].

Para protección contra relámpagos se hace un cortocircuito en la parte superior de la antena, uniendo el conductor interno con el externo a una sección conductora de largo $\lambda_0/4$, esta puede ser solamente el conductor interno del cable coaxial (ver figura 5). Debajo de esta sección y para unir los conductores cortocircuitándolos, se necesita una sección de un cuarto de longitud de onda del dieléctrico $\lambda'/4$ de tal manera que el voltaje en la unión sea cero [15].

Una vez conectados los cables coaxiales se pueden introducir en el interior de un tubo de material aislante, y el espacio entre el cable y el tubo puede ser llenado con espuma o cera, que sirve como soporte y además de aislarlo contra la humedad. Este tubo puede ser de fibra de vidrio el cual es bastante flexible y sin peligro de que se rompa, para un mejor uso de esta antena [9], [14], [15].

2.2.2 Cálculos para el diseño.

Primero se determina cuanta ganancia debe tener la antena. Esta ha de calcularse realizando el balance de energía del enlace, para lo cual se utiliza la siguiente ecuación.

$$P_{Tx} + G - A \geq S_{Rx} \quad (2.13)$$

Donde:

P_{Tx} : potencia del transmisor.

G : ganancia de antena.

A : atenuación que introducen cables, conectores y la distancia.

S_{Rx} : sensibilidad del receptor.

Para el caso en que no haya refracción, difracción ni reflexión lo que se podría llamar propagación en el espacio libre, se puede reemplazar la ganancia total y la atenuación total por sus componentes:

$$P_{Tx} - A_{CTx} - A_{FTx} + G_{Tx} - A_0 + G_{Rx} - A_{FRx} - A_{CRx} - M \geq S_{Rx} \quad (2.14)$$

Donde:

- A_{CTx} : atenuación en los conectores de cables usados en el transmisor, que se puede estimar en algo así como 0,5 ~ 1 dB por cada empalme hecho con conectores mecánicos.
- A_{FTx} : atenuación que introduce el cable alimentador de la antena transmisora. Se obtiene multiplicando la atenuación por metro (dB/m) a la frecuencia de operación que especifica el fabricante del cable, por la longitud del cable. Las características del coaxial empleado aparecen en el anexo 2.
- G_{Tx} : ganancia del transmisor.
- A_0 : la atenuación de espacio libre.
- A_{Rx} : ganancia de la antena del receptor.
- A_{FRx} : atenuación en el cable alimentador de antena receptora.
- A_{CRx} : atenuación en los conectores de cables usados en el receptor.
- M : margen de atenuación (10 dB por ejemplo), para tener en cuenta las condiciones cambiantes de propagación atmosférica (*fading* o desvanecimiento) y la degradación de los componentes mecánicos.

La atenuación de espacio libre se calcula (en dB) como:

$$A_o = 21.98 + 20 \log\left(\frac{d}{\lambda_o}\right) \quad (2.15)$$

Donde:

d : distancia a cubrir por el enlace.

Luego de calcular la ganancia se determina el número de elementos que requiere la antena. Escogidos de la tabla siguiente:

Ganancia en dB	Numero de elementos	Longitud de la antena en (cm)
3.5	4	32
6	8	56
9	18	116
10	21	134

Para el caso que se ejemplifica se ha decidido construir una antena de ganancia 6 dB con 8 elementos. La antena se diseña para operar óptimamente al centro de la banda de 802.11 (2.4 GHz). El centro de la banda es determinado por lo siguiente:

Rango de frecuencia: 2.4000 GHz a 2.4835 GHz.

$$f_c = \frac{f_{baja} + f_{alta}}{2} \quad (2.16)$$

$$f_c = \frac{2.400 + 2.4835}{2}$$

$$f_c = 2.441 \text{ GHz}$$

Donde:

f_c : frecuencia central.

La frecuencia central de operación se utiliza en la ecuación siguiente para determinar la longitud de los segmentos individuales de la antena:

$$l_{seg} = \frac{(c/f_c)}{2} v_0 \quad (2.17)$$

Donde:

v_0 : factor de velocidad del cable coaxial usado (cociente entre la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en el coaxial y la velocidad de la luz en el vacío). Su valor típico es del orden de 0,85.

En este ejemplo

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$f_c = 2.441 \text{ GHz}$$

$$v_0 = 0.85$$

aplicando (2.17)

$$l_{seg} = \frac{(3 \times 10^8 / 2.441 \times 10^9)}{2} \cdot 0.85$$

$$l_{seg} = 52.2 \text{ m}$$

En la figura se muestran las medidas de los segmentos.

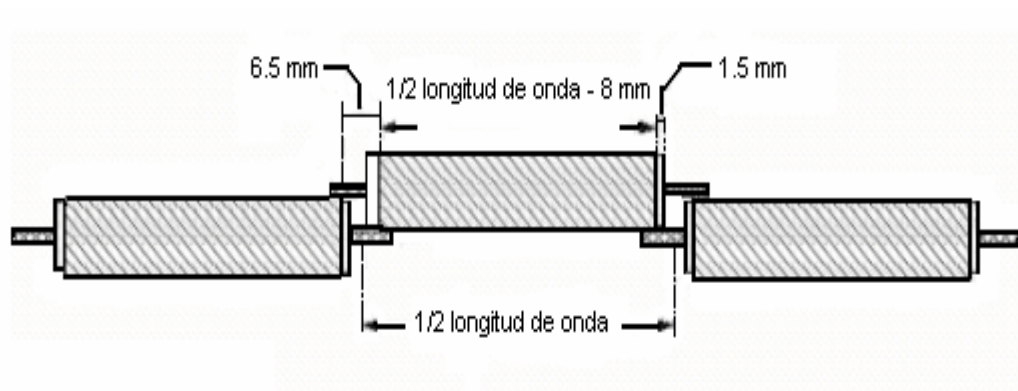


Figura 6. Medidas de los segmentos de la antena.

2.2.3 Preparación del coaxial.

La longitud del coaxial es calculada como se muestra a continuación

$$l_{coaxial} = \frac{\lambda}{2} + 15 \text{ mm} \quad (2.18)$$

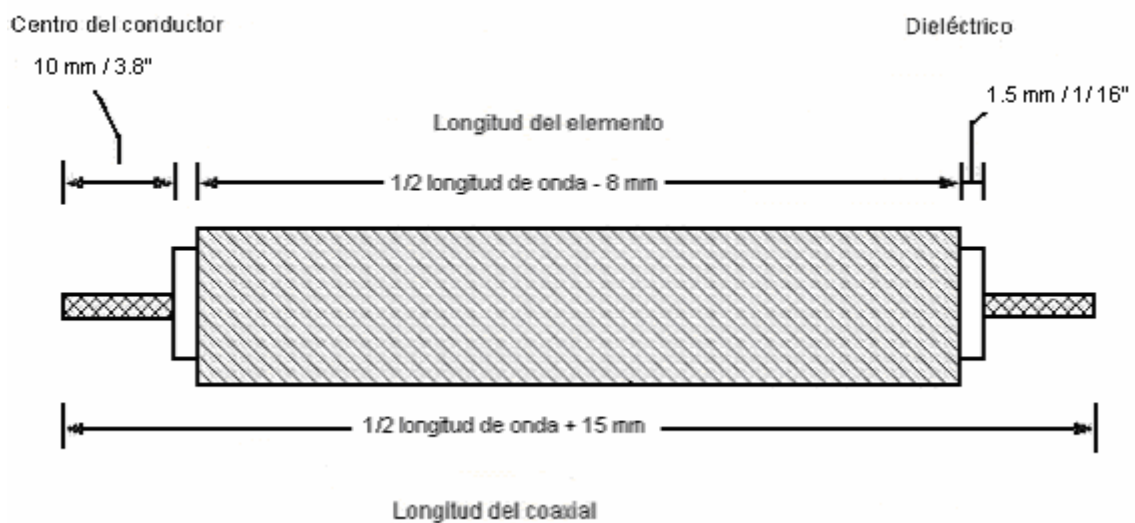


Figura 7. Diagrama del ensamblaje completo del elemento.

En la figura 8 se muestra el diagrama final de la antena coaxial colineal.

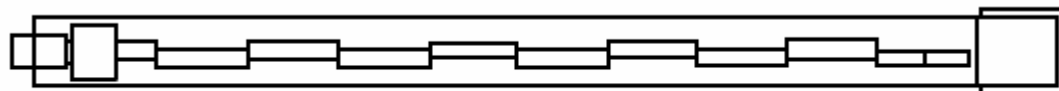


Figura 8. Diagrama final de la antena.

Capítulo 3

Capítulo 3. Antenas inteligentes.

3.1 Introducción.

Con la llegada inminente de UMTS y la implantación de nuevos servicios de tercera generación, que requieren de altas tasas binarias, se hace imprescindible el uso de técnicas que permitan aumentar la capacidad del sistema hasta un nivel tan alto como sea posible. En este aspecto y teniendo en cuenta que una de las principales limitaciones en estos sistemas es la posibilidad de que, obstáculos físicos (vegetación, obstrucciones temporales) o bien condiciones meteorológicas adversas (lluvia, nieve), degraden su rendimiento al interceptar o afectar a la línea de visión directa requerida, se ha planteado como una buena solución el uso de antenas inteligentes. El empleo de esta novedosa tecnología permitirá no solo aumentar la capacidad, sino también mejorar la calidad de la señal, incrementar el alcance, aumentar el nivel de seguridad e incluso introducir nuevos servicios aprovechando las características particulares de adaptación dinámica del patrón de radiación de las estaciones base en función de las condiciones cambiantes del entorno. En este capítulo se pretende dar una visión general acerca del estado del arte de esta tecnología, así como de los distintos tipos y formas de implementarla. Se abordan los efectos causados por su introducción en una red UMTS, sus beneficios y sus desventajas. Por último se presentan los resultados de varias pruebas de campo realizadas sobre prototipos reales y las conclusiones preliminares que se han extraído de ellas.

3.2 Limitaciones inherentes a los sistemas móviles como GSM y UMTS.

La capacidad de un sistema de comunicaciones móviles se puede definir como la tasa binaria que puede ofrecerse en el ancho de banda disponible y en un área geográfica determinada. La capacidad no es la única limitación inherente a los sistemas móviles como GSM y UMTS, también se pueden destacar las siguientes [16]:

3.2.1 El desvanecimiento por multitrayecto.

Degrada las prestaciones del canal de comunicaciones. Es menos importante en UMTS, debido a que es un sistema de banda ancha (por lo que está menos afectado por un desvanecimiento selectivo en frecuencia).

