

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **ESCUELA DE INGENIERÍA**

### **ESTUDIO DE ANTENAS INTELIGENTES, PRINCIPALES APLICACIONES EN LOS SISTEMAS DE TELEFONÍA MÓVIL**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN  
ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**ENRÍQUEZ POLIT OSCAR ORLANDO  
MORALES AVILA JUAN PAULO**

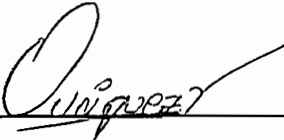
**DIRECTOR: INGENIERO PATRICIO ORTEGA CARRERA**

**Quito, Marzo 2005**

## DECLARACIÓN

Nosotros, Enríquez Polit Oscar Orlando y Morales Avila Juan Paulo, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.



---

Enríquez Polit Oscar Orlando



---

Morales Avila Juan Paulo

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Enríquez Polit Oscar Orlando y Morales Avila Juan Paulo, bajo mi supervisión.



---

Ing. Patricio Ortega Carrera  
**DIRECTOR DEL PROYECTO**

## AGRADECIMIENTO

Esta página es para nosotros de suma importancia, pues según nuestra opinión, toda persona se debe dar el tiempo para agradecer a quienes han sido importantes en la obtención de sus logros.

Agradecemos a Dios, por el amor y la misericordia que ha vertido sobre nosotros, dándonos fe, fortaleza y esperanza para no desmayar. Gracias Señor, pues esta victoria es tuya y te la debemos a ti.

A la Escuela Politécnica Nacional, por su labor de impartir el conocimiento, formando profesionales de alta calidad, honestos y responsables, ceñidos a la ética y comprometidos con el progreso del país. Gracias querida universidad.

Al Ingeniero Patricio Ortega Carrera, por apoyarnos desde un principio en la elaboración de este proyecto. Le agradecemos su amabilidad, cooperación y todas las atenciones que ha tenido con nosotros. Gracias por su disposición y paciencia.

A nuestras familias, por su apoyo y colaboración; factores sin los cuales no hubiésemos podido culminar este proyecto.

A nuestros profesores, compañeros y amigos que han compartido angustias y gratificaciones en todos estos años de estudio, a todos ellos gracias.

Finalmente agradecemos a todas aquellas personas que de alguna manera hicieron posible la terminación de este proyecto de titulación. Gracias a todos.

## DEDICATORIA

Deseo dedicar este trabajo a DIOS, por haberme bendecido para culminar con éxito el presente proyecto de titulación. Me ha dado fortaleza para vencer todas las dificultades presentadas en el camino, estando conmigo todos los días, guardándome de todo mal.

Dedico a mis Padres, por ser un verdadero ejemplo de superación, por enseñarme que con trabajo y esfuerzo se pueden alcanzar las metas y sueños más remotos que uno anhela lograr; sobre todo por su gran amor y por darme la mejor educación en el ámbito intelectual, espiritual y humano. Gracias por ser mis mejores amigos, gracias por creer en mí. Les amo.

A Ximenita, por su apoyo incondicional, por prestarme su hombro en los momentos tristes, y darme un abrazo en los momentos de felicidad. Por sus consejos siempre acertados. Y las muchas situaciones que hemos vivido juntos, ñañita te quiero; que DIOS te bendiga.

A la Familia Morales – Mera, por todo el apoyo que me brindaron, por ser parte importante en mi vida, por ser excelentes amigos y ayudarme en los momentos difíciles; tal vez, olvidé decirles todo lo que siento por ustedes. Les quiero y aprecio mucho, amigos nunca los olvidare. Gracias por todo, que DIOS bendiga siempre su hogar.

A Juan Morales, por ser un excelente amigo y compañero de tesis, por su gran ayuda y optimismo, los que te conocen saben de tus cualidades como persona, amigos como tú hay pocos. Gracias amigo Juanito.

Dedico este trabajo a mis amigos por ser un apoyo constante en mis actividades, por compartir muchos momentos agradables, cada uno de ustedes saben lo que representan para mí.

“Un amigo verdadero es el mayor de todos los bienes y de todos ellos es el que menos pensamos adquirir” (Balzac).

.\_ Oscar Orlando Enríquez Polit

## DEDICATORIA

A DIOS, que en su infinito amor y misericordia, me ha dado la fe y la fortaleza para alcanzar la meta. Te amo Señor, por que tu gracia y tu fidelidad siempre me han sostenido. Gracias por no dejarme ni un solo instante; por haberme traído hasta aquí y por que sé que mucho más allá me llevarás.

A Hernán y Laura, mis padres, que con amor y sacrificios, paciencia y dedicación han sembrado en mi vida: honestidad, sinceridad y el anhelo de superación, virtudes sin las cuales no hubiese podido alcanzar el éxito. Gracias por reír y llorar junto a mí, por creer en mí y por haberme dado la mejor heredad que un padre puede dar a sus hijos: el estudio. Gracias por existir; los amo.

A mi esposa Silvia y a mi hijo, que con paciencia y comprensión, supieron darme ánimo en los momentos más difíciles, sin dejar que me rindiera; los amo.

Y por último, pero no menos importante, a mis amigos: Franklin, Fabián, Oscar y Mary, por ser instrumentos que Dios puso en mi camino para que pudiese alcanzar esta meta, no tienen idea de la ayuda y el apoyo que han significado; gracias.

Definitivamente, sin el amor, el apoyo y la paciencia de todos ellos este proyecto no hubiera podido llevarse a cabo. Es cierto que debemos ser fuertes e independientes, pero sin seres con quienes podamos compartir los momentos agradables, y que además nos alivien el peso de los momentos difíciles, los humanos no podríamos salir adelante. A todos les dedico el esfuerzo que ha representado la realización y la culminación de este proyecto, son una bendición que DIOS a dado a mí vida.

.\_ Juan Paulo Morales Avila

## CONTENIDO

Carátula	i
Declaración	ii
Certificación	iii
Agradecimiento	iv
Dedicatoria	v
Contenido	vii
Resumen	xx
Presentación	xxii

## CAPÍTULO 1

### PRINCIPIOS FUNDAMENTALES DE ANTENAS

<b>1.1 Definición</b>	<b>3</b>
<b>1.2 Radiación</b>	<b>4</b>
<b>1.3 Parámetros generales de antenas – definiciones de conceptos</b>	<b>6</b>
1.3.1 Impedancia ( $Z$ )	6
1.3.2 Reciprocidad	7
1.3.3 Diagrama de radiación	7
1.3.3.1 Antenas omnidireccionales	7
1.3.3.2 Antenas directivas	8
1.3.4 Directividad	10
1.3.5 Polarización	10
1.3.6 Ancho de banda	10
1.3.7 Eficiencia	11
1.3.8 Campos cercanos y lejanos	11
1.3.9 Ganancia de una antena	12
1.3.10 Ancho del haz de la antena	13
1.3.11 Ángulo de radiación ( $r$ )	13
1.3.12 Abertura efectiva ( $A$ )	14
1.3.13 Adaptación	14
1.3.14 Resistencia de radiación ( $R$ )	14
1.3.15 Resistencia de pérdidas ( $R_p$ )	15
1.3.16 Resistencia activa total de una antena ( $R_a$ )	15
1.3.17 Rendimiento de una antena ( $\eta$ )	15
1.3.18 Relación pecho-espalda ("Front To Back")	15
1.3.19 Parámetros que expresan la acción direccional de una antena	17
1.3.20 Tensión máxima en antena	17

<b>1.4 Antenas elementales</b>	18
1.4.1 Radiador isotrópico	18
1.4.2 Dipolo elemental	21
1.4.3 Dipolo muy corto	27
1.4.4 Monopolo corto	28
<b>1.5 Antenas lineales filamentosas</b>	29
1.5.1 Antena dipolo de media onda	30
1.5.1.1 Diagramas de radiación de antena dipolo de media onda	32
<b>1.6 Antenas horizontales y verticales</b>	34
1.6.1 Antenas horizontales	34
1.6.2 Antenas verticales	35
<b>1.7 Arreglos de antenas</b>	36
1.7.1 Arreglo de dos elementos isotrópicos	39
1.7.2 Arreglo de N radiadores isotrópicos	42
<b>1.8 Arreglos de antenas reales</b>	44
1.8.1 Dipolos colineales	44
1.8.2 Dipolos en fila	47
<b>1.9 Multiplicación de diagramas de radiación</b>	48
<b>1.10 Antenas de telefonía móvil</b>	51
1.10.1 Antena down tilt	51
1.10.2 Antenas adaptativas	53
1.10.3 Arreglos de antenas adaptativas	54
1.10.4 Arreglo verticales colineales	55
1.10.5 Arreglo en el plano horizontal	55
1.10.6 Arreglo vertical colineal para uso omnidireccional	56
1.10.6.1 Arreglos colineales típicos	57
1.10.7 Arreglos para antenas sectorizadas	57



## CAPÍTULO 2

### ANTENAS INTELIGENTES

<b>2.1</b>	<b>Introducción a las antenas inteligentes</b>	<b>60</b>
2.1.1	Apreciación global	63
2.1.2	Características de un sistema inalámbrico	63
2.1.2.1	Cobertura	63
2.1.2.2	Capacidad	64
2.1.2.3	Diseño de las celdas	64
2.1.2.4	Manejo del handoff (manos libres)	65
2.1.2.5	Movilidad	66
2.1.2.6	Calidad	66
2.1.2.7	Flexibilidad y compatibilidad	67
2.1.2.8	Costos de infraestructura	67
2.1.3	Efectos sobre la capacidad del sistema	67
2.1.3.1	Interferencias co-canal	68
2.1.3.2	Interferencias de canal adyacente	68
2.1.4	El espectro de la radio	69
<b>2.2</b>	<b>Definición</b>	<b>69</b>
<b>2.3</b>	<b>Fundamentos básicos</b>	<b>71</b>
2.3.1	Razones del uso de antenas inteligentes	73
2.3.2	Principios de funcionamiento	75
<b>2.4</b>	<b>La inteligencia</b>	<b>76</b>
2.4.1	Niveles de inteligencia	77
2.4.1.1	Haz conmutado	78
2.4.1.2	Haz de seguimiento	79
2.4.1.3	Haz adaptativo	80
<b>2.5</b>	<b>Propagación de la señal</b>	<b>82</b>
2.5.1	Multitrayectoria e interferencia co-canal	83
2.5.2	Multitrayectoria	84
2.5.3	Los problemas asociados con la multitrayectoria	85
2.5.3.1	Desvanecimiento	85
2.5.3.2	Cancelación de fase	86
2.5.3.3	Retardo de propagación	87

2.5.3.4	Interferencia co-canal	87
<b>2.6</b>	<b>La tecnología de antenas inteligentes</b>	<b>88</b>
2.6.1	Características	88
2.6.1.1	Ganancia de la señal	89
2.6.1.2	Rechazo a la interferencia	89
2.6.1.3	Diversidad espacial	89
2.6.1.4	Optimización de la potencia	89
2.6.2	Ventajas	90
2.6.2.1	Incremento de la zona de cobertura	90
2.6.2.2	Reducción de costos	91
2.6.2.3	Incremento de la capacidad	91
2.6.2.4	Reducción de la potencia transmitida	92
2.6.2.5	Nuevos servicios	92
2.6.2.6	Reducción de la propagación multitrayectoria	93
2.6.2.7	Mejora la seguridad	94
2.6.3	Inconvenientes	94
2.6.3.1	Mayor complejidad de transceptores	94
2.6.3.2	Tamaño físico	95
2.6.3.3	Mayor complejidad de los procedimientos de gestión	96
2.6.3.4	Dirección del recurso	96
2.6.3.5	Planificación de la radio	97
2.6.3.6	Cambios en los métodos de planificación	98
<b>2.7</b>	<b>Sistema de antenas</b>	<b>98</b>
2.7.1	Las antenas y los sistemas de antenas	98
2.7.2	Sistemas de la antena	100
2.7.3	Tipos de sistemas de antenas inteligentes	101
2.7.3.1	Sistemas sectorizados	101
2.7.3.2	Sistemas de diversidad	102
2.7.3.2.1	Cambió diversidad	102
2.7.3.2.2	Diversidad combinada	102
<b>2.8</b>	<b>Usos de la tecnología de la antena inteligente</b>	<b>104</b>
2.8.1	Normas aplicables	104
2.8.1.1	Métodos de acceso	104
2.8.1.2	Métodos dobles	104

2.8.2	Transparencia a la red	105
2.8.3	Ventajas agregadas de proceso espacial	105
<b>2.9</b>	<b>Entornos macro y micro de la célula</b>	<b>105</b>
2.9.1	Haz conmutable	106
2.9.2	Arreglos adaptativos	107
<b>2.10</b>	<b>Diversidad de antenas</b>	<b>108</b>
2.10.1	Diversidad de espacio	108
2.10.2	Diversidad de polarización	109
2.10.3	Diversidad de frecuencia	110
<b>2.11</b>	<b>Aplicaciones del SAS (Sistema de Antena Inteligente)</b>	<b>110</b>
2.11.1	Aplicaciones en el sistema de telefonía móvil	111
2.11.1.1	Telefonía personal	112
2.11.1.2	Planificación de transporte	112
2.11.1.3	Radio localización en llamadas de emergencia	112
2.11.1.4	Tarifación geográfica	113
2.11.1.5	Publicidad de servicios cercanos	113
2.11.1.6	Información de lugares turísticos	113
2.11.1.7	Servicios a zonas remotas	113
2.11.1.8	Servicios gubernamentales	114
2.11.1.9	Servicios de negocios	114
2.11.1.10	Servicios aeronáuticos	114
2.11.1.11	Servicios marítimos	115
2.11.3	Modos de aplicarla en una red de comunicaciones móviles	115
2.11.3.1	Receptor de alta sensibilidad (HSR)	115
2.11.3.2	Rechazo de interferencia por filtrado espacial (SFIR)	116
2.11.3.3	Acceso múltiple por división espacial (SDMA)	116
<b>2.12</b>	<b>Mejora del desempeño</b>	<b>117</b>
2.12.1	Despliegue de nuevas redes	118

## CAPÍTULO 3

### TEORÍA BÁSICA PARA EL DISEÑO DE ANTENAS INTELIGENTES

<b>3.1</b>	<b>Detalles de construcción de antenas inteligentes</b>	<b>121</b>
<b>3.2</b>	<b>Arquitectura</b>	<b>125</b>

3.2.1	Cómo trabajan los sistemas de antenas inteligentes	125
3.2.2	Proceso en el enlace ascendente	126
3.2.3	Proceso en el enlace descendente	126
3.2.4	Sistemas de haz conmutado	127
3.2.5	Sistema de antena adaptativas	128
3.2.6	Beneficios relativos entre los intercambios de haz conmutable y los sistemas de arreglos adaptables	129
3.2.6.1	Integración	129
3.2.6.2	Rango/cobertura	129
3.2.6.3	La supresión de la interferencia	130
3.2.6.4	El acceso múltiple por división espacial (SDMA)	130
<b>3.3</b>	<b>Implementación</b>	<b>132</b>
3.3.1	Arreglos de antenas	132
3.3.2	Consideraciones prácticas	133
<b>3.4</b>	<b>Descripción del sistema</b>	<b>134</b>
3.4.1	Receptor	135
3.4.1.1	La unidad de radio	136
3.4.1.2	La unidad de procesamiento de la señal	137
3.4.1.3	La unidad de formación del lóbulo	138
3.4.2	Transmisor	139
<b>3.5</b>	<b>Arquitectura general de un sistema de antenas inteligentes</b>	<b>142</b>
<b>3.6</b>	<b>Esquemas de formación de haces</b>	<b>146</b>
<b>3.7</b>	<b>Algoritmos de funcionamiento</b>	<b>148</b>
3.7.1	Técnicas con referencia temporal	149
3.7.2	Técnicas con referencia espacial	151
3.7.3	Técnicas con referencia ciega	151
<b>3.8</b>	<b>Esquemas combinados para el calculo del vector de pesos</b>	<b>152</b>
3.8.1	Procesado haz-espacio	152
3.8.2	Conformador de banda ancha	152
3.8.3	Conformador en el dominio de la frecuencia	152
3.8.4	Conformador digital	152
3.8.5	Método de la autoestructura	153
<b>3.9</b>	<b>Metodología para la elección del algoritmo mas adecuado</b>	<b>154</b>
3.9.1	Algoritmo de filtración adaptativo	155
3.9.1.1	Tasa de convergencia	155

3.9.1.2	Seguimiento	155
3.9.1.3	Robustez	155
3.9.1.4	Requerimiento computacional	156
3.9.2	Algoritmo para la estimación del ángulo de incidencia	156
3.9.2.1	Resolución	156
3.9.2.2	Técnica de formación del haz en la dirección deseada	156
<b>3.10</b>	<b>Metodología de diseño</b>	<b>158</b>
3.10.1	Diseño de un arreglo antena inteligentes aplicada a la telefonía móvil para la banda de los 1900 MHz	158
3.10.2	Arreglo lineal unidimensional	159
3.10.3	Cálculos matemáticos	159
3.10.3.1	Arreglo de 8 elementos isotrópicos	160
3.10.3.2	Ángulos de máxima radiación	162
3.10.3.3	Ángulos de mínima radiación	162
3.10.3.4	Ángulos secundarios de máxima radiación	163
3.10.4	Diagrama de radiación	163
3.10.4.1	Diagrama de radiación del arreglo de elementos isotrópicos	163
3.10.4.2	Dipolo de onda completa	164
3.10.4.3	Diagrama de radiación del arreglo de antenas dipolo	165
3.10.5	Inteligencia de la antena	167
3.10.5.1	Unidad de antena	167
3.10.5.2	Unidad de radio	167
3.10.5.3	Unidad de procesamiento de la señal	168
3.10.5.4	Unidad de formación del lóbulo	168
<b>3.11</b>	<b>Costos</b>	<b>173</b>
3.11.1	Perspectiva cualitativa	173
3.11.2	Perspectiva cuantitativa	175

## CAPÍTULO 4

### APLICACIONES Y FUTURAS TENDENCIAS

<b>4.1</b>	<b>Antenas inteligentes y SDMA</b>	<b>179</b>
------------	------------------------------------	------------

<b>4.2 Antenas inteligentes y los sistemas WISPER</b>	180
<b>4.3 Aplicaciones de antenas inteligentes en los UMTS</b>	180
4.3.1 Procedimientos afectados	183
4.3.1.1 Sincronización y búsqueda de celdas	183
4.3.1.2 Control de potencia.	183
4.3.1.3 Establecimiento de llamadas	184
4.3.1.4 Diversidad	184
4.3.1.5 Localización	184
4.3.1.6 Llamadas	185
4.3.1.7 Handover	185
<b>4.4 Antenas inteligentes y las redes WI-FI</b>	185
<b>4.5 Sistema de estación base inteligente (SEBI)</b>	186
4.5.1 Marco científico-técnico del proyecto	187
<b>4.6 Las antenas inteligentes en las WLAN y los sistemas MIMO</b>	188
4.6.1 La superación de las limitaciones de ancho de banda	188
4.6.2 Ampliación del alcance mejorando la calidad de la señal	190
4.6.3 Las antenas inteligentes aumentan la transferencia	193
<b>4.7 Las antenas inteligentes como tecnología para internet inalámbrico</b>	195
<b>4.8 Antenas inteligentes en sistemas de video vigilancia</b>	197
<b>4.9 Funcionamiento de la antena inteligente en un sistema área local inalámbrica</b>	198
<b>4.10 Tecnología de antenas inteligentes en redes heterogéneas</b>	199
4.10.1 Gestión de redes heterogénea con interferencia	199
4.10.2 Tendencias actuales	201

## CAPÍTULO 5

Conclusiones	203
--------------	-----

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Libros	208
Artículos técnicos	209
Paginas WEB	210

1.4	Diagramas de radiación de una antena omnidireccional (radiador isotrópico).	8
1.5	Diagramas de radiación de antenas directivas.	9
1.6	Diagramas de radiación en el plano.	9
1.7	Ancho del haz del lóbulo de una antena.	13
1.8	Relación pecho-espalda.	16
1.9	Relación pecho-espalda (lóbulo principal y varios lóbulos laterales).	16
1.10	Diagrama de radiación en el espacio de un radiador isotrópico.	18
1.11	Campos eléctricos y magnéticos interactuando entre si.	19
1.12	Diagramas de radiación del dipolo elemental.	22
1.13	Diagrama de radiación de un dipolo elemental, tridimensional (izquierda) y corte en el plano E (derecha).	24
1.14	Dipolo elemental.	25
1.15	Dipolo muy corto.	27
1.16	Dipolo corto.	28
1.17	Características de las antenas filamentosas.	29
1.18	Condiciones de las antenas filamentosas.	30
1.19	Distribución de la corriente y voltaje en una antena.	31
1.20	Diagrama de radiación de una antena dipolo de media onda en el espacio libre.	32
1.21	Representación esquemática del diagrama sólido de radiación del dipolo de media onda.	32
1.22	Lóbulo de radiación de una antena dipolo de media onda.	33
1.23	Arreglo de antenas conformado por tres dipolos de media onda.	37
1.24	Arreglo de antenas, no lineales y no uniformes.	37
1.25	Arreglo broadside.	38
1.26	Arreglo lineal endfire.	38
1.27	Geometría de dos radiadores isotrópicos.	39
1.28	Agrupación de dos radiadores puntiformes (arreglo endfire).	41
1.29	Agrupación de dos radiadores puntiformes (arreglo broadside).	41
1.30	Agrupación de cuatro radiadores puntiformes.	43
1.31	Agrupación de seis radiadores puntiformes.	44
1.32	Dipolos colineales.	44
1.33	Antena colineal constituida por cuatro dipolos de media onda.	45
1.34	Dipolos alimentados tramo a tramo.	46
1.35	Alimentación de dipolos con cables independientes.	47
1.36	Dipolos en fila.	47
1.37	Arreglo de dos dipolos de media onda.	49
1.38	Lóbulos de radiación del arreglo.	50
1.39	Diagrama de radiación resultante del arreglo de dos dipolos de media onda.	50
1.40	Diagrama de radiación de una antena Down tilt.	51
1.41	Downtilt mecánico y lóbulos de radiación.	51
1.42	Formas de radiación de la antena Down tilt.	52
1.43	Áreas de radiación de las antenas.	55
1.44	Arreglo en el campo horizontal.	56
1.45	Arreglo vertical colineal.	56
1.46	Antenas sectorizadas.	58

## CAPÍTULO 2

2.1	Formas de radiación de la antena inteligente.	61
2.2	Ilustración del concepto de una antena inteligente.	70
2.3	Formas de radiación de las antenas convencionales e inteligentes.	73
2.4	Mejora de la radiación de la energía.	74
2.5	Lóbulos de radiación.	75
2.6	Formas de implementación de las antenas inteligentes.	77
2.7	Niveles de inteligencia.	78
2.8	Antena de haz conmutado.	79
2.9	Antena de haz de seguimiento.	80
2.10	Antena de haz adaptativo.	81
2.11	Reducción de la interferencia y aumento de la capacidad.	84
2.12	El efecto de la multitrayectoria en un usuario móvil.	84
2.13	Señales fuera de fase.	85
2.14	Desvanecimiento de RAYLEIGH en una señal.	86
2.15	Cancelación de fase.	86
2.16	Multitrayectoria causada por el retardo de propagación.	87
2.17	Interferencia co-canal en un área celular típica.	87
2.18	Reducción en la distancia del reuso de frecuencias.	92
2.19	Ubicación adecuada de las antenas inteligentes.	97
2.20	Antenas omnidireccionales y diagramas de radiación.	99
2.21	Antena direccional y lóbulos de cobertura.	100
2.22	Antena sectorizadas y lóbulos de cobertura.	101
2.23	Diversidad combinada y cobertura de diversidad combinada con desvanecimiento.	103
2.24	Lóbulos de radiación de una antena con diversidad combinada.	103
2.25	Formas de radiación de las antenas inteligentes dentro de una célula.	106
2.26	Sistemas de haces conmutables (sectores).	106
2.27	Radiación de un arreglo adaptativo.	107
2.28	Diversidad de espacio.	109
2.29	Concepto de SDMA.	117
2.30	Mejora del desempeño.	120

## CAPÍTULO 3

3.1	Sistema de antenas adaptativas.	122
3.2	Antena de haz gobernable y haz múltiple conmutado en red celular.	124
3.3	Formación de lóbulos con las antenas inteligentes.	125
3.4	Lóbulos de beamforming.	128
3.5	Proceso espacial.	131
3.6	Arreglos geométricos.	132
3.7	Receptor.	135
3.8	Unidad de formación de lóbulos.	138



3.9	Transmisor.	140
3.10	Arquitectura del sistema de antena inteligente.	142
3.11	Ejemplos de arreglos de antenas.	143
3.12	Arquitectura de hardware de la unidad de radio del sistema de antenas inteligentes.	144
3.13	Arquitectura de la unidad de procesamiento de la señal.	144
3.14	Arquitectura de la unidad de formación de haz.	145
3.15	Distribución de radiación.	147
3.16	Estructura de un arreglo adaptativo.	155
3.17	Arreglo de antenas dipolo.	160
3.18	Arreglo de ocho elementos isotrópicos.	160
3.19	Diagrama de radiación del arreglo de ocho elementos isotrópicos.	164
3.20	Lóbulo de radiación de una antena dipolo de onda completa.	165
3.21	Multiplicación de diagramas.	166
3.22	Diagrama de radiación del arreglo de antenas.	166
3.23	Sistemas de antenas inteligentes.	169
3.24	Patrón de radiación del arreglo lineal de antenas.	170
3.25	Factor del arreglo para un arreglo lineal de ocho elementos.	170
3.26	Diagrama de radiación de la antena en funcionamiento.	171
3.27	Estructura de la estación base en función de la antena diseñada.	172
3.28	Costos del despliegue de la red.	174
3.29	Estrategia de migración.	175
3.30	Equipo simulador de una antena inteligente.	177

## CAPÍTULO 4

4.1	Sistema SISO y MIMO.	190
4.2	Despliegue de SDMA, mostrando el punto de acceso como una sola antena para cada punto final.	194

## ÍNDICE DE IMÁGENES

### CAPÍTULO 1

1.1	Antena horizontal.	34
1.2	Antena vertical.	36

### CAPÍTULO 2

2.1	Prototipo de antena inteligente de la firma Allgon.	71
-----	---	----

## ÍNDICE DE TABLAS

### CAPÍTULO 1

1.1	Arreglo colineales típicos.	57
-----	-----------------------------	----

### CAPÍTULO 3

3.1	Ángulos de mínima radiación.	162
3.2	Ángulos secundarios de máxima radiación.	163
3.3	Costos de una estación base.	176

## RESUMEN

El objetivo de este proyecto es presentar un “Estudio de las Antenas Inteligentes”, sus principales aplicaciones, ventajas y desventajas, para los operadores de los sistemas de la telefonía móvil y los usuarios que la utilizan.

El texto, dividido en cinco capítulos, presenta en su contenido: análisis teóricos, ecuaciones fundamentales de antenas, tablas y gráficos que permiten al lector adquirir el conocimiento funcional de la tecnología de las antenas inteligentes aplicada a los sistemas de comunicaciones móviles.

En el texto se encuentran conceptos básicos de antenas, información acerca de los sistemas de telefonía móvil y de nuevas tecnologías, lo que servirá de ayuda para entender el contexto mismo de las antenas inteligentes.

El Capítulo uno recoge los principios básicos de las antenas, características, clasificaciones y diferentes tipos de arreglos utilizados en las telecomunicaciones; permitiendo entender la forma y funcionalidad de las antenas.

El Capítulo dos trata el objetivo mismo del proyecto. Aquí se presenta una introducción al sistema de antenas inteligentes y sus conceptos; se analiza el impacto de esta nueva tecnología dentro de las comunicaciones móviles, realizando un estudio de los diferentes niveles de inteligencias de las antenas así como de sus características, ventajas y desventajas, no sólo como una tecnología innovadora sino también como una tecnología de soluciones efectivas y aplicaciones muy variadas.

Se expone también el funcionamiento de las antenas inteligentes, su implementación y aplicación en las actuales redes de comunicaciones móviles; mejoras en el desempeño de los sistemas que traería consigo su utilización.

El Capítulo tres presenta la teoría básica para el diseño de las antenas inteligentes. Se inicia el estudio detallando parámetros de construcción de las antenas, su arquitectura, implementación y la descripción funcional de las partes que la constituyen.

Se estudian brevemente los algoritmos adaptativos que utilizan estos sistemas y la formación de lóbulos de radiación, incluye un ejemplo que permite conocer la metodología del diseño de las antenas inteligentes.

Se analizan los costos que demandaría la implementación de los sistemas de las antenas inteligentes en las actuales redes de telefonía celular.

En el Capítulo cuatro se exponen las aplicaciones y futuras tendencia de las antenas inteligentes tanto en la telefonía móvil como en otros campos de aplicación.

En el Capítulo 5 se encuentran las conclusiones del estudio realizado. Se destacan las ventajas tecnológicas, económicas, desventajas y tendencias futuras del sistema.

Es importante recalcar, que en parte del proyecto se mencionan empresas dedicadas a la investigación y desarrollo esta nueva tecnología.

Por último, se incluye la referencia bibliográfica utilizada en la elaboración de este proyecto. Adjuntando un listado de anexos que constituyen la base del estudio de las antenas inteligentes.

## PRESENTACIÓN

En la actualidad las telecomunicaciones se encuentran en su mejor desarrollo, nuevas sistemas de comunicaciones aparecen, exponiendo alternativas para mejorar la funcionalidad de los sistemas y la prestación de servicios.

A pesar del importante desarrollo tecnológico de las telecomunicaciones, los sistemas de telefonía móvil encuentran obstáculos en su avance. Problemas como el subdimensionamiento de las redes, interferencias, espectros de frecuencias limitados y la saturación de servicios; son algunas de las limitaciones de los sistemas de telefonía celular. Para superar éstas limitantes, se han dado varias soluciones, buscando resultados efectivos, eficientes y perdurables. El reuso de frecuencias e innovadoras técnicas de acceso a los canales en los sistema de comunicación, han sido alternativas ya utilizadas, con resultados favorables para los sistemas.

No obstante, una de las soluciones actuales, de suma importancia y que constituye la razón de ser de este proyecto, son las “Antenas Inteligentes”, que como tecnología innovadora ofrecen múltiples beneficios y ventajas para los sistemas de comunicaciones inalámbricas, especialmente en la telefonía móvil, con nuevas oportunidades para las operadoras del sistema y con mejores servicios para los usuarios.

Haces más directos, seguridad, confiabilidad, reducción de la radiación electromagnética, entre otras; son características que identifican esta nueva tecnológica.

A pesar de su importancia, la tecnología de las antenas inteligentes no a sido difundida. Varios países líderes en las telecomunicaciones han puesto en marcha la investigación y el desarrollo de esta tecnología, siendo superficiales en la información vertida. Sin embargo, este hecho no ha constituido un alto para la

investigación del tema. Por ello es importante poseer una base de información sólida, que permita entender, manipular y complementar la tecnología de las antenas inteligentes. De ahí la necesidad de su estudio.

El presente proyecto fue realizado desde una perspectiva informativa acerca de estos nuevos cambios tecnológicos.

Comenzamos el proyecto, adjuntando toda clase de información relacionada con la tecnología de las antenas inteligentes, discriminado de toda la documentación reunida lo menos posible; de tal manera que el texto sirva como una guía elemental, clara y consistente del tema.

El proyecto no se limita a presentar la información en un lenguaje técnico y complicado solamente para los estudiosos de las telecomunicaciones. Pensamos que debe ser puesto al alcance de toda persona que se interese en conocer más acerca de las comunicaciones inalámbricas, muchos de los términos técnicos encontrados en el texto son explicados en algún momento de la lectura, de una manera simple, aspirando que el lector pueda incrementar sus conocimientos sobre las telecomunicaciones, sin dejar vacíos.