3.2.2 La interferencia cocanal.

Empeora la relación C/I de la señal recibida, lo que afecta directamente al buen funcionamiento del sistema. Este efecto es mucho más pronunciado en los sistemas CDMA (como UMTS), ya que la relación C/I está directamente relacionada con el grado de cobertura de un Nodo B (estación base). Además, en los sistemas CDMA, los niveles de interferencia procedentes de otros usuarios es mucho mayor debido a que los códigos de *scrambling* no son exactamente ortogonales entre sí.

3.2.3 La dispersión temporal de la señal recibida.

Debida de nuevo al multitrayecto, que provoca un aumento de la interferencia entre símbolos.

Estas tres limitaciones, sin embargo, tienen su origen en el hecho de que, en estos sistemas, los canales de tráfico se transmiten a través de antenas omnidireccionales o bien sectorizadas, a pesar de su carácter eminentemente punto a punto [16]. Por este motivo, se está emitiendo señal a usuarios no deseados (lo que da lugar a la aparición de interferencias) y, a su vez, se reciben señales de diversas fuentes (de otros usuarios y de las componentes multitrayecto). Desde hace ya varios años, en la literatura se ha presentado la tecnología de antenas inteligentes como una forma eficaz de resolver todos estos problemas. A continuación se describe en que consiste esta tecnología, haciendo especial hincapié en las ventajas e inconvenientes de su aplicación al sistema UMTS.

3.3 Definición de antena inteligente.

Una antena inteligente (en la Figura 1 del Anexo 2 se muestran dos prototipos) es aquella que, en vez de disponer de un diagrama de radiación fijo, es capaz de generar o seleccionar haces muy directivos enfocados hacia el usuario deseado, e incluso adaptarse a las condiciones radioeléctricas en cada momento [26].

La implantación de antenas inteligentes en una red de comunicaciones móviles se limita, en principio, a las estaciones base o Nodos B en UMTS, debido a que necesariamente se deben emplear sistemas radiantes de mayor tamaño (arreglos de varios elementos). Esto tiene la ventaja de que pueden introducirse las antenas inteligentes de forma transparente para los usuarios, que no tendrán que cambiar de terminal para beneficiarse de esta

tecnología. No obstante, algunos autores sí han contemplado la posibilidad de incorporar antenas inteligentes a los terminales móviles [20].

3.4 Ventajas y desventajas de los sistemas de antenas inteligentes.

La característica de las antenas inteligentes de tener unos haces de radiación con una mayor directividad es decir, mayor ganancia y mayor selectividad angular, hace pensar en las siguientes ventajas potenciales de estos sistemas [16], [18]:

3.4.1 Incremento de la zona de cobertura.

Dado que la ganancia es mayor que en el caso de antenas omnidireccionales o sectorizadas, para igual potencia transmitida, la señal se podría recibir a una mayor distancia (ver figura 2 del Anexo 2). Este hecho podría permitir reducir el número de estaciones bases necesarias para cubrir una zona, siempre y cuando no sea el tráfico el factor limitante.

3.4.2 Reducción de la potencia transmitida.

La mayor ganancia de la antena permitirá incrementar la sensibilidad de la estación base, por lo que los móviles podrán transmitir con menor potencia, ahorrando batería. De igual modo, gracias a la ganancia del arreglo, es posible que la estación base transmita igual potencia, pese a que cada elemento del arreglo esté radiando una potencia muy inferior. Así, disminuirían las especificaciones sobre los amplificadores de potencia utilizados, que podrían resultar más baratos.

3.4.3 Reducción de la propagación multitrayecto.

Debido a la menor dispersión angular de la potencia radiada por la estación base, se reducirá el número de trayectos múltiples que alcanzarán al móvil mejorando así las características de dispersión de retardo del canal. Esto permitiría disminuir los requisitos exigidos al ecualizador del terminal móvil.

3.4.4 Reducción del nivel de interferencia.

La mejor selectividad espacial de la antena (ver figura 3 del Anexo 2) permitirá a la estación base discriminar las señales de usuarios interferentes en favor de la señal del móvil deseado en el caso del enlace ascendente, y también reducir el nivel de potencia transmitida en las direcciones de esos otros usuarios en el caso del enlace descendente. De cualquier modo, se conseguiría aumentar la relación C/I, lo cual tiene dos consecuencias fundamentales:

- Una mejora en la C/I implica directamente mejora en la tasa de error BER, lo que hace que la calidad del servicio aumente.
- La reducción de la C/I puede explotarse directamente (mediante técnicas de multiplexación espacial) o indirectamente (realizando un plan de frecuencias más ajustado, en el caso de GSM) para aumentar la capacidad del sistema.

3.4.5 Mejora de la seguridad.

Gracias a que la transmisión entre la estación base y el terminal móvil es direccional, no será posible que un equipo ajeno intercepte la comunicación, a menos que se sitúe en la misma dirección en la que apunta la antena. Además, sería posible una localización precisa de usuarios que estuvieran realizando un uso fraudulento de los servicios ofertados por la red.

3.4.6 Introducción de nuevos servicios.

Puesto que la red podría tener acceso a información acerca de la posición de los móviles, es posible pensar en servicios tales como radiolocalización en llamadas de emergencia, tarificación geográfica, publicidad de servicios cercanos, información en lugares turísticos, etc.

No obstante, la implantación de estas antenas en la red móvil no está exenta de inconvenientes, como los que se detallan a continuación.

3.4.7 Mayor complejidad de los transceptores.

En comparación con los sistemas radiantes convencionales, los sistemas de antenas inteligentes son mucho más complejos y difíciles de diseñar. Es necesaria una cadena de

transmisión/recepción independiente para cada elemento del arreglo, y todas ellas deberán estar balanceadas y calibradas en tiempo real. Además, es imprescindible el uso de potentes procesadores digitales DSPs, por ejemplo para ejecutar los algoritmos de optimización, conformación de haz y detección del ángulo de llegada. En definitiva, se llega a la conclusión de que no será posible diseñar independientemente el sistema radiante y la propia estación base.

3.4.8 Mayor complejidad de los procedimientos de gestión.

El hecho de que exista un haz de radiación enfocado hacia cada usuario implica que las funciones de red deben revisarse, en particular, las que afectan a la gestión de recursos de radio RRC y a la gestión de movilidad MM. Por ejemplo, algunos procedimientos que pueden verse afectados son los de selección y reelección de celda y establecimiento de conexiones.

3.4.9 Cambios en los métodos de planificación.

La introducción de un sistema de antenas inteligentes implicará tener muy en cuenta sus características, a la hora de realizar la planificación de la red celular. En particular, habrá que contar con el aumento del alcance, la eliminación de fuentes de interferencia y el seguimiento angular de los usuarios [16].

3.5 Implementación de un sistema de antenas inteligentes.

Como se ha mencionado, la característica básica que se busca en el diseño de un sistema de antenas inteligentes es la capacidad de seleccionar espacialmente a los distintos usuarios. Existen varias formas de implementar un sistema con esta capacidad, las cuales se describen a continuación por orden de complejidad [16], [17], [26]:

3.5.1 Haz conmutado.

Es la técnica más simple. El sistema radiante genera varios haces fijos (ver figura 4 del Anexo 2), cada uno de ellos apuntando en una dirección distinta, de modo que entre todos se cubre toda la zona deseada, un sector o una celda. La inteligencia del sistema se encarga de seleccionar el haz que mejor servicio da a cada usuario en particular, en función

de algún parámetro de control (mayor nivel de potencia recibida, mejor SNR y mejor C/I). Esta técnica no garantiza que el móvil se encuentre en la dirección de máxima radiación del haz que le da servicio, ni que las señales interferentes se vean notablemente reducidas ya que siempre es posible que alguna entre por uno de los lóbulos secundarios. De hecho, sería posible recibir una señal interferente por un punto del diagrama de radiación con mayor ganancia que la señal deseada, empeorando apreciablemente las prestaciones del sistema. Una versión más avanzada de esta técnica consistiría en seleccionar con un haz la señal deseada y con otros algunas de sus componentes multitrayecto.

3.5.2 Haz de seguimiento.

Esta técnica es más compleja que la anterior. Requiere el uso de un arreglo progresivo, es decir, un arreglo en el que se pueden controlar electrónicamente las fases con las que se alimentan los distintos elementos, de modo que puede modificarse a voluntad la dirección en la que apunta el lóbulo principal de la antena. A su vez, es necesario utilizar algún algoritmo de detección de la dirección de llegada, de modo que pueda reorientarse dinámicamente el haz para apuntar al usuario deseado. Con esta técnica sí se puede garantizar que el usuario se encuentra iluminado en todo momento por el lóbulo principal y con máxima ganancia dentro de las limitaciones de los algoritmos que se empleen. Sin embargo, tampoco puede evitarse que las interferencias entren por algún lóbulo secundario del diagrama de radiación. Para aprovechar las señales multitrayecto sería necesario detectar y seguir con otros haces dichas componentes y luego procesarlas.

Véase un esquema de esta técnica en la Figura 5 del Anexo 2.

3.5.3 Haz adaptativo.

Este sería el máximo nivel de inteligencia con que se podría dotar al sistema. En este caso, la salida de cada elemento del arreglo se pondera con un factor de peso cuyo valor se asigna dinámicamente, de modo que se conforma el diagrama de radiación para maximizar algún parámetro de la señal por ejemplo, la SINR. De este modo, el diagrama sintetizado habitualmente presentará un lóbulo principal en la dirección del usuario deseado, lóbulos secundarios en las direcciones de las componentes multitrayecto y mínimos e incluso nulos de radiación en las direcciones de las fuentes de interferencia. Puede verse un esquema simple en la Figura 6 del Anexo 2. No siempre será posible eliminar toda la interferencia, ya

que el número de fuentes interferentes que se pueden suprimir está directamente relacionado con el número de elementos de la antena. Esta técnica requiere el uso de complicados algoritmos, tanto para la detección de las señales deseadas e interferentes como para la optimización de los pesos que conforman el haz. Estos algoritmos suelen conllevar una gran carga computacional, mientras que deben procesarse en tiempo real, por lo que suponen una seria limitación.

3.6 Modo de introducción de las antenas inteligentes en una red de comunicaciones móviles.

Una vez conocidos los tipos de antenas inteligentes, es necesario estudiar los modos de introducción de esta tecnología en una red de comunicaciones móviles. Existen tres modos de aplicarla en función del grado de aprovechamiento de la selectividad espacial que ofrece [16], [17]:

3.6.1 Receptor de alta sensibilidad (HSR).

Esta configuración consiste en utilizar antenas inteligentes sólo en el enlace ascendente. De este modo, gracias a la mayor directividad de la antena, se consigue mejorar la sensibilidad global de la cadena de recepción de la estación base, lo que supone varias ventajas:

- En primer lugar, al mejorar la sensibilidad en el enlace ascendente, aumentará la extensión de la zona de cobertura. Esta mejora podría llegar a ser tan grande como para que fuera el enlace descendente el más restrictivo a la hora de calcular la cobertura de una estación base.
- En segundo lugar, la mayor ganancia de la antena significa también que los móviles más cercanos podrían emitir con menor potencia, manteniendo la calidad del enlace, con el consiguiente ahorro de baterías.
- Por último, se lograría una mejora de la relación C/I, lo que implicaría menores tasas de error y una mejor calidad.