Confiamos en que este proyecto será necesariamente un punto de partida y una referencia para quienes busquen información sobre esta nueva tecnología. Es un esfuerzo que debe ser valorado en lo que significa: La importancia de estar inmersos en el desarrollo tecnológico a nivel mundial.

El presente proyecto servirá de base para futuras investigaciones y que será complementado permanentemente con los nuevos aportes.

Es por ello que con satisfacción presentamos el proyecto titulado "Estudio de Antenas Inteligentes, Principales Aplicaciones en los Sistemas de Telefonía Móvil".

**ESTUDIO DE ANTENAS INTELIGENTES,  
PRINCIPALES APLICACIONES EN LOS  
SISTEMAS DE COMUNICACIONES  
MOVILES.**

# CAPITULO 1

Principios  
fundamentales de  
antenas



## CAPÍTULO 1

La humanidad, desde sus inicios ha ido estableciendo maneras para comunicarse; es así como dibujos, sonidos y gestos fueron las primeras formas de lenguaje. No obstante, el hombre y la necesidad de expresar mejor sus ideas hicieron que el arte de hablar apareciera, tosco y confuso al principio, pero de gran ayuda para que hombre y hombre pudieran comunicarse mejor; claro está cuando uno estaba frente al otro. Pero ¿qué de aquellos que estaban a horas y horas de un lugar, que se podría hacer para comunicarse también con ellos?

En el año de 1837 este problema era resuelto con la aparición del telégrafo; fue un sistema de comunicaciones de larga distancia que no tenía nada que ver con la voz, sino más bien, con puntos y rayas. Es así como la distancia dejaba de ser un límite en las comunicaciones. Posteriormente vinieron nuevas invenciones: el facsímil, el telégrafo trasatlántico y el teléfono; todos estos limitados por la necesidad de conductores costosos y pesados, que llevasen las señales de un punto a otro.

Surge entonces, la necesidad de transformar las señales eléctricas en ondas electromagnéticas.

En el año de 1894 las comunicaciones inalámbricas ven la luz del desarrollo; su primer paso viene marcado por la invención del sistema telegráfico inalámbrico ideado por Marconi en el año 1894; pasando luego por las primeras difusiones de radio AM en 1920; las de televisión hechas por la BBC en 1936, y las de radio FM en 1941; hasta llegar a los sistemas inalámbricos más complejos como son la telefonía móvil (1983) y la video conferencia (1991–Reino Unido).

En este punto vale la pena hacer un alto en la historia e identificar la existencia de un eslabón importante en esta cadena del desarrollo de los sistemas de comunicación.

---

*Principios Fundamentales de Antenas*

Aquí pues, ha de mencionarse un hecho que marcaría tal desarrollo. Por el año de 1884 aproximadamente, cuando se hacía experimentos en comunicación; un hombre de apellido Hertz ideó y fabricó un elemento metálico; que por sus características físicas era fundamental en dichos sistemas; muy liviano y capaz de irradiar ondas electromagnéticas.

Dicho elemento fue la primera antena de radio, aumentando con ello en forma substancial los precarios conocimientos que se tenían de las antenas y sus propiedades.

Desde entonces y debido al papel tan importante que las antenas juegan en los sistemas de comunicación, se amerita estudiarlas, empezando por sus estructuras más básicas y terminando con las más complicadas; analizando en este recorrido los tipos de antenas existentes, así como sus características de acuerdo a las exigencias en término de longitud, banda y directividad.

El estudio de los principios fundamentales de las antenas, sus características y sus formas básicas son un lecho de información importante en todo tema relacionado con ellas; mediante el cual podrá fluir con facilidad el análisis de antenas más complicadas e importantes en el actual desarrollo tecnológico.

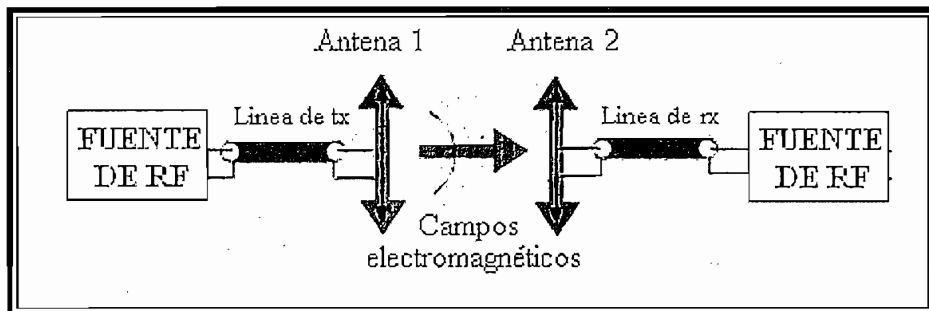
A continuación se desarrolla el tema sobre antenas, debido a la importancia que éste tiene para el proyecto.

## PRINCIPIOS FUNDAMENTALES DE ANTENAS

### 1.1 DEFINICIÓN

Una antena es un elemento metálico, constituida de un material conductor muy liviano (generalmente de aluminio), capaz de irradiar ondas electromagnéticas – energía – en varias direcciones del espacio.

Esto hace que las antenas funcionen como transductores muy eficaces en los sistemas de comunicación, puesto que transforman las señales eléctricas (potencia de radio frecuencia – RF–) en ondas electromagnéticas o en su defecto intercepta éstos últimos y los convierte en energía.



*Fig. 1.1 Energía de RF transformada en ondas electromagnéticas.*

Cuando se habla de antenas se hace referencia por igual a antenas tanto de emisión como de recepción. La antena tiene las mismas características para ambas tareas. Por lo tanto, la misma precisión que tiene para enviar en una determinada dirección la tiene para recibir en esa dirección.

La existencia, tanto de antenas de transmisión como de recepción; permite un intercambio de ondas electromagnéticas que viajan a través del espacio en forma

libre y en ciertas aplicaciones de forma directiva, trayendo consigo una característica muy importante de las antenas como es la radiación.

De todos los elementos de una estación de comunicaciones, la antena es la que posee el comportamiento menos predecible, causado por la fuerte interacción que tiene con todo lo que le rodea. Debido a esto y a la necesidad de aprovechar en toda su capacidad la señal que emiten, es importante el estudio de los principios básicos de las antenas que darán una idea general de las cualidades que deben tener las mismas: polarización, directividad, ganancia, eficiencia, etc., sin dejar de mencionar que las antenas deben tener seguridades mecánicas en su uso, tamaño y peso adecuados, ser sencillas y versátiles; de tal modo que puedan guiar a las ondas radiadas de la mejor manera.

## **1.2 RADIACIÓN**

Al circular una corriente por un elemento metálico se genera un campo magnético que circula entorno al conductor y en el plano perpendicular a éste (figura 1.2). Si la corriente circulante es variable, el campo magnético producido será también variable; es decir, si la corriente varía con la frecuencia, el campo cambiará de la misma manera y en función también de la frecuencia. Cuando la frecuencia es baja toda la energía en el conductor – antena – se disipa en forma de calor, a medida que aumenta la frecuencia; una porción de la energía producida en el conductor desaparece. Esta energía perdida del entorno de la antena fluye a través del espacio originando el fenómeno conocido como radiación. Para que tal fenómeno pueda ocurrir, la corriente que circula por el conductor debe ser variable en función del tiempo y de alta frecuencia de tal modo que la producción de ondas sea inminente. La corriente variable (de forma sinusoidal) produce campos eléctricos y magnéticos durante el semiciclo positivo. Durante el semiciclo negativo, los campos son invertidos y liberados a velocidad luz; entonces nuevos campos eléctricos y magnéticos se generan durante el semiciclo negativo; este efecto seguirá repitiéndose conforme a la circulación de corriente, que mientras mayor sea su frecuencia mayor será la producción de los campos electromagnéticos (figura 1.3).

## Principios Fundamentales de Antenas

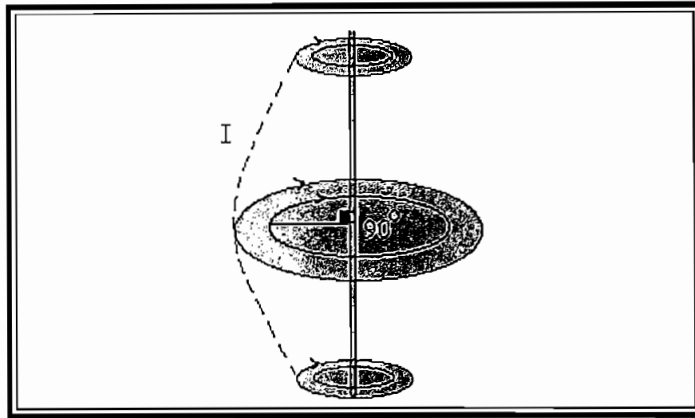


Fig. 1.2 Campos magnéticos creados por la corriente que circulan en un elemento metálico.

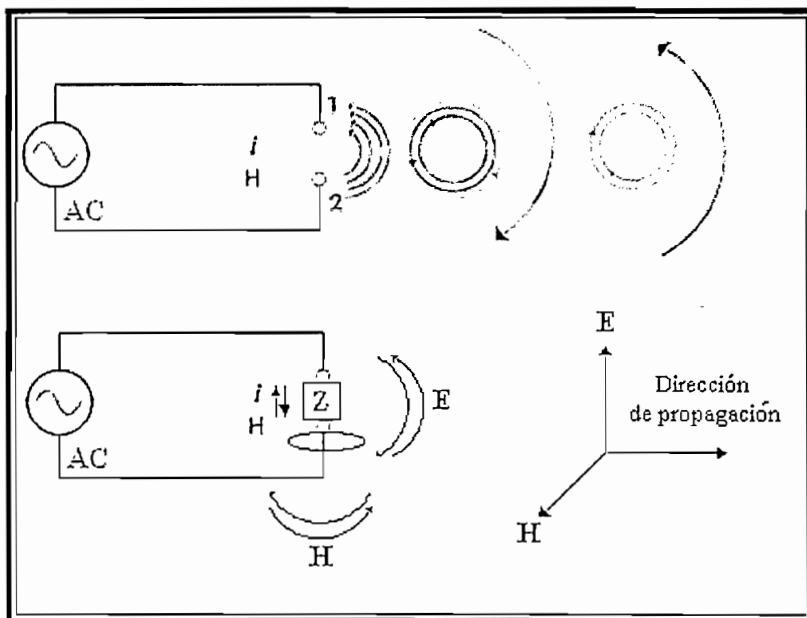


Fig. 1.3 Producción de campos electromagnéticos.

## 1.3 PARÁMETROS GENERALES DE ANTENAS – DEFINICIONES

### DE CONCEPTOS

Una antena va a formar parte de un sistema por lo que tenemos que definir parámetros que la describan y permitan evaluar el efecto que va a producir.

#### 1.3.1 IMPEDANCIA ( $Z$ )

La impedancia de entrada es un parámetro de gran trascendencia, condiciona las tensiones de los generadores que se deben aplicar para obtener determinados valores de corriente en la antena.

Se define la impedancia en la entrada de una antena, como la relación tensión-corriente, posee una componente activa (real) y una componente reactiva (imaginaria) que dependen de la frecuencia a la que trabaja la antena.

La componente real de la impedancia es, la resistencia total de la antena referida a sus terminales de entrada, en tanto la componente imaginaria viene determinada por el hecho que en la zona de inducción de la antena existe un campo eléctrico y otro magnético desplazados en fase  $90^\circ$  y que son portadores de energía reactiva.

Si a una frecuencia determinada la antena no presenta parte imaginaria en su impedancia  $R_i(\text{react.})=0$ , entonces se dice que la antena está resonando a esa frecuencia.

Normalmente se usa una antena a su frecuencia de resonancia, que es cuando mejor se comporta.

$$Z = R_r(\text{act.}) + R_i(\text{react.}) \quad (1)$$

### 1.3.2 RECIPROCIDAD

Las propiedades de una antena transmisora son muy similares al de una antena receptora a causa del teorema de reciprocidad, el cual indica que si se aplica a los terminales de un circuito determinado A una fuerza electromotriz y produce una corriente en otro circuito B, la misma fuerza electromotriz aplicada a los terminales B producirá la misma corriente en los terminales del circuito A.

Debido a esto el diagrama polar de una antena receptora es similar al diagrama polar cuando esta antena transmite.

### 1.3.3 DIAGRAMA DE RADIACIÓN

En el diagrama de radiación se representan gráficamente las propiedades de radiación de la antena que sirven para determinar la energía radiada en cada dirección del espacio.

El diagrama de radiación es también un gráfico que representa las intensidades de los campos o las de potencia en varias posiciones angulares en relación con una antena. Si el patrón de radiación se traza en términos de la intensidad del campo eléctrico (E) o de la densidad de potencia (Pd), se llama patrón de radiación absoluto.

En función de los diagramas de radiación, se pueden clasificar a las antenas de una manera global y especificar dos tipos:

#### 1.3.3.1 Antenas Omnidireccionales

Se define una antena omnidireccional como aquella capaz de radiar y captar energía prácticamente en todas direcciones con la misma intensidad. La más representativa es el radiador isotrópico – que será estudiado más adelante –, cuyo diagrama de radiación se ciñe perfectamente al de una antena omnidireccional (figura 1.4).

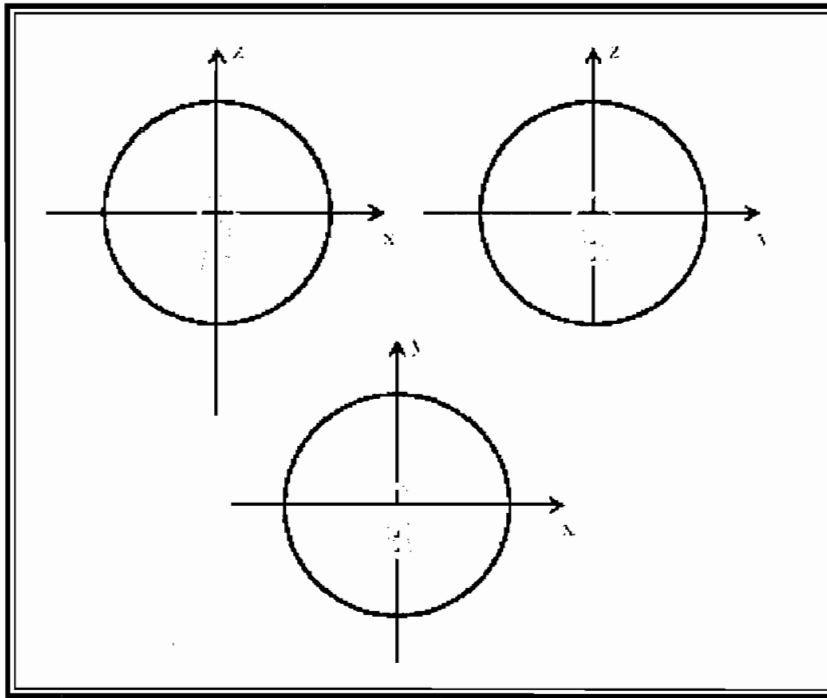


Fig. 1.4 Diagramas de radiación de una antena omnidireccional (radiador isotrópico).

### 1.3.3.2 Antenas directivas

Las antenas directivas – conocidas también como direccionales – son aquellas que han sido concebidas y construidas para favorecer a que la mayor parte de la energía sea radiada en una dirección en concreto.

Puede darse el caso en que se desee emitir en varias direcciones, pero siempre se estará hablando de un número de direcciones determinado donde se encontrarán el lóbulo principal y los secundarios (figura 1.5).



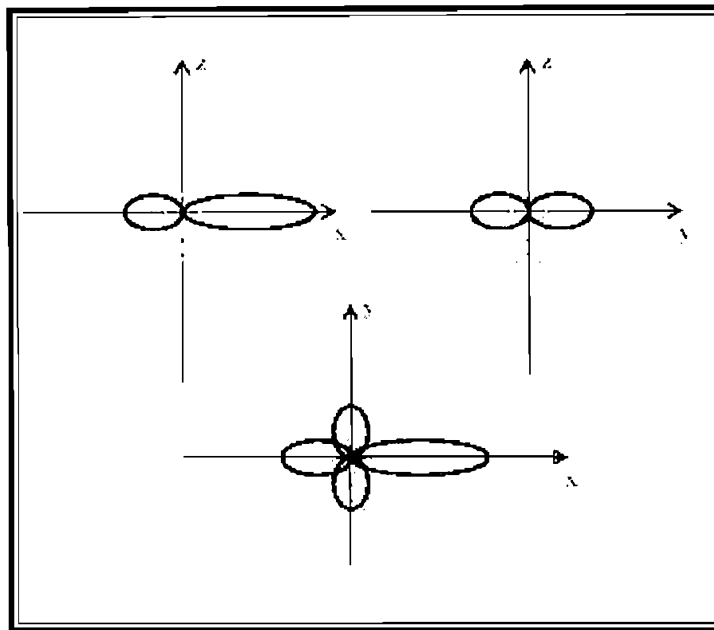


Fig. 1.5 Diagramas de radiación de antenas directivas.

En una antena real no es posible tener diagramas de radiación directivos al mismo tiempo en el plano horizontal y vertical, solo se da el caso que en un plano sea omnidireccional y en el otro directivo (figura 1.6).

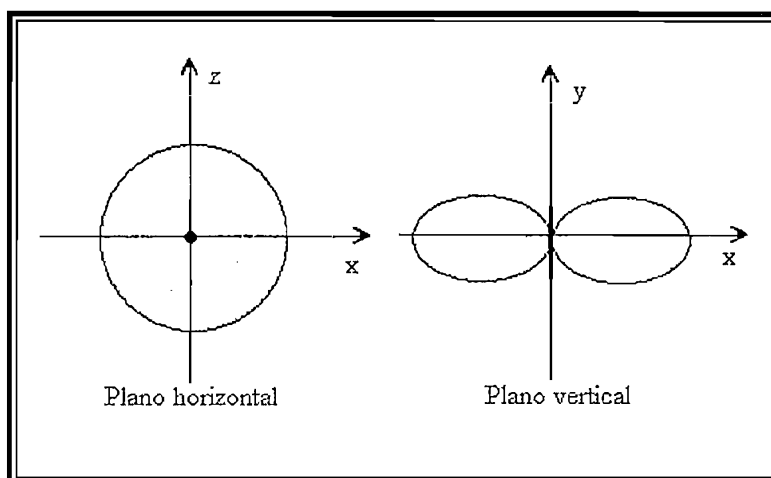


Fig. 1.6 Diagramas de radiación en el plano.

### 1.3.4 DIRECTIVIDAD

La directividad es una propiedad de las antenas direccionales, – las antenas activas son directivas en cierta medida – que permite conocer la capacidad que tiene una antena para concentrar el máximo valor de radiación en una dirección deseada, seleccionando el objetivo a donde se desea transmitir o se va a recibir la señal. La directividad relaciona la intensidad de campo de radiación con respecto a la dirección; este campo debe ser medido siempre a la misma distancia de la antena.

### 1.3.5 POLARIZACIÓN

La polarización indica la orientación del campo electromagnético emitido por una antena con respecto al nivel de tierra. Si el vector campo eléctrico ( $E$ ) es vertical, se necesita una antena vertical para emitir la señal; pero si  $E$  es horizontal, se necesita de una antena horizontal para emitir la señal; una antena puede estar polarizada en forma lineal (horizontal ó vertical) y en forma circular. Cuando una antena posee polarización circular se tiene una combinación de polarización vertical y horizontal.

### 1.3.6 ANCHO DE BANDA

El ancho de banda de la antena se define como el rango de frecuencias sobre las cuales la operación de la antena es "satisfactoria". Esto, por lo general, se toma entre los puntos de media potencia.

Por otra parte, se dice que una antena es de banda ancha cuando mantiene todas sus características aproximadamente constantes – ganancia, lóbulo de radiación, impedancia, etc. – dentro de un rango de frecuencias, en la práctica esto no es posible, sin embargo, si una antena mantienen algunas de sus características constantes se la considera de banda ancha.

Una antena de banda estrecha o resonante, es aquella que mantiene sus características constantes pero sólo para una determinada frecuencia.

### 1.3.7 EFICIENCIA

Relacionadas con la impedancia de la antena tenemos la eficiencia de radiación y la eficiencia de reflexión. Estas dos eficiencias nos indicarán cuán buena es una antena emitiendo señal. La eficiencia de radiación se define como la relación entre la potencia radiada por la antena y la potencia que se entrega o se le suministra a dicha antena.

La Eficiencia de Adaptación o Eficiencia de Reflexión es la relación entre la potencia que le llega a la antena y la potencia que se le aplica a ella. Esta eficiencia dependerá mucho de la impedancia que presente la línea de transmisión (generalmente entre 50 y 300 ohm) y de la impedancia de entrada a la antena ( $Z$  puede variar entre 2 y 600 ohm), luego se puede volver a definir la Eficiencia de Reflexión como  $1 - \text{módulo del Coeficiente de reflexión}^2$ , siendo el coeficiente de reflexión el cociente entre la diferencia de la impedancia de la antena y la impedancia de la línea de transmisión, y la suma de las mismas impedancias.

$$\text{Eficiencia de Reflexión} = 1 - (\text{Coeficiente de Reflexión})^2 \quad (2)$$

$$\text{Eficiencia Total} = \text{Eficiencia de Radiación} \times \text{Eficiencia de Reflexión} \quad (3)$$

### 1.3.8 CAMPOS CERCANOS Y LEJANOS

El campo de radiación que se encuentra cerca de una antena no es igual al campo que se encuentra a gran distancia. El campo cercano, hace referencia al campo próximo a la antena y el lejano, se refiere al campo a gran distancia.

El campo cercano se llama campo de inducción, puesto que guarda y libera energía – similar a un inductor – devolviéndola a la antena. La potencia que alcanza el campo lejano mantiene su camino hacia el espacio y nunca regresa a la antena, debido a ello el campo lejano toma el nombre de campo de radiación. La potencia que se tiene en el campo lejano – potencia de radiación – es la más importante en la radiocomunicación y es aquí donde cobran interés los diagramas de radiación.

### 1.3.9 GANANCIA DE UNA ANTENA

En términos de ganancia, se menciona la existencia de dos tipos de ganancia: ganancia directiva y ganancia de potencia, que frecuentemente no se comprenden y, por tanto, se utilizan incorrectamente. La ganancia directiva es la relación de la densidad de potencia radiada en una dirección en particular con la densidad de potencia radiada al mismo punto por una antena de referencia, (generalmente se utiliza al radiador isotrópico como antena de referencia) en el supuesto caso que ambas antenas irradian la misma cantidad de potencia.

La máxima ganancia directiva se llama directividad y matemáticamente la ganancia directiva es:

$$D = P / P_{ref} \quad (4)$$

Donde:

$D$  = ganancia directiva (sin unidades)

$P$  = densidad de potencia en algún punto de una antena determinada ( $W/m^2$ )

$P_{ref}$  = densidad de potencia en el mismo punto de una antena de referencia ( $W/m^2$ )

Por otra parte, la ganancia de potencia esta definida como la relación de la potencia radiada por una antena y la radiada por una antena de referencia.

La ganancia de potencia es igual a la ganancia directiva excepto que se utiliza el total de potencia que alimenta a la antena (tomando en cuenta la eficiencia de la antena).

Se supone que la antena en uso y la antena de referencia tienen la misma potencia de entrada y que la antena de referencia no tiene pérdidas ( $h = 100\%$ ).

$$A_p = D \cdot h \quad (5)$$

Siendo:

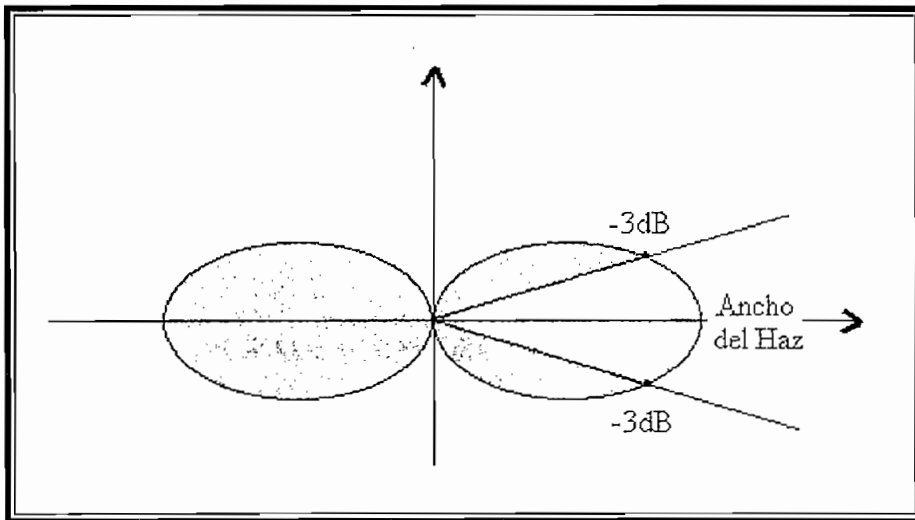
$A_p$ : Ganancia de potencia (%)

$D$ : ganancia directiva (sin unidades)

$h$ : potencia de entrada (%)

### 1.3.10 ANCHO DEL HAZ DE LA ANTENA

El ancho del haz de la antena es sólo la separación angular entre los dos puntos de media potencia (-3dB\*) en el lóbulo principal, por lo general tomado en uno de los planos principales. El ancho del haz de la antena se llama ancho de haz de -3dB o ancho de haz de media potencia (figura 1.7).



*Fig. 1.7 Ancho del haz del lóbulo de una antena.*

### 1.3.11 ÁNGULO DE RADIACIÓN ( $\tau$ )

El ángulo de radiación es el ángulo sobre el horizonte con respecto al eje del lóbulo principal de radiación y que va ligado directamente a la polarización de la antena (horizontal o vertical) como a la altura por sobre la superficie del suelo, frecuencia de funcionamiento, etc.

\* Decibelio(dB): permite evaluar relaciones entre potencias o voltajes, analizando la ganancia o la atenuación de un sistema. Es una medida relativa.

### 1.3.12 ABERTURA EFECTIVA (A)

Toda antena, puede pensarse que esta constituida con un área de recepción la misma que se la conoce como abertura efectiva A, si  $P_d$  es la densidad de la potencia de la antena y  $P_r$  es la potencia recibida tenemos:

$$P_r = P_d A \quad (6)$$

$$A = \frac{P_r}{P_d} \quad (7)$$

### 1.3.13 ADAPTACIÓN

Desde los terminales de la antena, el receptor se ve como una impedancia de carga  $Z_l = R_l + jX_l$ , mientras que el receptor ve a la antena como un generador ideal de tensión  $V_{ca}$  e impedancia  $Z_a = R_a + jX_a$ . La transferencia de potencia será máxima cuando haya adaptación conjugada ( $Z_l = Z_a^*$ ) entre dichos terminales.

### 1.3.14 RESISTENCIA DE RADIACIÓN (R)

La resistencia de radiación es un parámetro que relaciona la potencia radiada por la antena con la corriente eficaz que circula en ella, su unidad de medida es el ohmio.

$$R = \frac{P}{I^2} \quad (8)$$

Donde I es la corriente eficaz, y

P la potencia de radiación activa y no reactiva (no regresa a la antena ni al transmisor).

La resistencia de radiación también se la define como resistencia pura en la que se libera una potencia igual al valor numérico de la potencia de radiación. La resistencia pura no provoca un cambio de energía eléctrica a energía térmica.

### 1.3.15 RESISTENCIA DE PÉRDIDAS ( $R_p$ )

La resistencia de pérdidas se produce por el calentamiento de los conductores en los aisladores, en la tierra y en los objetos cercanos a la antena.

$$R_p = \frac{P_p}{I^2} \quad (9)$$

Siendo  $P_p$ : Potencia de pérdida (W)

$I$ : Corriente eficaz (A)

### 1.3.16 RESISTENCIA ACTIVA TOTAL DE UNA ANTENA ( $R_a$ )

La resistencia activa total está dada por la sumatoria de la resistencia de radiación y la resistencia de pérdidas.

$$R_a = R + R_p \quad (10)$$

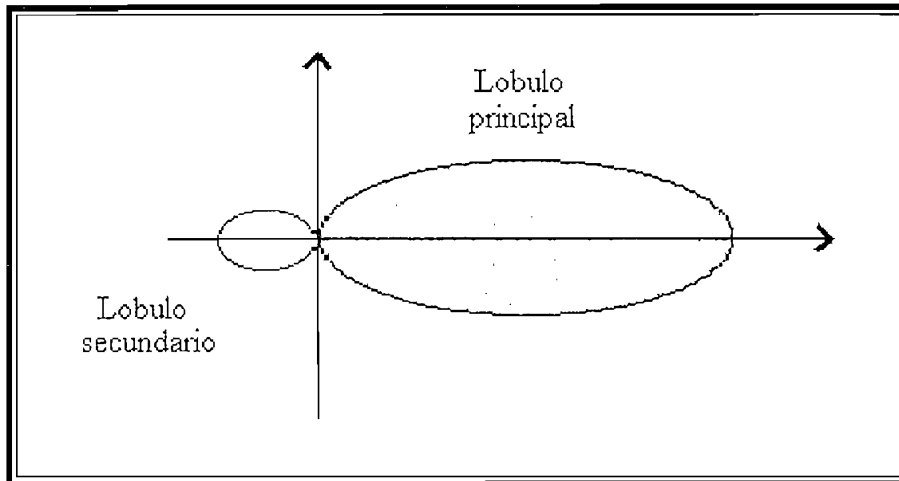
### 1.3.17 RENDIMIENTO DE UNA ANTENA ( $\eta$ )

El rendimiento de una antena se evalúa mediante la relación entre la potencia de radiación y la potencia suministrada a la antena.

$$\eta = \frac{P}{P_a} = \frac{R}{R + R_p} \quad (11)$$

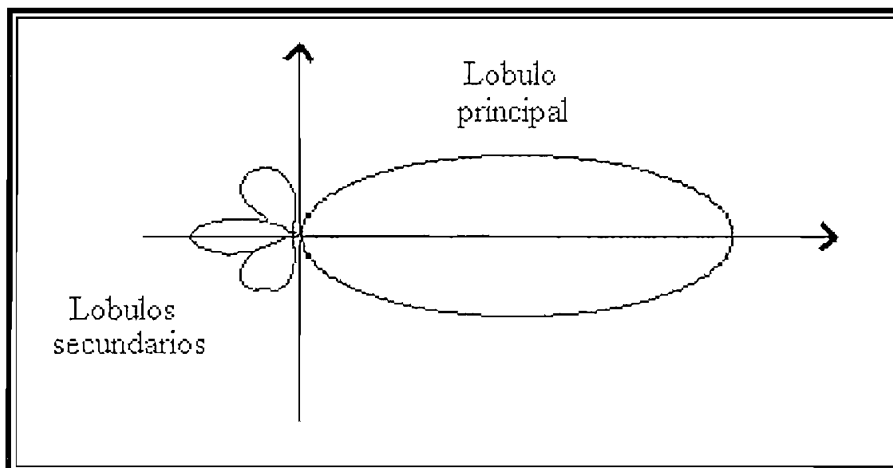
### 1.3.18 RELACION PECHO-ESPALDA (“FRONT TO BACK”)

La relación pecho-espalda es la relación de radiación de la antena calculada entre su lóbulo principal y el lóbulo opuesto (y se relaciona para antenas direccionales o directivas). Es decir, determina cuan importante es el lóbulo principal de radiación respecto al secundario (figura 1.8).



*Fig. 1.8 Relación pecho-espalda.*

Cuando existen varios lóbulos secundarios, la relación pecho-espalda relaciona al lóbulo principal con el lóbulo opuesto a éste  $180^\circ$  y únicamente respecto a él. (figura 1.9).



*Fig. 1.9 Relación pecho-espalda (lóbulo principal y varios lóbulos laterales).*



### 1.3.19 PARÁMETROS QUE EXPRESAN LA ACCIÓN DIRECCIONAL DE UNA ANTENA

Uno de los parámetros que muestran la acción direccional de una antena, es el ancho de los lóbulos en el diagrama de directividad, tomado entre -3 dB y 3 dB del lóbulo.