3.6.2 Rechazo de interferencias por filtrado espacial (SFIR).

En esta configuración se emplean antenas inteligentes tanto en el enlace ascendente como en el descendente, con lo cual se consigue aprovechar la mejora por selectividad espacial en ambas direcciones. En este caso, la mejora que se experimenta en la C/I, además de reducir la BER del sistema, puede explotarse directamente para aumentar la capacidad de un sistema CDMA como es UMTS. Esto también podría lograrse indirectamente en GSM, si se hace un plan de frecuencias más ajustado, al ser menor la distancia de reutilización, puede aumentar el número de portadoras por estación base.

3.6.3 Acceso múltiple por división espacial (SDMA).

Esta sería la configuración más compleja, pues consiste en aprovechar al máximo las propiedades de selectividad espacial de las antenas de ambos enlaces para ubicar simultáneamente a varios usuarios en el mismo canal. Es decir, que podrían haber varios usuarios utilizando al mismo tiempo la misma frecuencia. La introducción de SDMA supondría la necesidad de contar también con complicados sistemas de gestión de usuarios y de asignación de canales.

3.7 Algoritmos de conformación de haz.

A continuación se describen brevemente los algoritmos que deben implementarse a la hora de diseñar un sistema de antenas inteligentes basado en haces adaptativos, que son los más complejos y, a la vez, los más interesantes.

En primer lugar, supóngase que existen k usuarios, cada uno de los cuales transmite una señal $s_k(t)$. La señal del usuario k -ésimo sufre varias reflexiones y llega a la estación base a través de L_k trayectos distintos, cada uno de los cuales tiene una amplitud y una fase distintas ($a_{ki} \cdot e^{j\phi_{ki}} \equiv \alpha^{ki}$), y llega con un retardo (τ_{ki}) y una dirección ϕ_{ki} diferentes. En la estación base se tendrá un arreglo de N antenas, que, para simplificar, se supondrá que están alineadas y equiespaciadas. En estas condiciones, la señal recibida en el elemento n -ésimo del arreglo es:

$$u_{n(t)} = \sum_{k=1}^k \sum_{i=1}^{L_k} a_n(\phi_{ki}) \cdot \alpha_{ki} \cdot s_k(t - \tau_{ki}) + n_n(t)$$

Donde:

$a_n(\phi_{ki}) = \exp(jknd \cdot \cos(\phi_{ki}))$: fase con la que llega la señal al elemento n -ésimo.

$k = 2\pi / \lambda$: número de onda para la frecuencia de trabajo, cuya longitud de onda es λ .

d : distancia entre los elementos del arreglo.

$n_n(t)$: ruido captado por el elemento n -ésimo del arreglo.

Para sintetizar un diagrama de radiación con una cierta distribución de lóbulos, es necesario multiplicar la salida de cada uno de los elementos por un peso complejo $w_n(t)$ y luego sumarlas todas. Utilizando una notación vectorial, la señal a la salida del arreglo será:

$$y(t) = \overset{r}{w}(t)^H \cdot \overset{r}{u}(t) = \overset{r}{w}(t) \cdot \left[\sum_{k=1}^k \sum_{i=1}^{L_k} \overset{r}{a} \cdot \alpha_{ki} \cdot s_k(t - \tau_{ki}) + \overset{r}{n}(t) \right]$$

Donde los vectores $\overset{\perp}{w}$, $\overset{\perp}{a}$ y $\overset{\perp}{n}$ son vectores de columna, con los elementos w_n , a_n y n_n correspondientes ($1 \leq n \leq N$), y el operador H significa "hermítico" (transpuesto y conjugado.)

El problema consiste entonces en encontrar un vector de peso $\overset{\perp}{w}$ capaz de sintetizar un diagrama de radiación que sea útil para apuntar a un usuario. Si este sistema dispone de N_R cadenas receptoras (es decir, es capaz de establecer hasta N_R comunicaciones simultáneas con otros tantos usuarios), habrá que calcular a la vez N_R vectores de peso,

aplicarlos a las salidas de los elementos del arreglo y obtener así las N_R salidas (una para cada receptor).

El cálculo del vector \hat{w} que mejor se adapte a las necesidades (según se quiera maximizar la SNR y aprovechar la diversidad de trayectos.) puede realizarse mediante algoritmos muy diversos [17], [19], [21], [22].

3.8 Cálculo del vector de peso.

Existen, básicamente, tres tipos de algoritmos para el cálculo del vector de peso, los cuales se diferencian en el modo en que seleccionan al usuario deseado.

3.8.1 Técnicas con referencia temporal.

En este caso, el receptor genera localmente una estimación de la señal del usuario que desea captar (obtenida usualmente a partir de una secuencia de entrenamiento o de un código de *scrambling*). Entonces, el algoritmo encontrará el valor de \hat{w} que minimiza el error entre la señal de salida del arreglo, $y(t)$, y la estimación, $d(t)$.

3.8.2 Técnicas con referencia espacial.

Estas técnicas no requieren el uso de secuencias de entrenamiento, pero, en cambio, necesitan estimar la DoA del usuario deseado y de los interferentes, lo que supone el uso de otros complejos algoritmos para hacer dicha estimación.

La ventaja de esta frente a las anteriores es que no necesitan conocer la estadística de la señal y convergen más de prisa, al no tener que invertir grandes matrices. En cambio, son muy sensibles a los posibles errores de apuntamiento, debidos a una mala calibración de los elementos del arreglo o a desviaciones en los algoritmos de cálculo de DoA, ya que si la dirección en la que se dirige el haz no coincide con la de la señal que se busca, esta puede ser eliminada como una interferencia más.

3.8.3 Técnicas con referencia ciega.

En este tipo de técnicas, más complejas, lo que se explota es alguna característica conocida de la señal deseada, como alguna modulación y algún tipo de

cicloestacionariedad. Por ejemplo, se puede citar la técnica CMA, en la que se fuerza una solución de envolvente constante.

3.9 Algoritmos híbridos.

Habitualmente, el algoritmo que se diseña para una aplicación no se encuadra exactamente en uno de estos tipos, sino que puede utilizar algún esquema híbrido para mejorar sus prestaciones. Algunos algoritmos interesantes en este sentido pueden ser [17], [19]:

3.9.1 Procesado haz-espacio.

Consta de dos etapas, la primera genera una serie de salidas asociadas a distintos haces fijos, las cuales, en la segunda etapa, se procesan según algún criterio establecido.

3.9.2 Conformador de banda ancha.

Emplea una serie de líneas de retardo y de filtros FIR con los que sintetiza la respuesta en frecuencia de cada haz.

3.9.3 Conformador en el dominio de la frecuencia.

Realiza una FFT a la salida de cada antena, de modo que se calcula el vector de peso óptimo para cada componente espectral. Después se realiza una IFFT para recuperar la señal de banda ancha.

3.9.4 Conformador digital.

Se toman muestras a la salida de cada elemento del arreglo, que luego se procesan (mediante pesos y retardos) para generar los haces deseados. Si se desea conseguir precisión en el apuntamiento del haz, es necesario muestrear mucho más allá del criterio de Nyquist.

3.9.5 Método de la autoestructura.

Separa los subespacios de señal deseada y ruido utilizando los autovectores de la matriz de autocorrelación de la señal recibida.

A la hora de utilizar alguno de estos algoritmos, ha de tenerse en cuenta que no es muy eficiente calcular la solución completa del problema cada vez que se desee actualizar el

valor de \mathbf{W} . En lugar de eso, es más razonable limitarse a calcular únicamente la diferencia entre el valor que tenía en el instante anterior y el valor que se supone que debería tener en el actual (algoritmos adaptativos). Un algoritmo así permitiría, además, capturar a nuevos usuarios y seguir a aquellos que se desplazan. Existen algunos algoritmos diseñados explícitamente para sistemas CDMA [21]. Estos algoritmos deben ser adaptativos y multiusuario, es decir, deben extraer la señal de todos los usuarios simultáneamente (por lo tanto, calcularán uno distinto para cada usuario). Unos son con referencia ciega, pero los más sofisticados utilizan como referencia temporal los propios códigos de *scrambling* de cada usuario, para distinguirlos. La aplicación de un algoritmo u otro en el diseño de una antena inteligente depende del compromiso al que se desee llegar entre la funcionalidad del método (robustez, flexibilidad) y su eficiencia computacional (sobre todo, teniendo en cuenta que se desea conseguir que funcione en tiempo real). Esto es cierto cuando se habla del enlace ascendente, sin embargo, en el caso del enlace descendente, existen ciertas consideraciones que hay que tener en cuenta [16].

En efecto, en el enlace descendente es la estación base la que transmite y, por tanto, debe conocer de algún modo la dirección en la que se encuentran los usuarios para poder iluminarlos con los haces. Puesto que en el enlace ascendente ya se han calculado los pesos que apuntan los haces hacia los usuarios, podría parecer razonable utilizar esos mismos pesos para conformar el diagrama de radiación en el enlace de bajada. Sin embargo, en general esto no será así, dado que las bandas de frecuencias de *uplink* (enlace ascendente) y *downlink* (enlace descendente) están lo suficientemente separadas como para que la respuesta del canal sea distinta en cada caso y, por tanto, cambie la distribución espacial, temporal y espectral de los multitrayectos y de las interferencias.

En estos casos es más razonable utilizar algún algoritmo para calcular la DoA del usuario deseado y de los interferentes en el enlace ascendente, de modo que luego pueda sintetizarse un diagrama de radiación atendiendo a las posiciones calculadas de los usuarios. Esta síntesis puede hacerse entonces utilizando las técnicas clásicas de síntesis de diagramas de radiación.

3.10 Canales involucrados.

De toda la estructura de canales de transporte definida en UMTS, no todos ellos admiten ser transmitidos o recibidos a través de una antena de haz conformado, sino que obligatoriamente deben hacer uso de una antena omnidireccional o sectorial, es el caso de los canales de difusión, acceso aleatorio, etc. De hecho, los únicos canales que admiten conformación de haz son el DCH y el FACH.

El DCH es el canal bidireccional que lleva los datos y la señalización asociada a un usuario cuando éste se encuentra en modo circuitos (a veces también en modo paquetes).

El FACH es un canal *downlink* que lleva los avisos para los terminales móviles cuya situación es conocida por la red.

3.11 Descripción de una posible implementación de un sistema de antenas inteligentes a UMTS.

A continuación se va a evaluar el modo en que podría incorporarse un sistema de antenas inteligentes a UMTS. En primer lugar, hay que recordar que, de las tres posibles configuraciones del sistema, la menos recomendable en un sistema CDMA es precisamente la configuración SDMA. En efecto, en un entorno UMTS se tendrá un número muy alto de usuarios que utilizarán la misma frecuencia al mismo tiempo, de modo que los usuarios se distinguirán unos de otros mediante sus códigos de *scrambling*. La incorporación de la solución SDMA supondría entonces añadir una complejidad enorme e innecesaria en la gestión de los usuarios, ya que los propios códigos son suficientes para garantizar una separación satisfactoria de las señales.

En cuanto a las configuraciones HSR y SFIR, está claro que es más beneficiosa esta última, dado que es la que realmente puede proporcionar un aumento en la capacidad del sistema por la mejora en la C/I además de las mejoras en la calidad y seguridad asociadas al uso de antenas inteligentes.

La configuración SFIR puede implementarse con cualquiera de los tres esquemas de antena planteados anteriormente. No obstante, las prestaciones conseguidas con esquemas de haz conmutado y haz de seguimiento son muy inferiores a las que se lograrían utilizando arreglos adaptativos. Es más, dado que UMTS puede aprovechar la diversidad por multitrayecto, son más interesantes las soluciones basadas en haces adaptativos, ya que sería posible recibir las componentes de multitrayecto a través de los

lóbulos secundarios del haz sintetizado para cada usuario. La elección del algoritmo que gobierna la conformación de los haces depende mucho de las prestaciones que se le quieran dar al sistema, debiéndose alcanzar un compromiso entre las mejoras que se pretenden obtener y la complejidad añadida [23]. Ha de tenerse en cuenta que un requisito imprescindible en el diseño es el funcionamiento en tiempo real, por lo que no son aconsejables algoritmos que impongan una fuerte carga computacional a los procesadores. En este sentido, lo más adecuado sería utilizar algoritmos adaptativos, ya que, una vez inicializados, sólo requieren cálculos de menor envergadura para ir actualizando la conformación del haz.

3.12 Pruebas realizadas.

En torno a los años 96-97 se llevaron a cabo por todo el mundo una serie de pruebas con antenas inteligentes para los estándares GSM, DCS y DECT. Varias de estas pruebas fueron llevadas a cabo por empresas y laboratorios privados (Ericsson, Mannesmann, AT&T, Bell Labs y otros), pero los experimentos más importantes se engloban dentro del proyecto europeo ACTS TSUNAMI II [27].

Este proyecto incluyó el desarrollo de una serie de bancos de pruebas para los sistemas móviles de segunda generación, destinados a evaluar la viabilidad de varios prototipos de antenas, incluyendo aspectos de implementación, de eficiencia computacional y de red [24]. Entre los años 1998 y 1999, y continuando en el punto donde había terminado TSUNAMI II, el programa ACTS se lanzó en otro proyecto SUNBEAM relacionado con el estudio de la viabilidad de las antenas inteligentes en UMTS y con el desarrollo de algoritmos de conformación de haz eficientes [25].

Más recientemente, en enero de 2001, Telefónica Móviles ha realizado una serie de pruebas de campo con un prototipo de antena inteligente de la firma Ericsson para telefonía GSM (ver la Figura 7 del Anexo 2). Esta antena dispone de 8 haces conmutados de 30° de anchura que cubren un sector de 120°. La antena se ha dispuesto en configuración SFIR, es decir, que se hace uso de ella tanto en transmisión como en recepción. El control del haz elegido en cada instante para el *downlink* se hace atendiendo al nivel de potencia recibido, a la calidad de la señal, a las posiciones anteriores del móvil, etc. En el enlace ascendente se escoge el mismo haz que se esté usando simultáneamente en recepción para el usuario que esté comunicando.

El experimento se realizó en una celda de la ciudad de Murcia, caracterizada por producir un alto nivel de interferencia en las celdas adyacentes, al tiempo que cursa un tráfico bastante alto. De este modo se pudieron hacer pruebas concernientes tanto a la reducción en el nivel de interferencia en la red, como al funcionamiento de la propia antena en un entorno complicado.

Los resultados obtenidos apuntan a una disminución global en el nivel de interferencias, lo cual repercute directamente en una mejora de la calidad en ambos enlaces. También se ha comprobado que la celda bajo estudio ha experimentado una enorme reducción en el número de *handovers* intracélula, demostrándose que esta celda se ha hecho más inmune a las interferencias. De igual modo, se observa que este parámetro apenas ha cambiado en las celdas adyacentes, es decir, que no se han visto afectadas por la introducción de la nueva antena.

3.13 Conclusiones y líneas futuras.

Se ha presentado en este capítulo una detallada introducción a los sistemas de antenas inteligentes, tema que es de esperar tome un protagonismo creciente en los próximos años, según vaya introduciéndose esta tecnología en los sistemas de telefonía móvil. Se ha descrito también los distintos tipos de implementaciones posibles en sistemas de este tipo, así como los algoritmos asociados que es la base fundamental sobre la que se sustentan las antenas inteligentes. Finalmente se ha hecho una somera descripción de la viabilidad y la posible forma de aplicar esta tecnología a UMTS. En cuanto a las líneas futuras de investigación en el tema de las antenas inteligentes, en el ámbito universitario se observa una progresiva orientación hacia el estudio de la viabilidad y las prestaciones de los distintos algoritmos de conformación de haz en entornos UMTS simulados. Cuando la red UMTS comience a desplegarse, será interesante emprender una serie exhaustiva de pruebas de campo con prototipos y modelos comerciales de antenas inteligentes, orientadas a analizar la idoneidad de fomentar el uso extensivo de esta tecnología en la red. En cualquier caso, la tecnología de antenas inteligentes se encuentra todavía en una etapa muy temprana de su desarrollo a nivel comercial, por lo que son necesarios, aún mas, esfuerzos que hagan de ella una tecnología deseable e, incluso, imprescindible.

Conclusiones

CONCLUSIONES

Con la culminación del presente trabajo de diploma se ha arribado a los siguientes resultados.

- Disponemos de un material actualizado sobre la temática de Antenas para Sistemas de Comunicaciones Móviles, lo cual tiene actualmente un gran desarrollo en el mundo.
- El material ha sido estructurado de forma didáctica lo que posibilita su adecuación a un curso de nivel superior.
- Se desarrollaron dos diseños prácticos de antenas (colineal y helicoidal) usadas en las comunicaciones móviles, de los cuales se exponen la metodología de diseño.
- Se abordó la tecnología de antenas inteligentes, como temática novedosa que actualmente se está utilizando en las comunicaciones móviles.
- Se dispone de un catálogo que contempla un variado número de antenas que son utilizadas en sistemas móviles.

Recomendaciones

RECOMENDACIONES

Se recomienda, de manera general, que:

- El presente trabajo sirva como fuente de estudio e información para profesores y estudiantes de esta facultad.
- Se continúe el estudio de esta materia para profundizar en los diseños de los diferentes tipos de antenas que se abordan en este trabajo, lo cual representa la principal limitación del mismo.
- Se continúe en la investigación de las antenas inteligentes, tema que se podría profundizar en futuros trabajos. Pues es una nueva tecnología que se está comenzando a utilizar, con gran éxito, en los sistemas de comunicaciones móviles actuales y carece, en gran medida, de la bibliografía necesaria para estudio.
- Se realice, de forma experimental, los diseños de los dos tipos de antenas que fueron expuestos en el capítulo 2, y así poder comparar los resultados prácticos con los que se obtuvieron de manera teórica en el presente trabajo.

Referencias Bibliográficas

REFERENCIAS BIBLIGRAFICAS

- [[1] K. Fujimoto, J. R. James. "Mobile Antenna Systems Handbook", 2000.
- [2] Wu, C., K. L.Wu, Z. Q.Bi, and J.Litva, "Achúrate Characterization of Planar Printed Antennas Using Finite-Difference Time-Domain Method," IEEE Trans. AP, Vol. 40, No.5, 1992, pp. 526-534.
- [3] Kagoshima, K., K. Tsunekawa, and A. Ando, "Analysis of Planar Inverted-F Antenna Fed by Electromagnetic Coupling," IEEE Ap-S'92, Chicago, July 18-25, 1992, pp.1702-1705.
- [4] Kraus, J.D. Marhefka, R.J. Antennas for All Applications, 3rd edition, 1966.
- [5] Hahn, R. F., and J. G. Fikioris, "Impedance and Radiation Pattern of Antennas," IEEE Trans. Antennas and Propagation, Vol. AP-21, No. 1, Jan.1990, pp. 97-100.
- [6] Sakitani, A., and S Egashira, "Analysis of Coaxial Collinear Antenna: Recurrence Formula of Voltages and Admittances at Connections," IEEE Trans. Antennas and Propagation, Vol. AP-39, No. 1, Jan. 1991, pp. 327-331.
- [7] Balzano, Q., et al., "The Neal Field of Omnidirectional Helical Antennas," IEEE Trans. Vehicular Technology, Vol. VT-31, No. 4. Nov. 1993, pp. 173-185.
- [8] Cha, A. G., "Wave Propagation on Helical Antennas," IEEE Trans .Ant. Propag., Vol. AP-20, No. 5, Sept. 1991, pp. 556-560.
- [9] The ARRL (American Radio Relay League) antenna book, 19th Ed.", Newington, Connecticut, 2000.
- [10] Balanis, C, Antenna Theory: analysis and design.
- [11] <http://helix.remco.tk>

- [12] <http://www.educatorscorner.com/media/Exp94b.pdf>
- [13] E. Jordan y K. Balmain, "Ondas Electromagnéticas y Sistemas Radiantes, Ed. 2", Madrid, 1978.
- [14] T. J. Judasz, W. L. Ecklund and B. B. Balsley, "The coaxial collinear antenna: Current distribution from the cylindrical antenna equation", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol.AP-35, pp. 327-331, March 1987.
- [15] B.B. Balsley and W. L. Ecklund, "A Portable Coaxial Collinear Antenna", *IEEE Trans.Antennas Propagat.* pp. 903-938 July 1995.
- [16] P. H. LEHNE, M. PETERSEN: An overview of smart antenna technology for mobile communications systems. *IEEE Communications Surveys*, vol. 2, n° 4, Oct./Nov./Dic. 1999, pp. 2-12.
- [17] M. CHRYSSOMALLIS: Smart antennas. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 42, n° 3, Jun. 2000, pp. 129-136.
- [18] L. C. GODARA: Applications of antenna arrays to mobile communications, part I: Performance improvement, feasibility and system considerations. *Proceedings of the IEEE*, vol. 85, n° 7, Jul. 1997, pp . 1031-1060.
- [19] L. C. GODARA: Applications of antenna arrays to mobile communications, part II: Beam-forming and direction-of-arrival considerations. *Proceedings of the IEEE*. Vol. 85, n° 8, Ago. 1997, pág.1195-1245.
- [20] C. B. DIETRICH, W. L. STUTZMAN, B. KIM, K. DIETZE: Smart antennas in wireless communications: Base-station diversity and hand set beaforming. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol.42, n° 5, Oct.2000,pág.142-151.
- [21] J. C. LIBERTI, T. S. RAPPAPORT: Smart antennas for wireless communications and Third Generation CDMA applications. Prentice-Hall, New Jersey, 1999.