Dentro de estos parámetros se encuentra el factor de directividad  $D$ , que es igual a la relación entre la densidad de potencia emitida por la antena y la densidad de flujo de potencia que emitiría una antena en cualquier dirección.

$$D = \frac{\Pi_m}{\Pi_{med}} \quad (12)$$

Siendo:

$\Pi_m$ : densidad de flujo de potencia emitido por la antena en una dirección.

$\Pi_{med}$ : densidad de flujo de potencia que emitiría una antena absolutamente no direccional en cualquier dirección.

### 1.3.20 TENSIÓN MÁXIMA EN ANTENA

La tensión máxima en antena es el máximo voltaje al que puede estar sometida una antena, si supera este valor produce ionización del aire y descargas eléctricas, siendo esto peligroso para los elementos y personas que se encuentran cerca a la antena.

## 1.4 ANTENAS ELEMENTALES

En términos de campos eléctricos, magnéticos y de radiación; las antenas elementales son una base de información muy importante para el estudio de muchos otros tipos de antenas. Entre estas, el radiador isotrópico es la más elemental, considerado como un patrón de referencia con relación a las demás antenas; es el punto de partida no sólo para el estudio de las antenas elementales, sino también para el resto de antenas existentes.

### 1.4.1 RADIADOR ISOTRÓPICO

Una antena muy elemental e importante, es el radiador isotrópico, conocido también como radiador puntiforme o isótropo; es una antena ficticia, infinitesimal utilizada como artificio matemático para entender mejor el fenómeno de la radiación.

El radiador isotrópico es una antena perfectamente omnidireccional capaz de irradiar energía – ondas electromagnéticas – con la misma intensidad en todas las direcciones del espacio.

Su diagrama de radiación en el plano – sea este el horizontal o el vertical – es un círculo y en el espacio es una esfera de radio  $r$ , cuyo volumen muestra la forma de propagación la energía (figura 1.10).

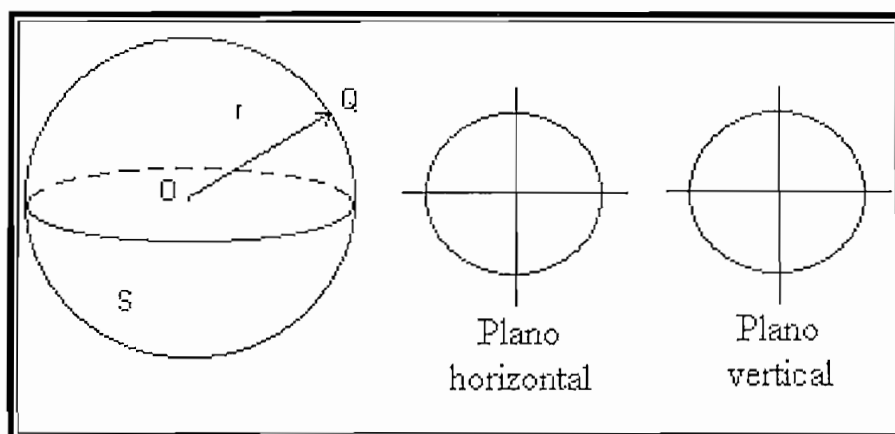


Fig. 1.10 Diagrama de radiación en el espacio de un radiador isotrópico.

Para comprender mejor el comportamiento de esta antena, considérese a ésta en el centro de la esfera siendo alimentada por una potencia de P vatios. Q es un punto cualquiera en el espacio, mientras más cerca se encuentre de la antena isótropa, mayor será la cantidad de energía radiada que reciba; a medida que Q se aleja de la antena, el efecto de radiación perderá su fuerza progresivamente. En algún instante de tiempo, la potencia radiada atravesará la superficie S, dando a Q un determinado potencial en función de su área.

La relación de los parámetros anteriores se denomina densidad de potencia Pd y se define como:

$$Pd = \frac{\text{potencia}}{\text{área}} = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (\text{w/m}^2) \quad (13)$$

No obstante, en el proceso de radiación de ondas electromagnéticas; campos eléctricos y magnéticos interactúan – perpendiculares uno del otro – y la dirección que tienen es función de la dirección de radiación (figura 1.11).

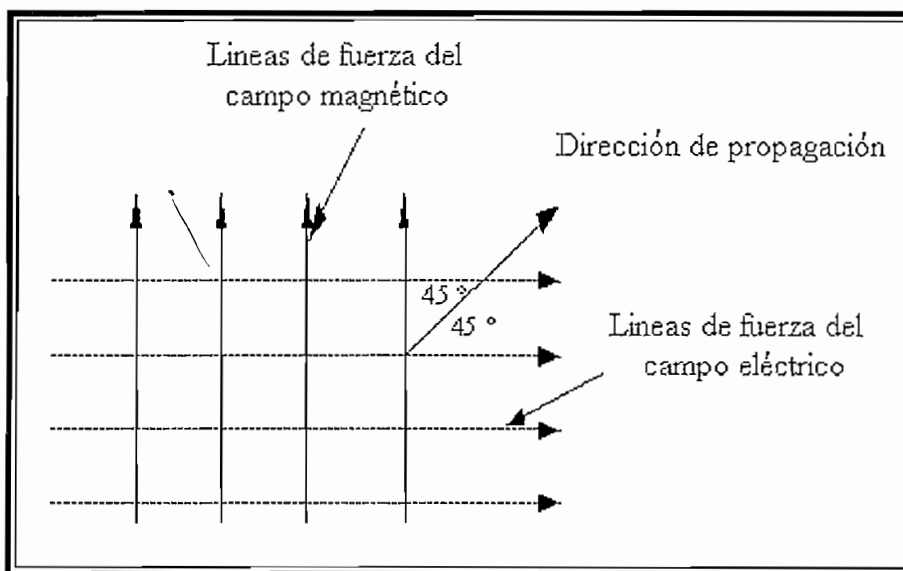


Fig. 1.11 Campos eléctricos y magnéticos interactuando entre sí.

Con la ayuda del teorema de Poynting se puede encontrar también una ecuación para la densidad de potencia en función de los vectores campo magnético ( $H$ ) y campo eléctrico ( $E$ ), la expresión matemática que cumpla con estos requerimientos se define como:

$$P_d = E \times H \quad (14)$$

Resolviendo el producto cruz, se tiene que:

$$P_d = E \cdot H \cdot \text{sen } 90^\circ \quad (15)$$

Pero, el  $\text{sen } 90^\circ$  es igual a 1, por lo tanto la densidad de potencia quedaría de la forma:

$$P_d = E \cdot H \quad (16)$$

El vector  $E$  está asociado con la constante dieléctrica del espacio vacío  $\epsilon_0$  que es igual a  $8,854 \times 10^{-12}$  F/m y el vector  $H$  con la permeabilidad magnética  $\mu_0$  cuyo valor es de  $4\pi \times 10^{-7}$  H/m.

Relacionando estos argumentos, se obtiene lo siguiente:

$$\frac{E}{H} = \frac{\mu_0}{\epsilon_0} = 120\pi \quad (17)$$

Remplazando la ecuación (17) en (16)

$$P_d = E \cdot \frac{E}{120\pi} \quad (18)$$

$$P_d = \frac{E^2}{120\pi} \quad (19)$$

Si se iguala las ecuaciones (13) y (19), el resultado viene a ser la ecuación del campo de radiación presente en el punto Q.

$$\frac{E^2}{120\pi} = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (20)$$

De aquí se tiene que:

$$E = \frac{\sqrt{30P}}{r} \text{ (V/m)} \quad (21)$$

Donde P es la potencia media y los vectores E y H son valores eficaces.

Al ser el radiador isotrópico una antena patrón, se puede considerar el valor de su ganancia directiva igual a 1. Si en lugar de tener un radiador isotrópico, se tiene una antena real con un valor de ganancia diferente de la unidad, los campos magnético y eléctrico en el punto Q, variarán sus valores en función de la ganancia de la nueva antena, generalmente en aumento respecto al radiador isotrópico.

#### **1.4.2 DIPOLO ELEMENTAL**

Una antena muy sencilla e importante dentro de la clasificación de las antenas elementales, es el denominado dipolo elemental o dipolo de Hertz. Es una antena de longitud infinitesimal – pero de mayor tamaño que el radiador isotrópico – sobre la cual se distribuye una corriente  $I_0$ , que se la puede considerar uniforme (figura 1.12).

Al excitarlo con una corriente de alta frecuencia, se presentan cambios muy interesantes, tanto en el campo de inducción y de radiación de la antena.

## Principios Fundamentales de Antenas

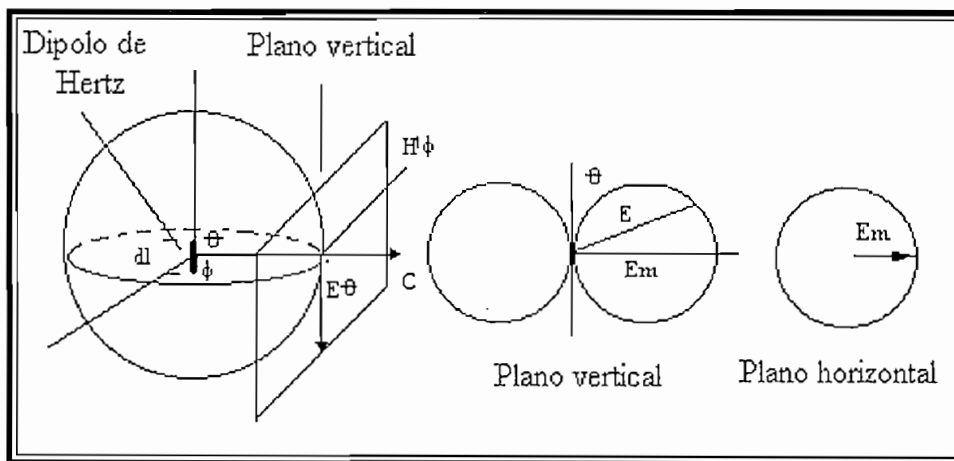


Fig. 1.12 Diagramas de radiación del dipolo elemental.

Con la ayuda de las ecuaciones de Maxwell, se puede observar que el campo de inducción decrece en forma inversamente proporcional al cuadrado de la distancia y que el campo de radiación decrece solo con la distancia.

Estos parámetros, en un determinado punto tomarán diferentes valores en función de la distancia. Cerca a la antena, éstos valores no sufrirán mayores cambios (campo cercano); mientras mayor sea la distancia de radiación de la antena, los campos  $E$  y  $H$  se irán atenuando conforme el aumento de la distancia (campo lejano).

## Ecuaciones de Maxwell

$$E_\theta = \frac{I_0 e^{j\omega(t-r/c)} dl \cdot \sin\theta}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{j\omega}{c^2 r} + \frac{1}{cr^2} + \frac{1}{j\omega r^3} \right) \quad (22)$$

Componente de radiación
Componente de inducción
Componente de resistencia del material

$$E_r = \frac{I_0 e^{j\omega(t-r/c)} dl \cdot \cos\theta}{2\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{cr^2} + \frac{1}{j\omega r^3} \right) \quad (23)$$

$$H\Phi = \frac{I_0 \cdot e^{j\omega(t-r/c)} dl \cdot \text{sen}\theta}{4\pi \mu_0} \left( \frac{j\omega}{cr} + \frac{1}{r^2} \right) \quad (24)$$

El campo magnético a una distancia  $r$ , es de la siguiente forma:

$$H\Phi = \frac{I_0 \cdot dl \cdot \text{sen}\theta}{4\pi} \left( \frac{j e^{j\omega(t-r/c)} \cdot \omega}{cr} + \frac{e^{j\omega(t-r/c)}}{r^2} \right) \quad (25)$$

El primer término, muestra el campo de radiación, y el segundo el campo de inducción. Si se analiza  $H\Phi$  en el campo lejano, el campo de inducción tienden a cero, entonces la ecuación quedará de la siguiente manera:

$$H\Phi = \frac{j I_0 \cdot e^{j\omega(t-r/c)} \cdot dl \cdot \text{sen}\theta}{4\pi} \left( \frac{\omega}{cr} \right) \quad (26)$$

$$H\Phi = \frac{j I_0 \cdot e^{j\omega(t-r/c)} \cdot dl \cdot \text{sen}\theta}{2 \lambda \cdot r} \quad (27)$$

Pero es conocido que:

$$\frac{E}{H} = \frac{\mu_0}{\epsilon_0} = 120\pi \quad (28)$$

$$E = 120 \pi \cdot H \quad (29)$$

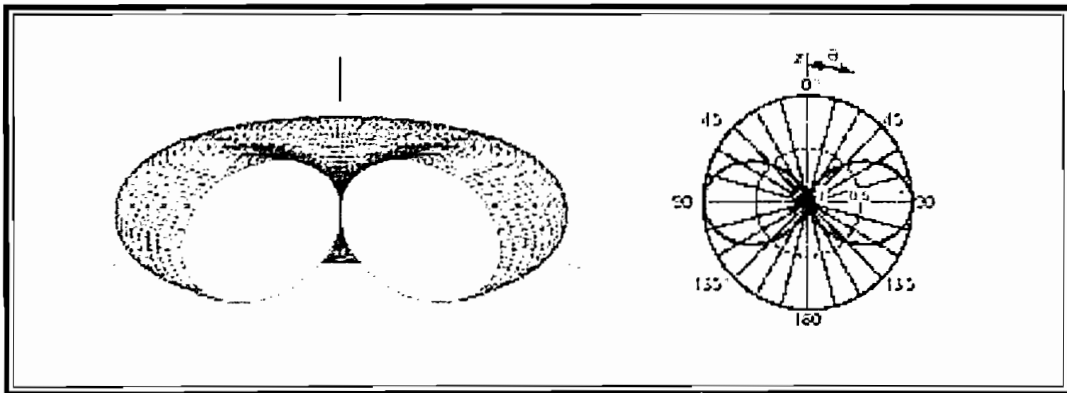
Entonces;

$$E_\theta = \frac{j 60\pi I_0 \cdot e^{j\omega(t-r/c)} \cdot dl \cdot \text{sen}\theta}{\lambda \cdot r} \quad (30)$$

Si la corriente eficaz en el dipolo es  $I$  y el valor eficaz de  $E_\theta$  es  $E$ , entonces:

$$E_\theta = \frac{60\pi I_0 \cdot dl \cdot \sin\theta}{\lambda \cdot r} \quad (\text{V/m}) \quad (31)$$

El diagrama de radiación en el plano vertical es en forma de ocho, en el plano horizontal es un círculo, y en el espacio se forma una figura tridimensional toroidal (figura 1.13).



*Fig. 1.13 Diagrama de radiación de un dipolo elemental, tridimensional (izquierda) y corte en el plano E (derecha).*

El dipolo elemental tiene importancia por si mismo, ya que un gran número de antenas en baja frecuencia poseen estas características y además, por superposición de elementos de corriente, pueden ser analizadas distribuciones de mayor longitud y no uniformes.

Considérese un dipolo en el centro de una esfera de radio  $r$  el cual es excitado por una corriente eficaz  $I$  (figura 1.14).



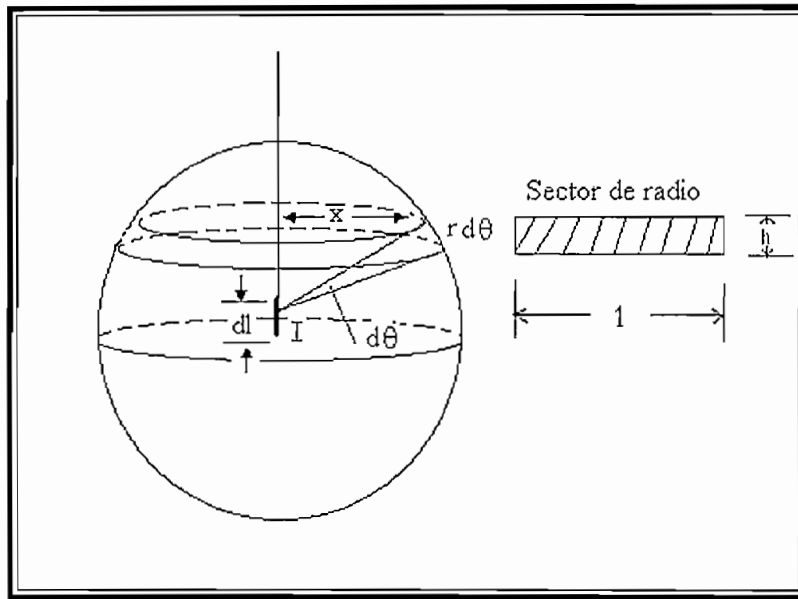


Fig. 1.14 Dipolo elemental.