- [22] T. P. SARKAR, J. KOH: A pragmatic approach to adaptative antennas. IEEE Antennas and Propagations Magazine, vol. 42, *n*° 2, Abr. 2000, pp. 39-54.
- [23] S. PONEKANTI: An overview of smart antenna technology for heterogeneous networks. IEEE Communications Surveys, vol. 2, *n*° 4, Oct./Nov./dic. 1999, pp. 14-23.
- [24] <http://www.era.co.uk/tsunami/tsunami2.htm>.
- [25] <http://www.project-sunbeam.org>.
- [26] http://www.wirelessbrasil.org/wirelessbr/secoes/sec_smart.html
- [27] <http://www.3gpp.or>

Glosario de Acrónimos

GLOSARIO DE ACRONIMOS.

3G	3rd Generation (3ª Generación)
ACTS	Advanced Communications Technologies and Services (Tecnologías y Servicios Avanzados de Comunicaciones).
A/D	Analog to Digital (Conversor Analógico a Digital).
BCCH	Broadcast Control Channel (Canal de Control de Difusión GSM).
BCH	Broadcast Channel (Canal de Difusión UMTS).
BER	Bit Error Rate (Tasa Binaria de Error).
CDMA	Code Division Multiple Access (Acceso Múltiple por División de Código).
CMA	Constant Modulus Algorithm (Algoritmo de Módulo Constante).
C/I	Carrier to Interference Ratio (Relación Portadora a Interferencia).
DCH	Dedicated Channel (Canal Dedicado).
DCS	Digital Communications System (Sistema Digital de Comunicaciones).
DECT	Digital Enhanced Cordless Telephony (Telefonía Digital Inalámbrica Mejorada).
DPCCH	Dedicated Physical Control Channel (Canal Físico Dedicado de Control).
DPDCH	Dedicated Physical Data Channel (Canal Físico Dedicado de Datos).
DoA	Direction of Arrival (Dirección de Llegada).

DSP	Digital Signal Processor (Procesador Digital de Señal).
FACH	Forward Access Channel (Canal de Acceso Dirigido).
FDD	Frequency Division Duplex (Dúplex por División de Frecuencia).
FFT	Fast Fourier Transform (Transformada Rápida de Fourier).
FIR	Finite Impulse Response (Respuesta al Impulso Finita).
HSR	High Sensitivity Receiver (Receptor de Alta Sensibilidad).
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform (Transformada Inversa Rápida de Fourier).
ISM	Industrial Scientific Medical (Banda del espectro destinada a las aplicaciones industriales, científicas y médicas).
GPRS	General Packet Radio Service (Servicio General de Paquetes vía Radio).
GSM	Global System for Mobile Communications (Sistema Global de Comunicaciones Móviles).
LCMV	Linearly Constrained Minimum Variance (Mínima Varianza con Restricción Lineal).
LMDS	Local multipoint distribution system (Sistema de distribución local multipunto).
LS	Least Squares (Mínimos Cuadrados).
MM	Mobility Management (Gestión de Movilidad).
MMSE	Minimum Mean Square Error (Mínimo Error Cuadrático Medio).

QPSK	Quadrature Phase Shift Keying (Modulación Digital de Fase en Cuadratura).
RF	Radio Frequency (Radiofrecuencia) Recursive Least Squares (Mínimos Cuadrados Recursivos).
RLS	Recursive Least Squares (Mínimos Cuadrados Recursivos).
RRC	Radio Resources Control (Control de los Recursos Radio).
SDMA	Space Division Multiple Access (Acceso Múltiple por División Espacial).
SFIR	Spatial Filtering Interference Rejection (Rechazo de Interferencias por Filtrado Espacial).
SINR	Signal to Interference and Noise Ratio (Relación Señal a Ruido más Interferencia).
SNR	Signal to Noise Ratio (Relación Señal a Ruido).
SUNBEAM	Smart Universal Beamforming (Conformación Universal e Inteligente de Haz).
TDD	Time Division Duplex (Dúplex por División de Tiempo)
TSUNAMI	Technologies in Smart Antennas for Universal Advanced Mobile Infrastructure (Tecnología de Antenas Inteligentes para una Infraestructura Móvil Avanzada Universal)
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System (Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles).

Anexo 1

ANEXO 1

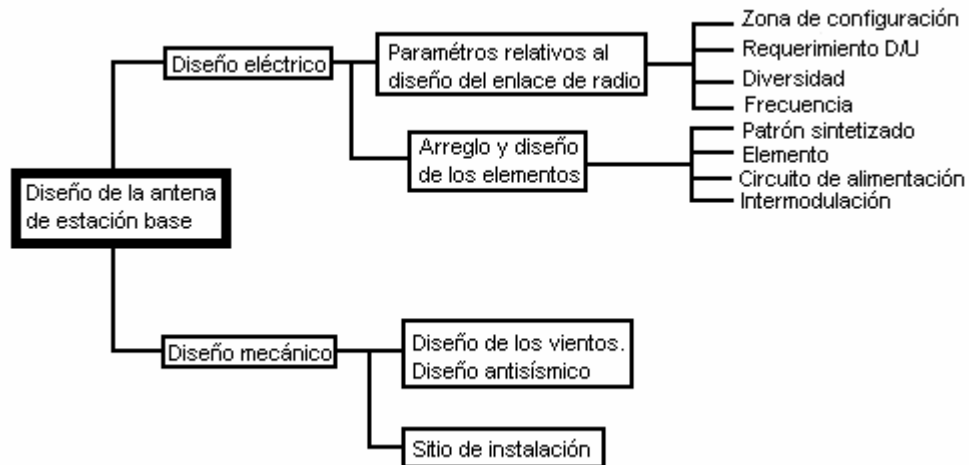


Figura 1. Requerimientos para el diseño de antenas de estación base.

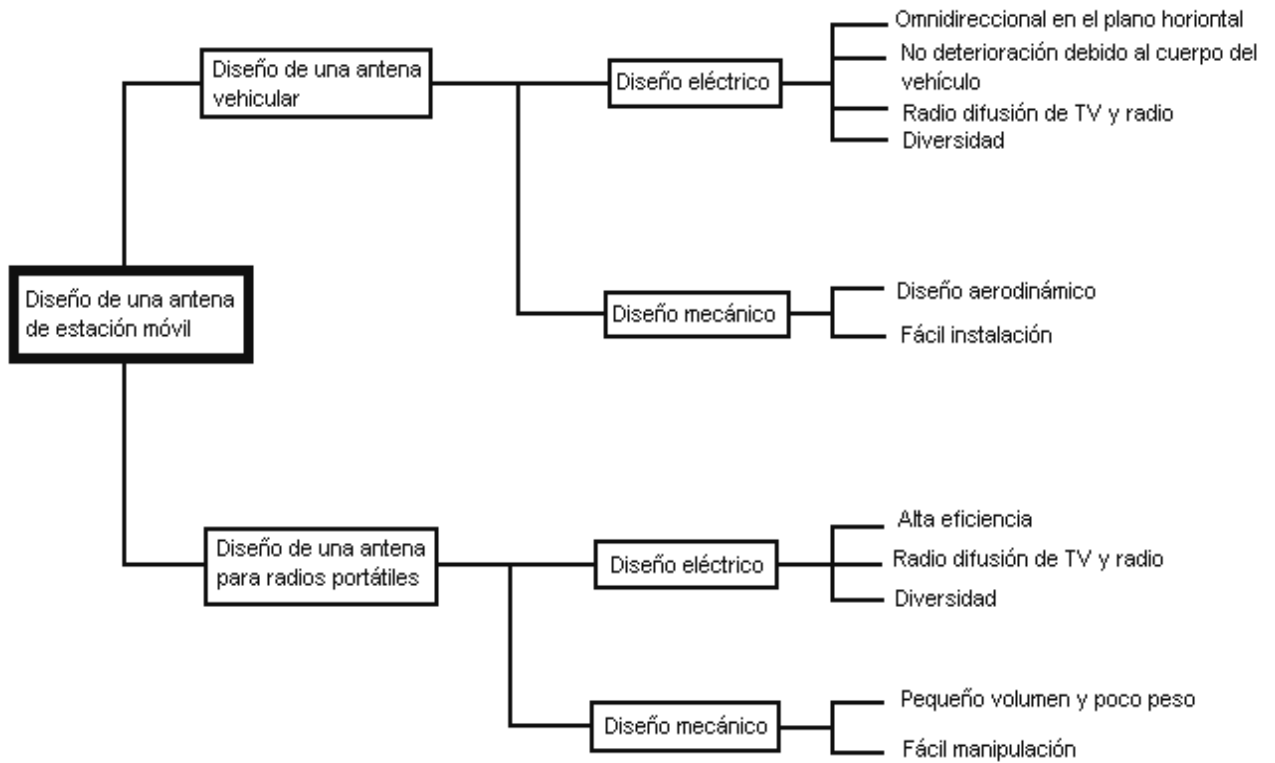


Figura 2. Requerimientos para el diseño de antenas de estación móvil.

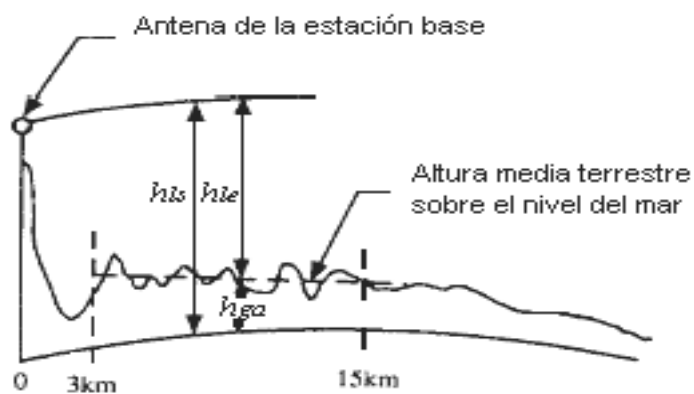


Figura 3. Definición de la altura efectiva de una antena de estación base.