Donde  $h$  es el ancho del sector de radio y  $l$  es la longitud del mismo; el área de este sector de radio se lo puede obtener de la siguiente manera:

$$dA = h \cdot l \quad (32)$$

$$dA = r d\theta \cdot 2 \pi r \sin\theta \quad (33)$$

Entonces:

$$dA = 2 \pi r^2 \sin\theta d\theta \quad (34)$$

Utilizando la expresión para la densidad de potencia, se tiene que:

$$Pd = \frac{\text{potencia}}{\text{área}} \quad (35)$$

$$P = Pd \cdot \text{área} \quad (36)$$

Si se reemplaza en la ecuación anterior las expresiones de la densidad de potencia  $P_d$  y del diferencial de área  $dA$ , se tiene la siguiente ecuación:

$$dP = \frac{E^2}{120\pi} (2\pi r^2 \cdot \sin\theta \, d\theta) \quad (37)$$

Si, utilizando la ecuación (31), sabemos que:

$$E_\theta = \frac{60\pi I_0 \cdot dl \cdot \sin\theta}{\lambda \cdot r} \quad (\text{V/m})$$

Por lo tanto

$$dP = 60 \left( \frac{\pi I_0 \cdot dl}{\lambda} \right)^2 \sin^3 \theta \, d\theta \quad (38)$$

Expresión que indica el valor de la potencia media  $dP$  que fluye a través de dicho sector.

Al integrar la expresión anterior, se obtiene el flujo de potencia total que pasa a través de la esfera, entonces

$$P = 80\pi^2 I^2 \left( \frac{dl}{\lambda} \right)^2 \text{ vatios} \quad (39)$$

Con la ayuda de esta ecuación y la corriente eficaz en la antena, se puede obtener la ecuación de la resistencia de radiación, mediante la ecuación (8).

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

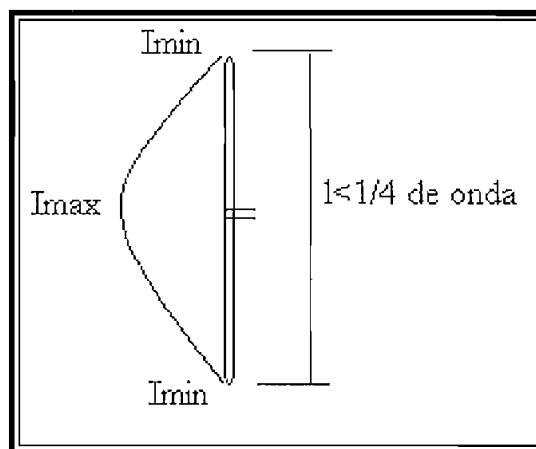
Entonces;

$$R = 80\pi^2 \cdot \left( \frac{dl}{\lambda} \right)^2 \text{ ohmios} \quad (40)$$

La forma de los diagramas de radiación da al dipolo una ganancia de potencia  $G = 1,5$  dB, y si se toma como referencia al radiador isotrópico, éste valor cambia a  $G = 1,76$  dBi. Tanto el radiador isotrópico como el dipolo elemental son antenas de comparación (primordialmente en términos de ganancia), de referencia y no tienen aplicación en la realidad, debido al grado de dificultad (imposible) que demandaría su construcción. Siempre que se habla de la ganancia de una antena se la compara con la del dipolo elemental o el radiador isotrópico, y su ganancia es medida en dBi (decibeles sobre radiador isotrópico) o dBd (decibeles sobre dipolo elemental).

### 1.4.3 DIPOLO MUY CORTO

El dipolo muy corto es una antena real, tiene una longitud mayor a la de un dipolo elemental, en el orden de  $l < \lambda/4$ . La corriente que circula por la antena se la puede considerar uniforme cuando  $l$  está muy por debajo de  $l < \lambda/4$  (es decir si  $l < \lambda/10$ ), pero cuando este valor llega al límite ( $l = \lambda/4$ ) la corriente en la antena pierde su uniformidad, siendo esta distribución de corriente mínima en los extremos de la antena y máxima en su centro (figura 1.15).



*Fig. 1.15 Dipolo muy corto.*

Para obtener una expresión de la energía en este dipolo, podemos partir de la expresión de potencia encontrada para el dipolo elemental - ecuación (39) -.

$$P = 80\pi^2 \cdot I^2 \left( \frac{dl}{\lambda} \right)^2 \text{ vatios}$$

Pero ya no se trata de un diferencial de longitud, si no más bien de una antena con una determinada longitud  $l$  ( $dl$  pasa a ser  $l$ ), por la que circula una corriente no uniforme, luego la corriente  $I$  deberá ser cambiada por la corriente promedio que se tenga en el dipolo corto.

Entonces la ecuación de la potencia queda de la forma:

$$P_{\text{dipolo corto}} = 80\pi^2 \left( \frac{I_0}{2} \right)^2 \left( \frac{l}{\lambda} \right)^2 \text{ vatios} \quad (41)$$

$$P_{\text{dipolo corto}} = 20\pi^2 \left( \frac{I_0 l}{\lambda} \right)^2 \text{ vatios} \quad (42)$$

Y la resistencia de radiación se expresa como;

$$R_{\text{dipolo corto}} = 20\pi^2 \left( \frac{l}{\lambda} \right)^2 \text{ vatios} \quad (43)$$

#### 1.4.4 MONOPOLO CORTO

Un monopolo corto se puede realizar tomando la mitad del dipolo corto, gráficamente se tiene lo siguiente:

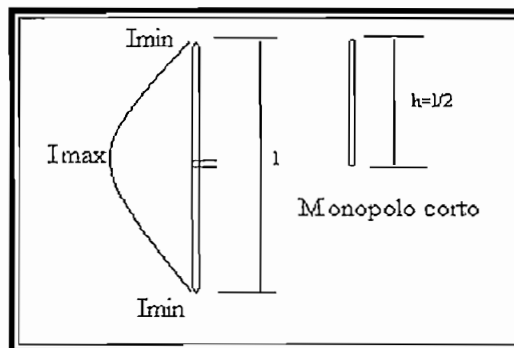


Fig. 1.16 Dipolo corto.

Donde  $l$  es la longitud del dipolo y  $h$  la del monopolo. Al ser el monopolo la mitad del dipolo, todos los parámetros de este último se reducen en la misma proporción, entonces:

$$P_{\text{monopolo corto}} = \frac{P_{\text{dipolo corto}}}{2} \text{ vatios} \quad (44)$$

$$P_{\text{monopolo corto}} = 40\pi^2 I_0^2 \left(\frac{h}{\lambda}\right)^2 \text{ vatios} \quad (45)$$

$$R_{\text{monopolo corto}} = 40\pi^2 \left(\frac{h}{\lambda}\right)^2 \text{ ohmios} \quad (46)$$

## 1.5 ANTENAS LINEALES FILAMENTALES

Las antenas lineales filamentosales son antenas reales. Se las califica de lineales debido a que su estructura puede ser considerada como un alineamiento de varios dipolos cortos (figura 1.17).

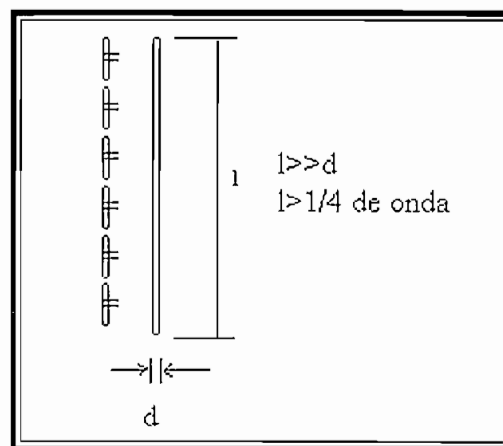
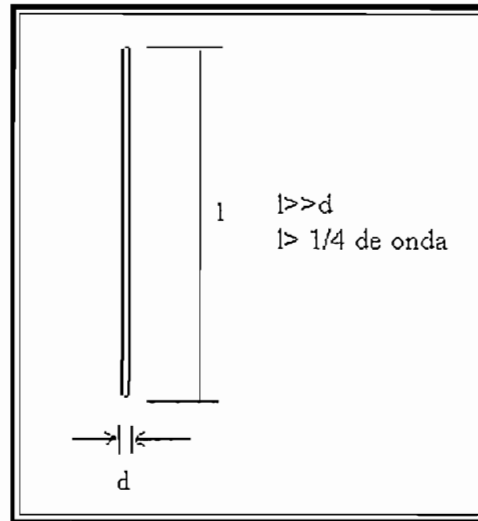


Fig. 1.17 Características de las antenas filamentosales.

La característica de filamentosal se debe al hecho de tener una de sus longitudes mucho mayor que la otra (figura 1.18).



*Fig. 1.18 Condiciones de las antenas filamentales.*

Son alimentadas con energía en su centro, adquiriendo el género de simétricas, la distribución de corriente obedece a una función sinusoidal y es función de la longitud.

### 1.5.1 ANTENA DIPOLO DE MEDIA ONDA

La antena dipolo de media onda es una antena lineal filamental. Se la conoce con el nombre de dipolo simple o antena de Hertz; su longitud es la porción media de una longitud de onda, generalmente es la más usada en los sistemas de radio comunicación con frecuencia por arriba de los 2MHz.

En frecuencia por debajo de los 2MHz, la longitud física de una antena de media onda es prohibitiva. La antena de Hertz es una antena resonante, es decir, es un múltiplo de un cuarto de longitud de onda de largo – por ejemplo: dos veces  $\lambda/4$  – y de circuito abierto en el extremo más lejano.

La corriente a lo largo de esta antena no es uniforme, varia conforme fluye del centro hacia los extremos, máxima en su centro y cero en los extremos con la tensión ocurre a la inversa; la tensión máxima se da en los extremos de la antena (figura 1.19).

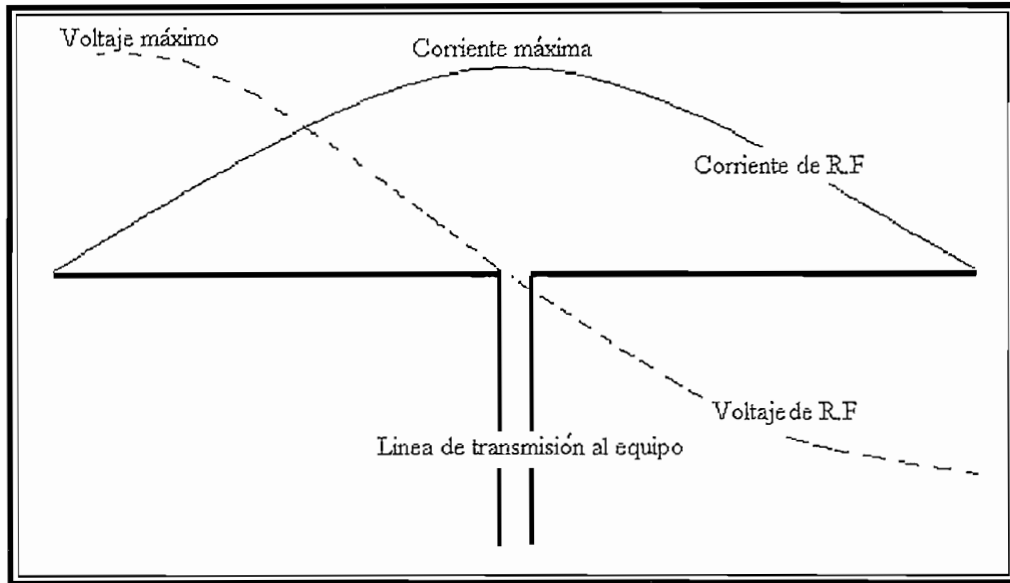


Fig. 1.19 Distribución de la corriente y voltaje en una antena.

La potencia de radiación total de dipolo de media longitud de onda ( $\lambda/2$ ) viene dada por la expresión.

$$P = 73 \cdot I^2 \text{ vatios} \quad (47)$$

Y la resistencia de radiación es igual a:

$$R = \frac{P}{I^2} = 73 \text{ ohmios} \quad (48)$$

El patrón de radiación de espacio libre para un dipolo  $\lambda/2$  depende de la localización horizontal o vertical de la antena con relación a la superficie de tierra. El diagrama de radiación vertical de un dipolo depende grandemente de su distancia al suelo y de sus características, lo cual explica en parte las enormes diferencias de comportamiento entre antenas aparentemente iguales, situadas en lugares distintos.

### 1.5.1.1 Diagramas de radiación de antena dipolo de media onda

El diagrama de radiación de una antena directiva tiene la forma geométrica toroidal. Esto concuerda con la forma de radiación de la antena dipolo de media onda (que son diagramas de radiación tridimensionales); por lo tanto, los diagramas de radiación de estas antenas son similares (figura 1.20).

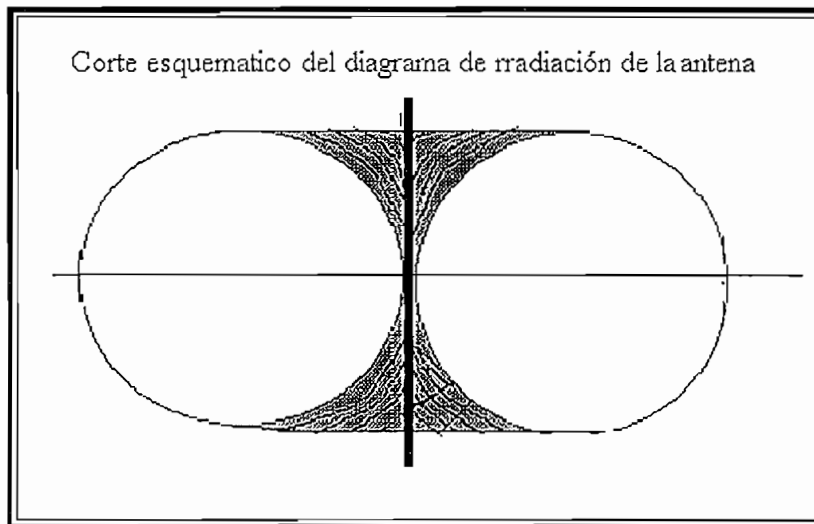


Fig. 1.20 Diagrama de radiación de una antena dipolo de media onda en el espacio libre.

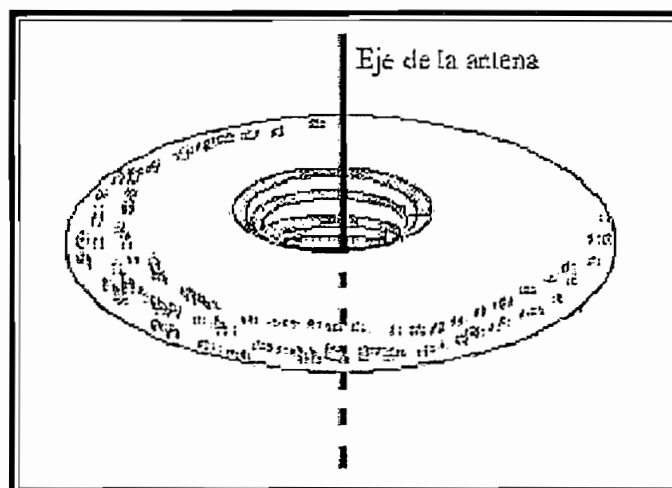


Fig. 1.21 Representación esquemática del diagrama sólido de radiación del dipolo de media onda.



Si se suspende una antena dipolo en el espacio libre o a una altura suficiente de la tierra (para poder despreciar el efecto de la cercanía de la misma) la radiación del campo magnético toma la forma mostrada en la figura 1.20.

Si la antena es montada cerca de la tierra o de otro objeto conductor el diagrama de irradiación dejará de ser concéntrico o regular. Esto es debido principalmente a la influencia de las ondas reflejadas que se sumarán vectorialmente a las ondas generadas por la antena (figura 1.21).

Cuando estas ondas (real y reflejada) se suman vectorialmente aumenta la fuerza del campo irradiado y viceversa.

Este efecto tiene mucha importancia cuando el dipolo está montado cerca de la tierra aunque no afecta el diagrama de irradiación de una antena vertical u horizontal, pero referida solamente a la radiación contenida en el plano horizontal (figura 1.22).

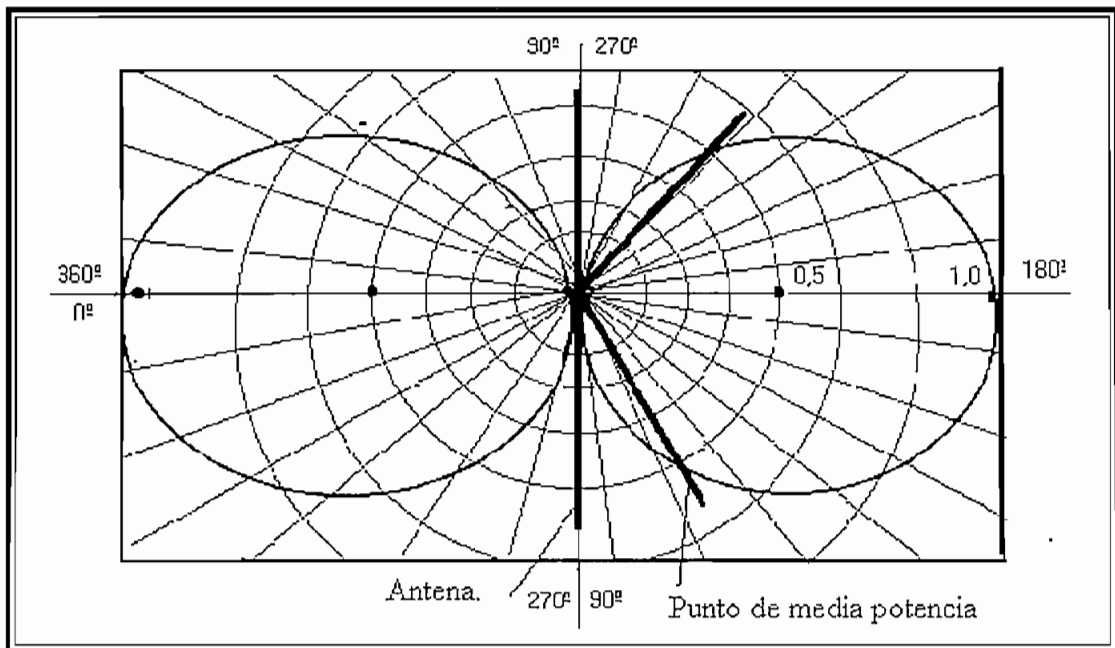


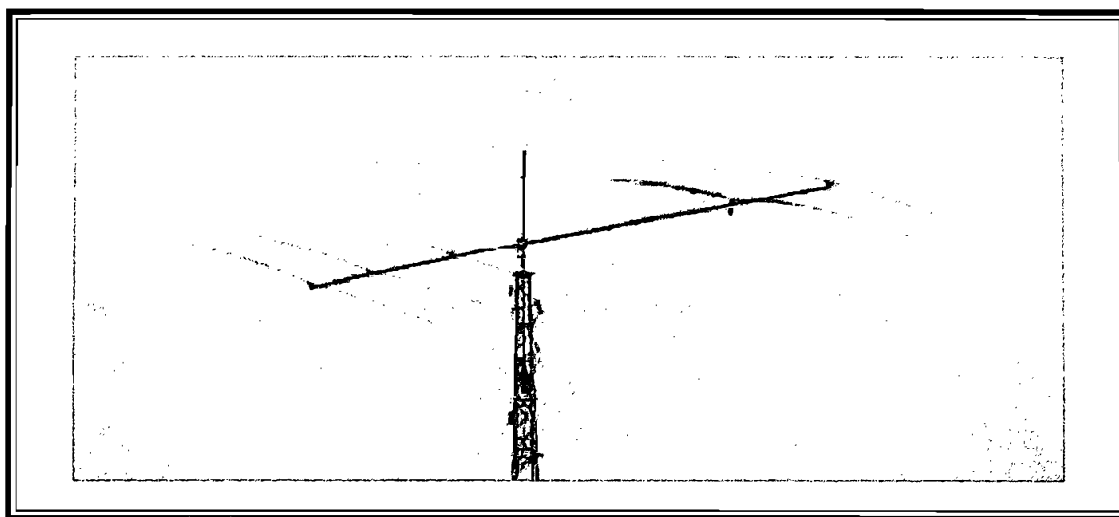
Fig. 1.22 Lóbulo de radiación de una antena dipolo de media onda.

## 1.6 ANTENAS HORIZONTALES Y VERTICALES

En la actualidad existen varios tipos de antenas que son utilizadas con diferentes propósitos, cada una de ellas con características tales como: dimensiones, altura de utilización, forma de alimentación, etc.; que las va a distinguir unas de otras. Varias son las clasificaciones de las antenas en función de sus características; las antenas horizontales y verticales forman parte de una de estas clasificaciones ya que comparten características similares que las hacen especiales.

### 1.6.1 ANTENAS HORIZONTALES

Las antenas horizontales son usadas en su mayoría por radioaficionados; estos tipos de antenas crean un campo electromagnético polarizado horizontalmente que es irradiado en forma perpendicular al conductor y horizontal respecto al suelo. Estas antenas deben ubicarse como mínimo a media longitud de onda ( $\lambda/2$ ) del suelo para tener un buen funcionamiento, aunque lo ideal es que se las coloque a una longitud de onda ( $\lambda$ ). Cuando se coloca a la antena a una distancia menor de media longitud de onda, provoca interacciones entre el suelo y la antena, disminuye el rendimiento, la direccionalidad y aumenta su ángulo de radiación de salida (imagen 1.1).



*Imagen 1.1 Antena horizontal.*

### 1.6.2 ANTENAS VERTICALES

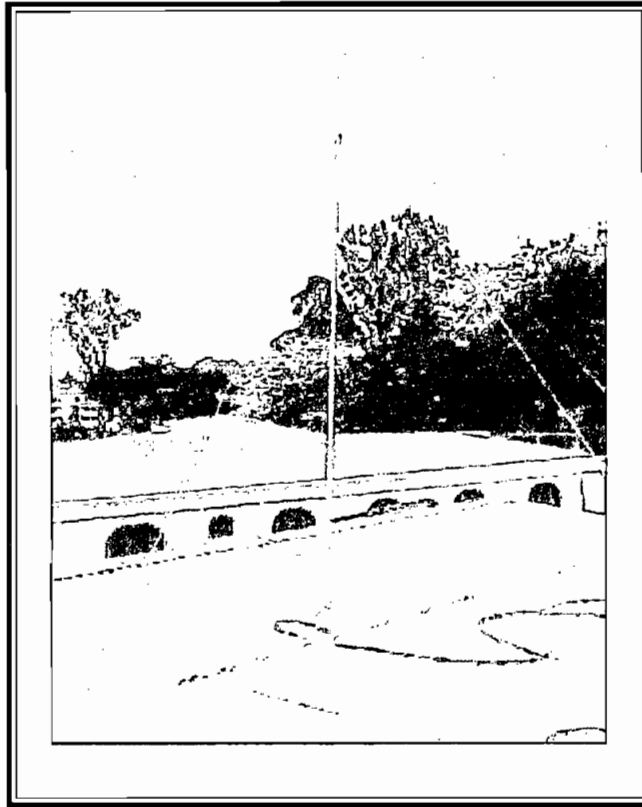
Las antenas verticales son colocadas como su nombre lo indica en forma vertical, una de sus ventajas es, que no ocupan gran espacio de forma horizontal, crean un campo electromagnético polarizado verticalmente, radiado uniforme alrededor del plano horizontal, poseen ángulos de salida bajos, lo que las ayuda a tener una gran cobertura en HF y en las zonas urbanas un buen alcance de las bandas de VHF y UHF. La altura de éstas antenas no es un condicionante para su buen desempeño, es mejor si están muy cercanas al suelo, con el requerimiento de que el suelo sea alto en conductividad; algo similar ocurre si se lo coloca en el techo de una edificación.

La antena vertical esta formado por un elemento irradiante vertical que va de 0.25 a 0.63 longitudes de onda y un elemento conductor por donde circula la corriente. Los conductores tienen diferentes formas, siendo la más utilizada el juego de tres conductores de un cuarto de longitud de onda ( $\lambda/4$ ), se los debe colocar a una distancia del suelo que les permita formar un ángulo de  $45^\circ$  para ajustar la impedancia, a éste proceso se lo conoce como plano de tierra.

Cuando una antena vertical es colocada muy cerca del suelo impide a los conductores, formar el ángulo de los  $45^\circ$ , aunque esto no afecte mucho su rendimiento, dificulta el ajuste debido a la diferencia de  $50\Omega$  de impedancia requerida.

La principal desventaja de las antenas verticales es el patrón de irradiación omnidireccional, debido a que este no solo irradia a donde se desea emitir la señal, sino que permite el ingreso de ruido de otras direcciones.

Por tener una polarización vertical, ésta es similar a la polarización natural que posee el ruido eléctrico (imagen 1.2).



*Imagen 1.2 Antena vertical.*

## 1.7 ARREGLOS DE ANTENAS

Los arreglos de antenas son llamados también antenas compuestas, son agrupaciones de varias antenas unidas bajo ciertas condiciones, que permiten modificar el diagrama de radiación, mejorando la directividad y aumentando la ganancia.

El diagrama de campo resultante puede ser obtenido considerando a las antenas como radiadores puntiformes. Dentro de las condiciones requeridas para la formación de una agrupación de antenas se encuentran las siguientes:

Todas las antenas deben ser elementos comunes, es decir de las mismas longitudes de onda, deben encontrarse separadas de una manera constante y alineadas en un mismo eje con la misma polarización – si se consideran arreglos lineales uniformes – (figura 1.23).

## Principios Fundamentales de Antenas

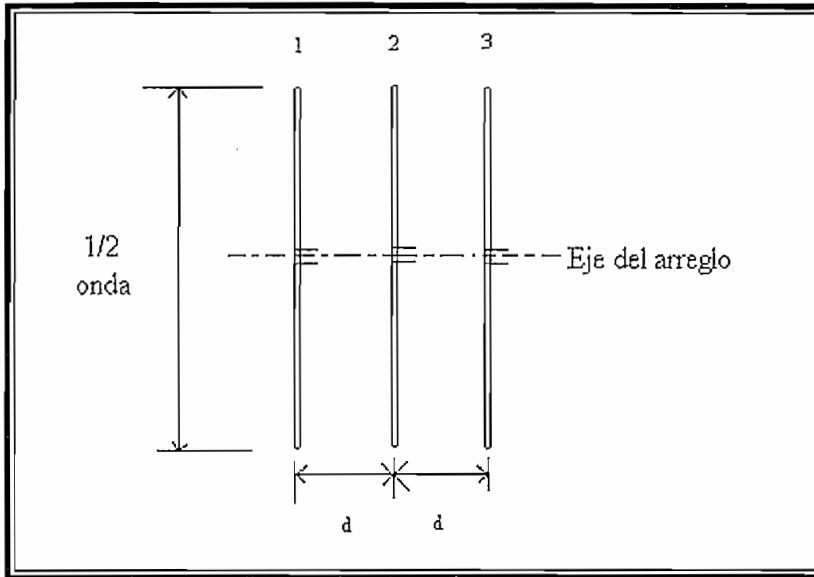


Fig. 1.23 Arreglo de antenas conformado por tres dipolos de media onda.

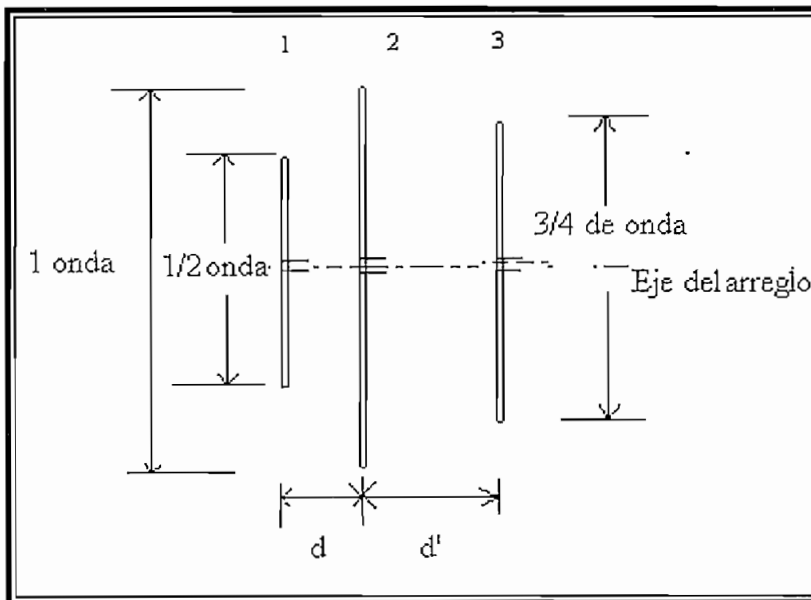


Fig. 1.24 Arreglo de antenas, no lineales y no uniformes.

De la misma manera, todas las antenas que conforman el arreglo deben estar alimentadas con corrientes; si éstas corrientes tienen iguales amplitudes y fases similares, la estructura formada es conocida con el nombre de arreglo "broadside" (figura 1.25).

## Principios Fundamentales de Antenas

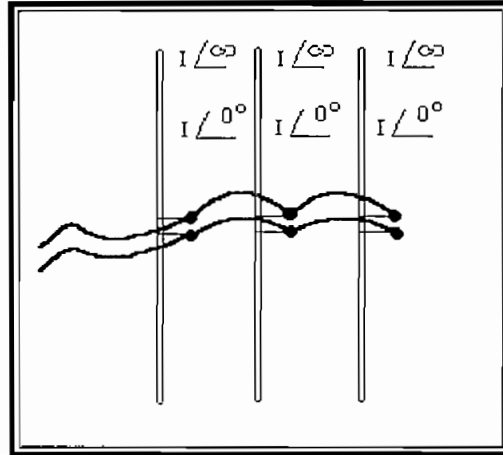


Fig. 1.25 Arreglo broadside.

Ahora bien, si las corrientes tienen igual amplitud únicamente, y sus fases diferentes pero con saltos progresivos, estamos en presencia de un arreglo denominado "endfire" (figura 1.26).

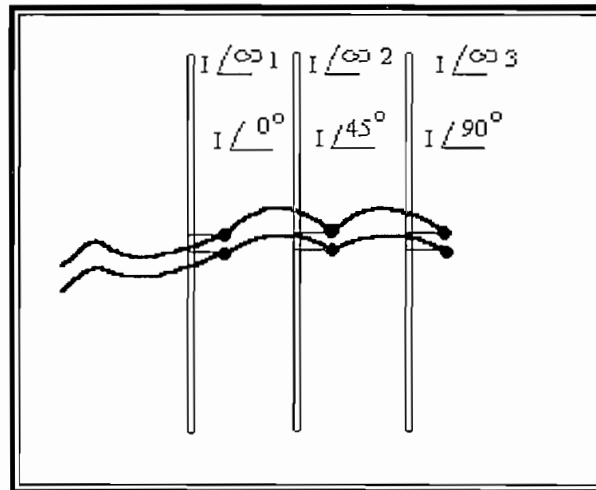


Fig. 1.26 Arreglo lineal endfire.