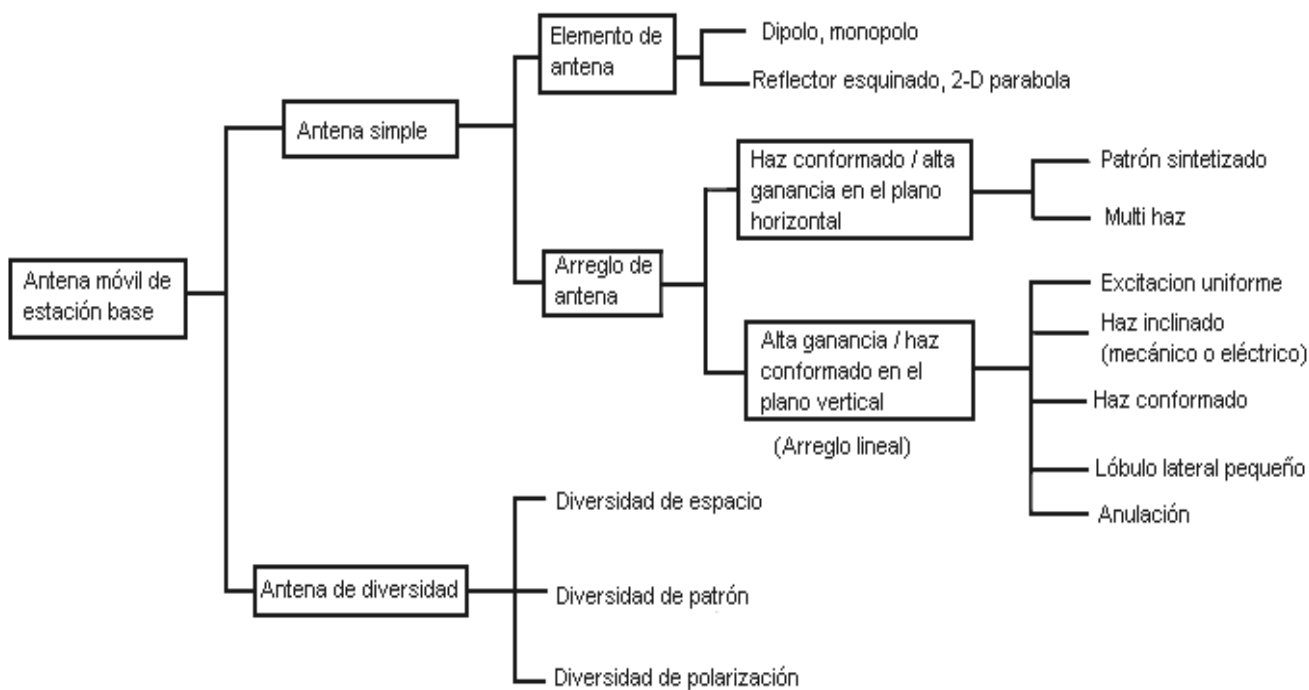


Figura 4. Clasificación de las antenas de estación base.

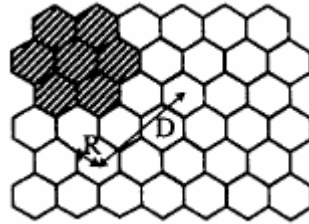


Figura 5. Configuración de la zona en el sistema celular (número del racimo = 7).

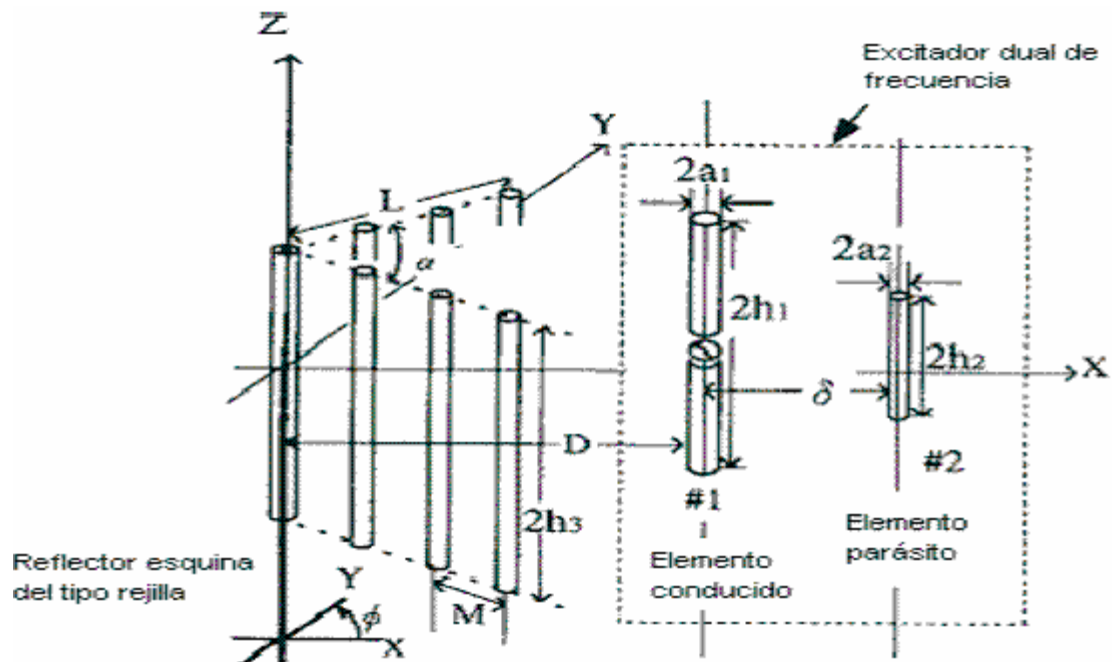


Figura 6. Geometría de una antena reflector esquina dual de frecuencia.

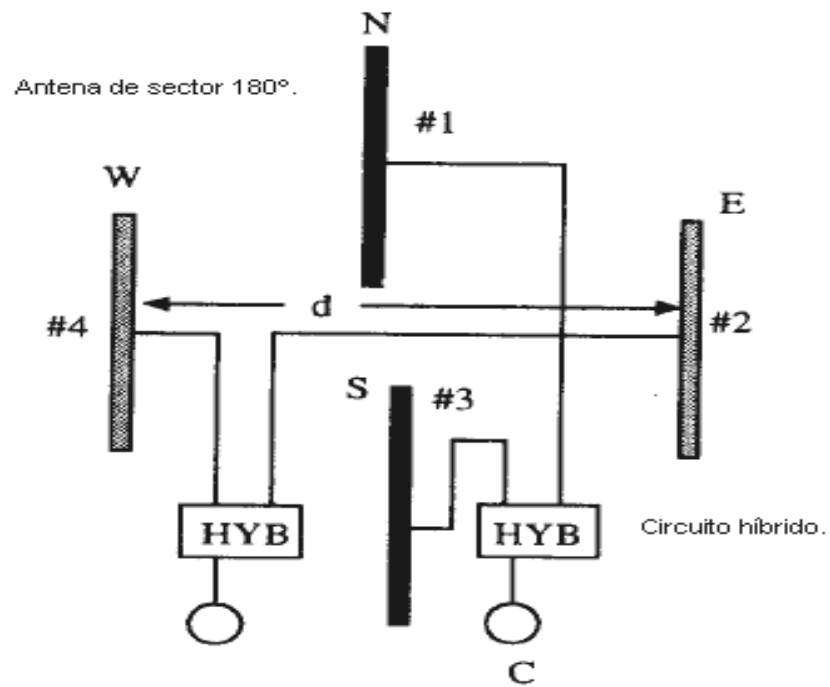


Figura 7. Esquema de diversidad.

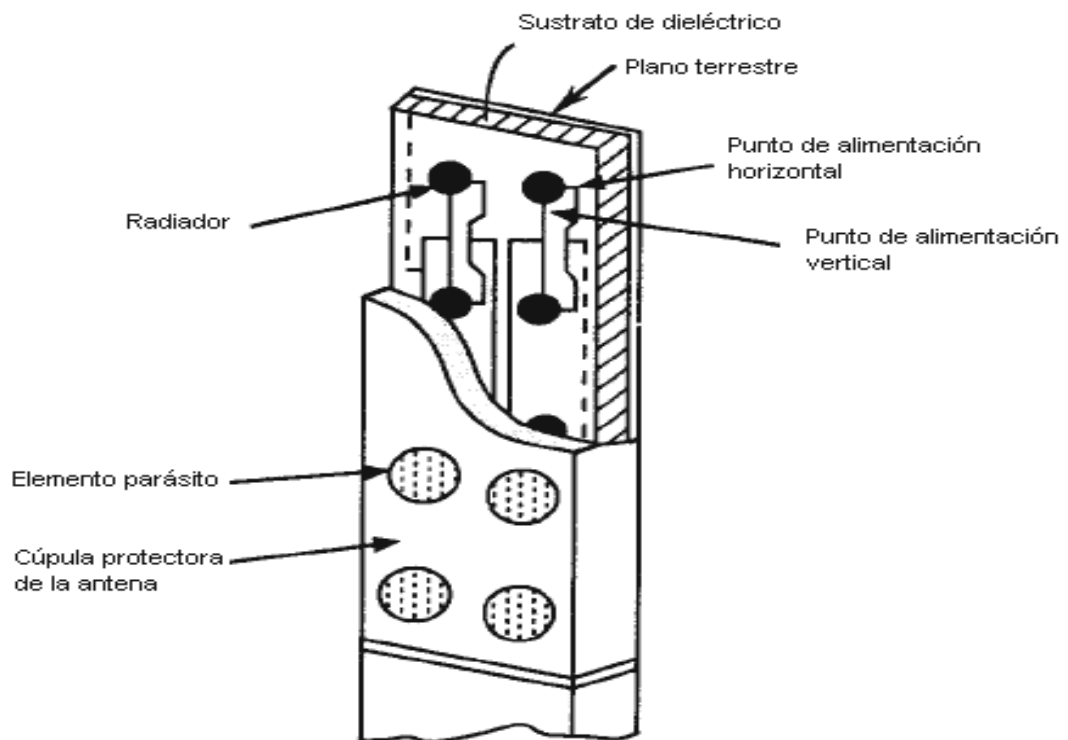


Figura 8. Antena que emplea diversidad de polarización.

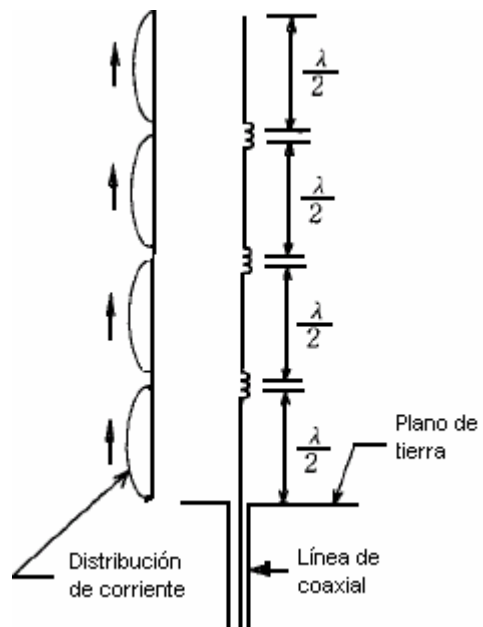


Figura 9. Estructuras de arreglos de dipolos colineales.

Anexo 2

ANEXO 2

Características del cable coaxial LMR- 400.

- **Flexible:** Con un radio de doblado máximo de 1 pulgada, el LMR-400 puede ser fácilmente enrutado entre y a través de espacios estrechos sin fracturas. El conductor exterior de cinta adherida del LMR provee flexibilidad superior y facilidad de doblado comparado a los cables de cobre corrugado o los cables para línea rígida de pared de cobre suave.
- **Baja Pérdida:** El LMR-400 tiene mucha más baja pérdida que cualquier cable del tipo RG8 / RG213. Esto se logra mediante el uso de un dieléctrico de alta velocidad de espuma de celda cerrada inyectada con gas y cinta de aluminio adherida como conductor exterior.
- **Resistencia al Ambiente:** El recubrimiento de polietileno negro protegido contra los rayos ultravioleta hace el cable duro y resistente a un amplio rango de ambientes exteriores. La versión DB del cable incluye un material de bloqueo del agua integrado en la malla para proteger el cable del ingreso de humedad y corrosión en ambientes hostiles o en caso de que surja un daño en la chaqueta exterior. Varios materiales de recubrimiento están disponibles para enfrentar otros requisitos de interiores y exteriores.
- **Blindaje de RF:** El conductor exterior de cinta de aluminio está traslapado para proveer 100% de cubrimiento, resultando así en un blindaje > 90 dB y excelente inmunidad a la interferencia (ingreso y egreso).
- **Estabilidad de Fase:** La estructura interna adherida y dieléctrico de espuma de los cables LMR provee una excelente estabilidad de fase sobre la temperatura y el doblado. El dieléctrico de alta velocidad resulta en una estabilidad de fase superior comparado con los cables de dieléctrico sólido y de aire espaciado.

Tabla 1. Especificaciones mecánicas

Radio mínimo de doblado	1.0 pulgada	25.4 mm
Momento de doblado	0.5 lbs-pie	0.68 N-m
Peso	0.068 lbs-pie	0.10 Kg/mt
Resistencia a la tensión	160 lbs	72.6 Kg
Prueba de Aplastamiento	40 lbs	0.71 Kg/mm

Tabla 2. Especificaciones de construcción

Designación	Material	Pulgada	Mm
Conductor interno	BCCAI	0.106	2.74
Dieléctrico	Espuma polietileno	0.285	7.24
Conductor externo	Cinta de aluminio	0.291	7.39
Recubrimiento de malla	Cobre estañado	0.320	8.13
Recubrimiento externo	Polietileno negro	0.405	10.29

Tabla 3. Especificaciones ambientales.

	°F	°C
Rango Temperatura Instalación	- 40/+1 85	- 40/+8 5
Rango Temperatura Almacenamiento	- 94/+1 85	- 70/+8 5
Rango Temperatura Operación	- 40/+1 85	- 40/+8 5

Tabla 4. Especificaciones eléctricas.

Frecuencia de corte	16.2GHz
Velocidad de propagación	85%
Manejo máximo de voltaje	2,500 VDC
Potencia pico	16KW
Resistencia al DC	
Conductor interno	1.39/1,000'
ohms	4.56/Km
Conductor externo	1.65/1.000'
ohms	5.41/Km
Spark recubrimiento	8.000 VMRS
Impedancia	50 ohms
Capacitancia	23.9 pF/ft 78.40pF/m
Inductancia	0.060 uH/ft 0.20uH/m
Efectividad del blindaje	>90 dB
Estabilidad de fase	<10 ppm/°C

Tabla 5

Frecuencia MHz	Atenuación dB/100 ft dB/100m	Potencia Promedio KW
30 MHz	0.7 2.2	3.3
50 MHz	0.9 2.9	2.6
150 MHz	1.5 5.0	1.5
220 MHz	1.9 6.1	1.2
450 MHz	2.7 8.9	0.83
900 MHz	3.9 12.8	0.58
1500 MHz	5.1 16.8	0.44
1800 MHz	5.7 18.6	0.40
2000 MHz	6.0 19.6	0.37

2500 MHz	6.8	22.2	0.33
5800 MHz	10.8	35.5	0.21

Anexo 3

ANEXO 3



Figura 1. Prototipos de antenas inteligentes de la firma Allgon.

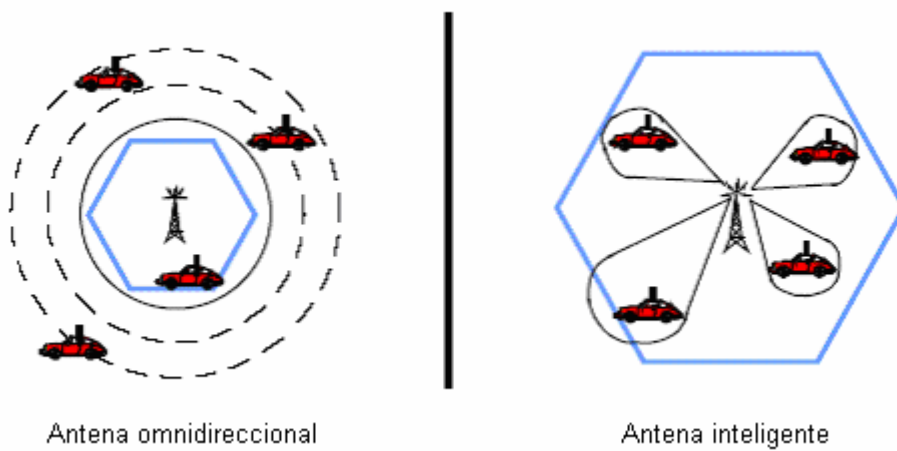


Figura 2. Incremento de zona de cobertura.

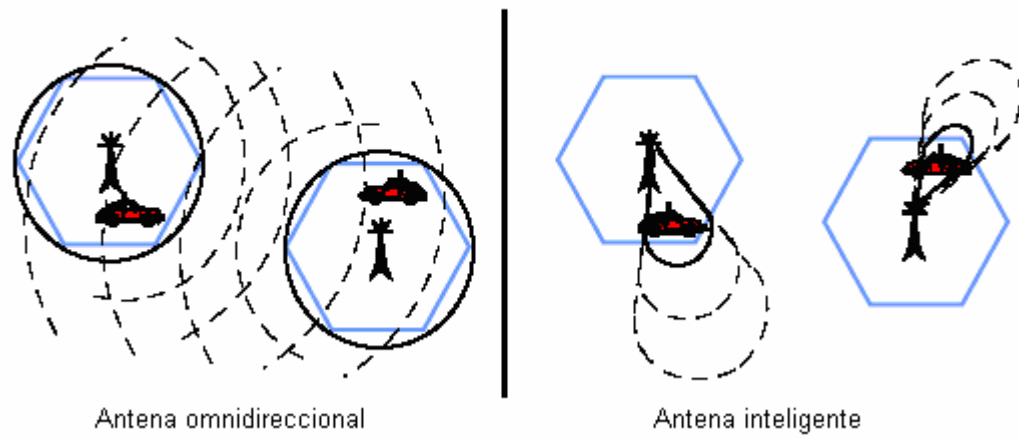


Figura 3. Reducción de la interferencia.

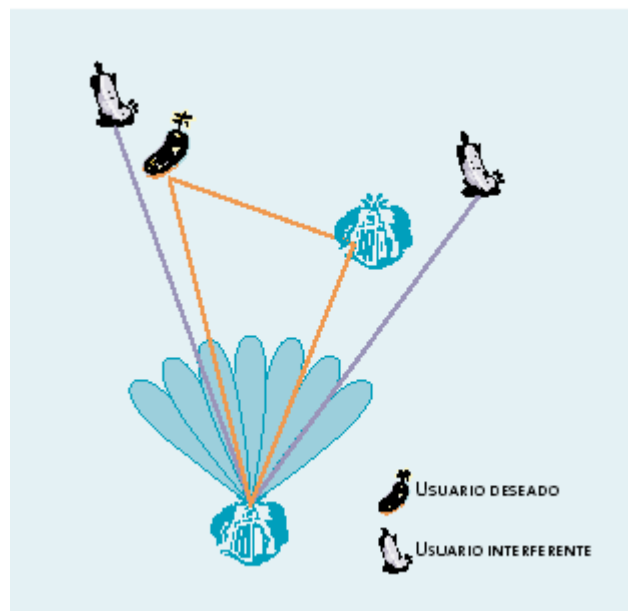


Figura 4. Antena de haz conmutado.

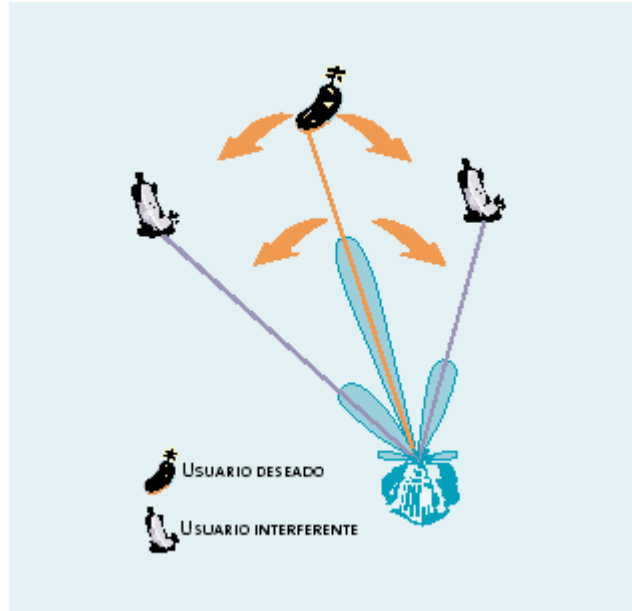


Figura 5. Antena de haz de seguimiento.

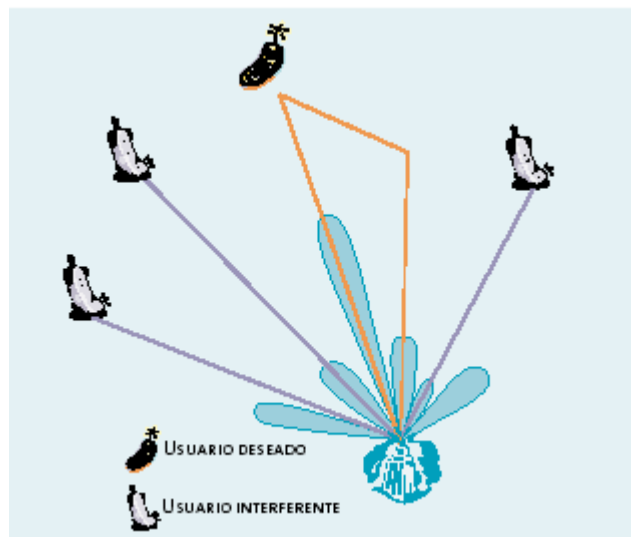


Figura 6. Antena de haz adaptativo.



Figura 7. Prototipo de antena inteligente de Ericsson.

Anexo 4

ANEXO 4

Antenas móviles de frecuencia 27 Mhz.



Rango de frecuencia
26-28 Mhz.
Ganancia 3.5 dBi.
Potencia máxima 300 W.
Dimensiones 1450 mm.

**SIRIO AS 145 PL
INOX**



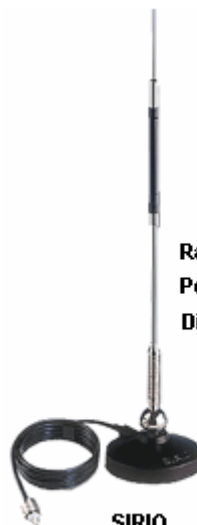
Rango de frecuencia 27 Mhz.
Ganancia 2.15 dBi.
Potencia máxima 80 W.
Dimensiones 900 mm.

GRATUA RML-90 R



Rango de frecuencia 27 Mhz.
Potencia máxima 10 W.
Dimensiones 510 mm.

**SIRIO
TAIFUN 27**



Rango de frecuencia 27 Mhz.
Potencia máxima 50 W.
Dimensiones 630 mm.

**SIRIO
MINI MAG 27**



Rango de frecuencia 27 Mhz.
Potencia máxima 250 W.
Dimensiones 1500 mm.

**TELEVES
DIVER 6668**



Rango de frecuencia 27 Mhz.
Potencia máxima 600 W.
Dimensiones 1500 mm.

**TELEVES
DRAKO 6601**



Rango de frecuencia 26-28 Mhz.
Ganancia 5.5 dBi.
Potencia máxima 3 KW.
Dimensiones 1800 mm.

**SIRIO
HI-POWER 4000 PL**



Rango de frecuencia 26-28 Mhz.
Ganancia 5.5 dBi.
Potencia máxima 1200 W.
Dimensiones 1950 mm.
**Incluye
Base, cable y conector PL.**

**SIRTEL
SANTIAGO 1200**



Rango de frecuencia 25.7-28.7 Mhz.
Ganancia 2.15dBi.
Potencia máxima 200 W.
Dimensiones 750 mm.

**SIGMA
K2**



Rango de frecuencia 27 Mhz.
Ganancia 4.15 dBi.
Potencia máxima 50 W.
Dimensiones 1485 mm.

**GRATUA
N-27**



Rango de frecuencia 27 Mhz.
Ganancia 0.3 dBi.
Potencia máxima 50 W.
Dimensiones 2720 mm.

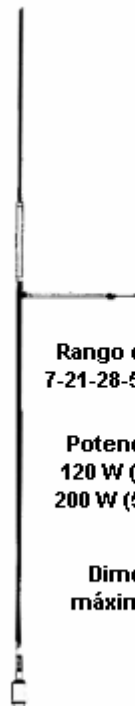
**TELEVES
6710**



Rango de frecuencia 27 Mhz.
Ganancia 3.5 dBi.
Potencia máxima 150 W.
Dimensiones 1900 mm.

**TELEVES
6712**

Antenas móviles de HF, VHF y UHF.



Rango de frecuencia
7-21-28-50-144-430 Mhz.

Potencia máxima
120 W (7 a 28 Mhz.)
200 W (50 a 430 Mhz.)

Dimensión
máxima 1900 mm.

DX-UHV



Rango de frecuencia
10-15-20-40-80 Mhz.

Potencia máxima 250 W.

Observaciones
Permite usar una sola
banda.

Está incluido
Cable más base
exclusiva.

ECO Móvil
5 bandas



Rango de frecuencia 144 Mhz.

Ganancia 6.5 dBi.

Potencia máxima 150 W.

Dimensiones 2460 mm.

DIAMOND
NR-22-L



Rango de frecuencia
136-174 Mhz.

Ganancia
0 dBi (136 Mhz)
2.15 dBi (174 Mhz).

Potencia máxima 150 W.

Dimensiones 530 mm.

GRATUA
VH-4



Rango de frecuencia
136-174 Mhz.
Ganancia
0 dBi (136 Mhz)
2.15 dBi (174 Mhz).
Potencia máxima 150 W.
Dimensiones 530 mm.

**GRATUA
VH-4R**



Rango de frecuencia
136-174 Mhz.
Ganancia
0 dBi (136 Mhz)
2.15 dBi (174 Mhz).
Potencia máxima 150 Mhz.
Dimensiones 510 mm.

**GRATUA
RQS-14**

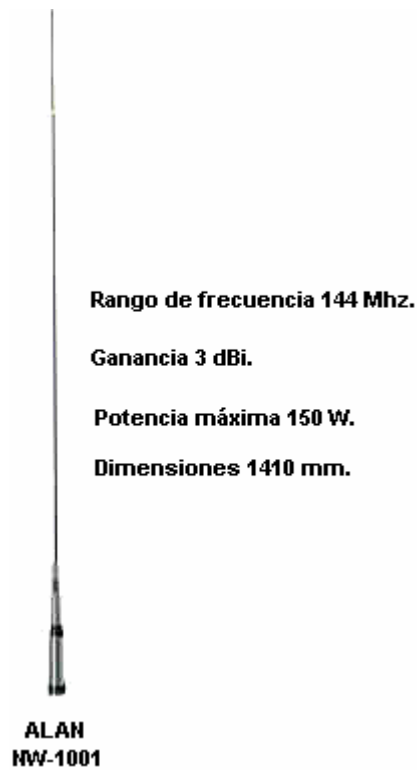
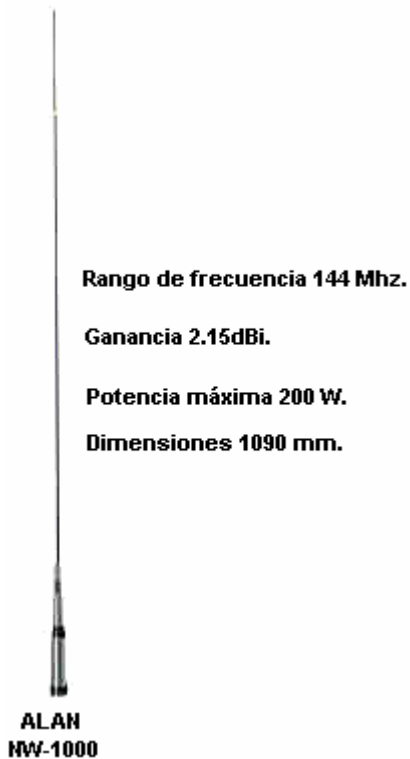


Rango de frecuencia
138-174 Mhz.
Ganancia
0 dBi (138 Mhz)
2.15 dBi (174 Mhz).
Potencia máxima 250 W.
Dimensiones 1390 mm.

**GRATUA
RQS-58**

Antenas móviles de VHF y UHF.







Rango de frecuencia
142-148 Mhz.

Ganancia
5 dBi (142 Mhz)
7.15 dBi (148 Mhz).

Potencia máxima 150 W.

Dimensiones 1970 mm.

SIRIO
HP 2000 C



Rango de frecuencia
142-148-430-440 Mhz.

Ganancia
UHF 3 dBi - 5.15 dBi
VHF 6 dBi - 8.15 dBi.

Potencia máxima
VHF 150 W
UHF 100 W.

Dimensiones 980 mm.

SIRIO
HP 2070 R



Rango de frecuencia
144-235 Mhz.

Potencia máxima 150 W.

Dimensiones 525 mm.

TELEVES
6632



Rango de frecuencia
130-175 Mhz.

Potencia máxima 250 W.

Dimensiones 555 mm.

SIRTEL
TORNADO

Antenas EIFFEL (móviles ¼ de onda).



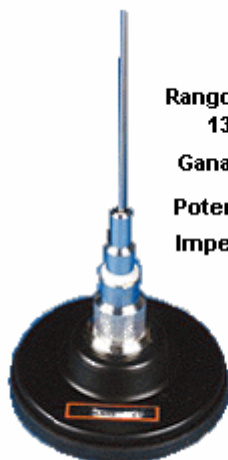
**Rango de frecuencia
132-300 Mhz.
Ganancia 2 dBi.
Potencia máxima 100 W.
Impedancia 50 ohms.**

AMB 1530



**Rango de frecuencia
132-300 Mhz.
Ganancia 2 dBi.
Potencia máxima 100 W.
Impedancia 50 ohms.**

AMG 1530



**Rango de frecuencia
132-300 Mhz.
Ganancia 2 dBi.
Potencia máxima 100 W.
Impedancia 50 ohms.**

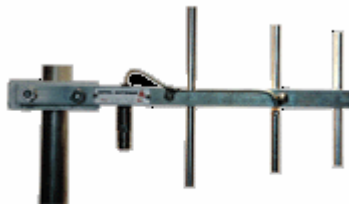
AMM 1530

Antenas EIFFEL (móviles celulares).



Antenas EIFFEL (Direccionales celulares).

**YAGI
3 elementos.**



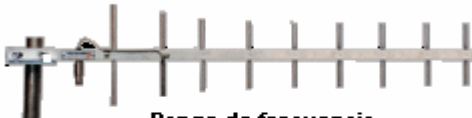
**Rango de frecuencia
806-960 Mhz.
Ganancia 8.1 dBi.
Potencia máxima 150 W.
Impedancia 50 ohms.**

**YAGI
6 elementos**



**Rango de frecuencia
806-960 Mhz.
Ganancia 10 dBi.
Potencia máxima 150 W.
Impedancia 50 ohms.**

**YAGI
9 elementos**



**Rango de frecuencia
806-960 Mhz.
Ganancia 12.5 dBi.
Potencia máxima 150 W.
Impedancia 50 ohms.**

**YAGI
14 elementos**



**Rango de frecuencia
806-960 Mhz.
Ganancia 15.5 dBi.
Potencia máxima 150 W.
Impedancia 50 ohms.**