Si los parámetros de las corrientes (amplitudes y fases) son escogidos adecuadamente, se podrán obtener mejores resultado en cuanto a directividad y ganancia.

### 1.7.1 ARREGLO DE DOS ELEMENTOS ISOTRÓPICOS

Considérese un arreglo de antenas constituido por dos radiadores isotrópicos, cuya distancia de separación es igual a  $d$  y están siendo alimentados por corrientes con la misma fase (figura 1.27). P es un punto cualquiera del espacio, las intensidades de los campos creados por los radiadores en este punto, son casi iguales, sin embargo existe una diferencia de fase debido a los diferentes caminos que toman los campos de radiación.

La diferencia de caminos se expresa como  $d \cdot \cos\theta$ , el cual produce una diferencia de fase definida como  $\varphi = \beta d \cos\theta$ .

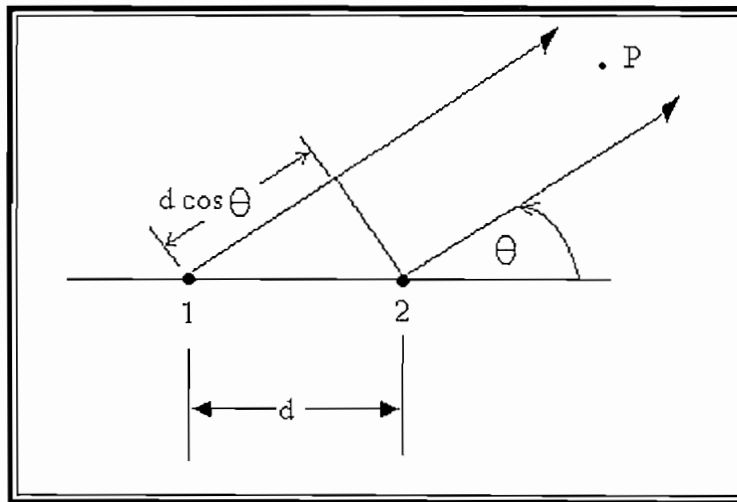


Fig. 1.27 Geometría de dos radiadores isotrópicos.

Donde  $\beta$  (beta) es una constante igual a  $2\pi/\lambda$  y  $\theta$  es el ángulo de radiación, luego  $\varphi$  quedaría expresada como:

$$\varphi = \frac{2\pi d \cos\theta}{\lambda} \quad (49)$$

Entonces el campo total en el punto P vendría a ser la suma de los campos individuales de cada radiador.

$$E_{TOTAL} = E_1 + E_2 \quad (50)$$

Si se toma en cuenta que la diferencia de caminos trae consigo una diferencia de fases, la expresión del campo total quedaría de la forma:

$$E_{TOTAL} = E_0 + E_0 e^{j(\beta d \cos \theta)} \quad (51)$$

Donde  $E_0$  es el campo de radiación debido a una fuente única. Entonces,

$$E_{TOTAL} = E_0 (1 + e^{j(\beta d \cos \theta)}) \quad (52)$$

$$E_{TOTAL} = 2E_0 \cos\left(\frac{\beta d \cos \theta}{2}\right) \quad (53)$$

En general, si las corrientes están desfasadas un ángulo  $\alpha$  (alfa),  $E_{TOTAL}$  quedaría expresada como:

$$E_{TOTAL} = 2E_0 \cos\left(\frac{\beta d \cos \theta \pm \alpha}{2}\right) \quad (54)$$

Donde  $\alpha$  es la diferencia de alimentación de corriente entre cada antena, será igual a cero ( $\alpha=0$ ) si se trata de un arreglo "broadside".

Si se tratase en cambio, de un arreglo "endfire" se tendría la posibilidad de que  $\alpha$  tenga un valor con signo positivo (+) para indicar un retraso de corriente o con signo negativo (-) para mostrar un adelanto de corriente, es decir, todo esto en función de la alimentación.



## Principios Fundamentales de Antenas

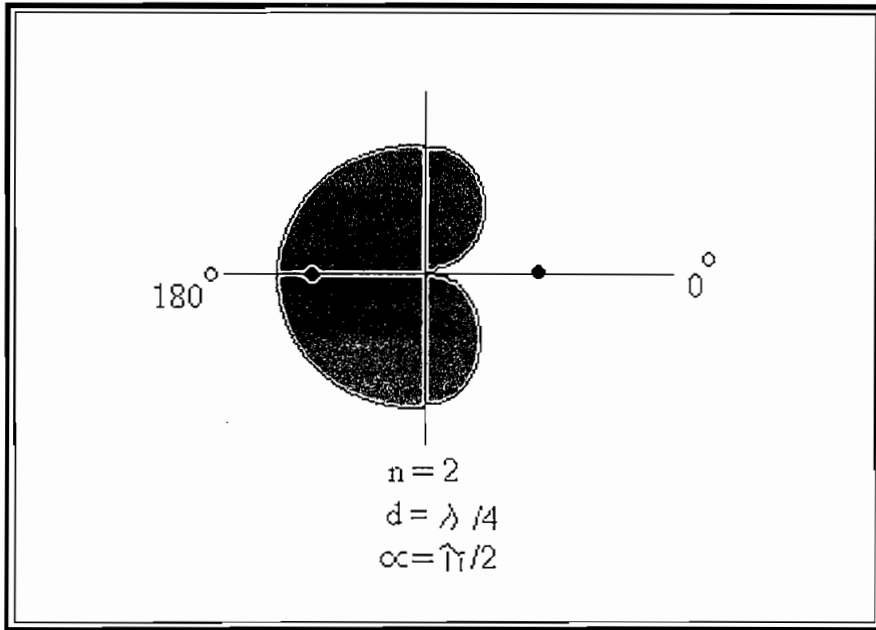


Fig. 1.28 Agrupación de dos radiadores puntiformes (arreglo endfire).

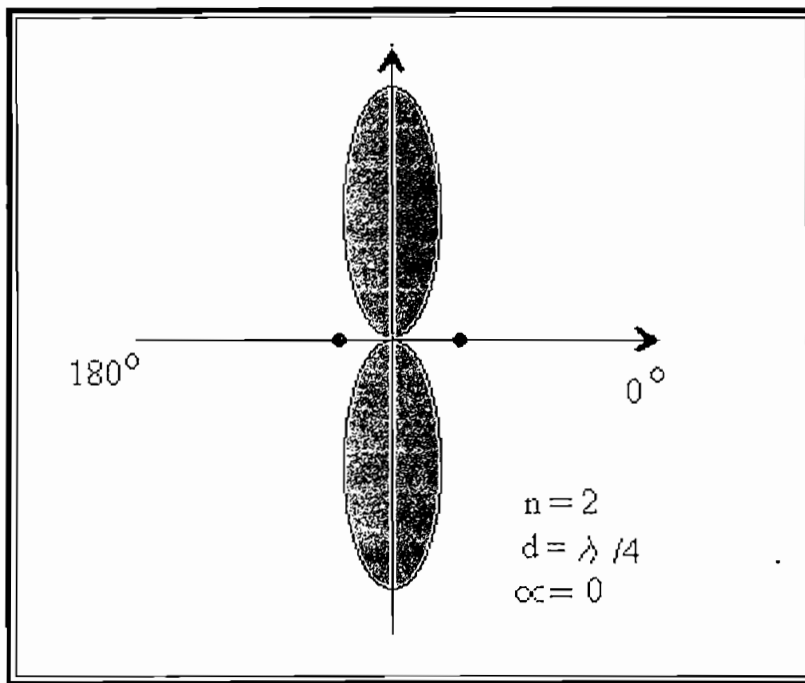


Fig. 1.29 Agrupación de dos radiadores puntiformes (arreglo broadside).

### 1.7.2 ARREGLO DE N RADIADORES ISOTRÓPICOS

Si se puede suponer un sistema de dos radiadores, se podrá también hacerlo para 3, 4, 5,... hasta N agrupaciones de radiadores isotrópicos.

Utilizando la ecuación (51), sabemos que:

$$E_{TOTAL} = E_0 + E_0 e^{j(\beta d \cos \theta)}$$

La diferencia de los campos, como ya se dijo, radica únicamente en la diferencia de fase.

Con esta misma consideración e incrementando el número de radiadores a tres, el campo del uno varía en fase con respecto a los otros y viceversa; entonces el campo total quedaría expresado como:

$$E_{TOTAL} = E_0 + E_0 e^{j(\beta d \cos \theta)} + E_0 e^{j2(\beta d \cos \theta)} \quad (55)$$

Generalizando para N radiadores, tendremos lo siguiente:

$$E_{TOTAL} = E_0 + E_0 e^{j(\beta d \cos \theta)} + E_0 e^{j2(\beta d \cos \theta)} + \dots + E_0 e^{j(n-1)(\beta d \cos \theta)} \quad (56)$$

Simplificando;

$$E_{TOTAL} = E_0 \cdot \left( \frac{1 - e^{jn(\beta d \cos \theta)}}{1 - e^{j(\beta d \cos \theta)}} \right) \quad (57)$$

Mediante la utilización de identidades trigonométricas se sabe que:

$$1 - e^{j\varphi} = 1 - (\cos \varphi + j \sen \varphi) \quad (58)$$

$$1 - (\cos \varphi + j \sen \varphi) = \left( 2 \sen \frac{\varphi}{2} \right) \quad (59)$$

Por lo tanto,

$$1 - e^{-j\psi} = 2 \operatorname{sen} \left( \frac{\psi}{2} \right) \quad (60)$$

De acuerdo a esto, el campo  $E_{\text{TOTAL}}$  es de la forma:

$$E_{\text{TOTAL}} = E_0 \left[ \frac{\operatorname{sen} \left( \frac{n\psi}{2} \right)}{\operatorname{sen} \left( \frac{\psi}{2} \right)} \right] \quad (61)$$

Normalizando la ecuación, se ve que la expresión del campo total es de la forma:

$$E_{\text{TOTAL}} = E_0 \frac{1}{n} \left[ \frac{\operatorname{sen} \left( \frac{n\psi}{2} \right)}{\operatorname{sen} \left( \frac{\psi}{2} \right)} \right] \quad (62)$$

El incremento de antenas en un determinado arreglo, traerá consigo una mejora en la ganancia y en la directividad del arreglo; sin embargo, mientras mayor sea el número de elementos del arreglo, mayor será la aparición de lóbulos secundarios, los cuales afectarán de alguna manera la eficiencia de la antena.

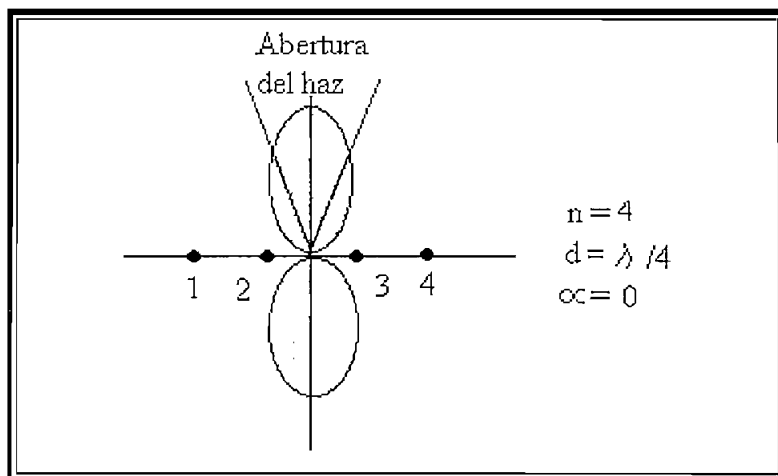


Fig. 1.30 Agrupación de cuatro radiadores puntiformes.

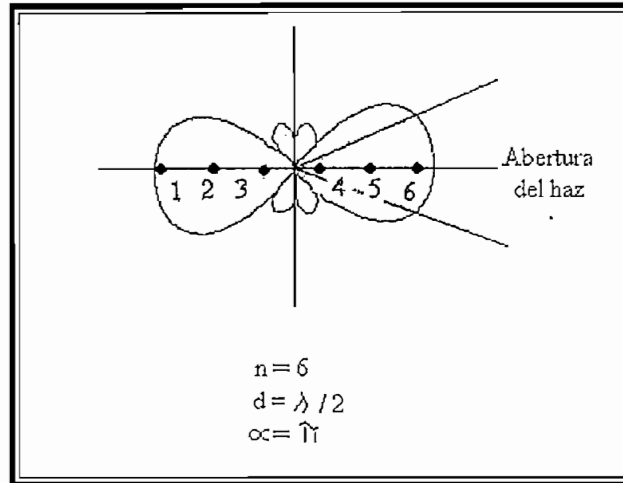


Fig. 1.31 Agrupación de seis radiadores puntiformes.

## 1.8 ARREGLOS DE ANTENAS REALES

### 1.8.1 DIPOLOS COLINEALES

Una antena colineal es el apilamiento de varias antenas, – sean estos dipolos de media onda o algún otro tipo de antena – las mismas que son alineadas verticalmente extremo con extremo, y alimentadas cada una con corrientes de la misma fase. La distancia entre los centros de los dipolos que conforman la antena colineal es casi de  $\lambda/2$ . Para tener una mejor idea, considérese una antena colineal formada por dos dipolos  $\lambda/2$  (figura 1.32) y situados en posición vertical, uno junto al otro, de forma que sus radiaciones se sumen en la dirección perpendicular a las dos antenas y se resten en las direcciones oblicuas.

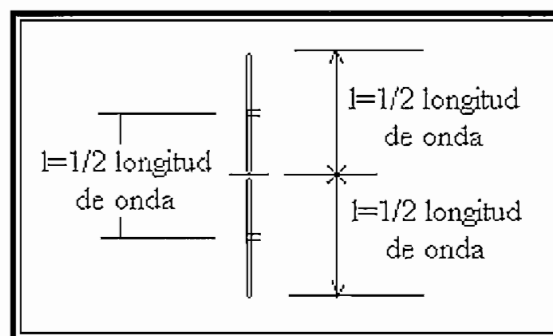
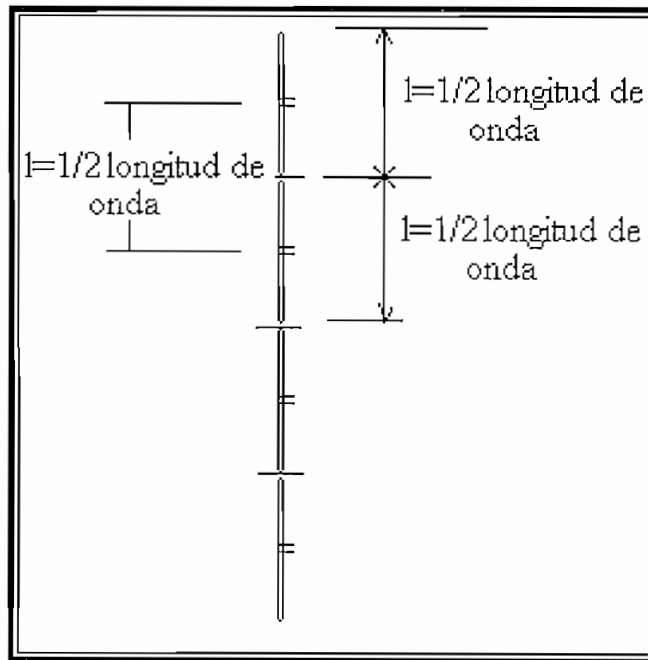


Fig. 1.32 Dipolos colineales.

La ganancia de un dipolo  $\lambda/2$  está en el orden de 1,64 dB, con la agrupación colineal de dipolos, duplicamos la directividad del sistema y, teóricamente, obtenemos una ganancia que es el doble de la de un dipolo único (aproximadamente 3 dB). Por lo tanto, entre las antenas verticales las que más se destacan por su ganancia son las antenas colineales. Pero, si vale suponer la antena colineal formada por dos dipolos  $\lambda/2$ , también se puede suponer formada por cuatro dipolos (figura 1.33), con lo cual se volvería a duplicar la directividad del sistema y teóricamente, a obtener nuevamente una ganancia adicional de 3 dB.

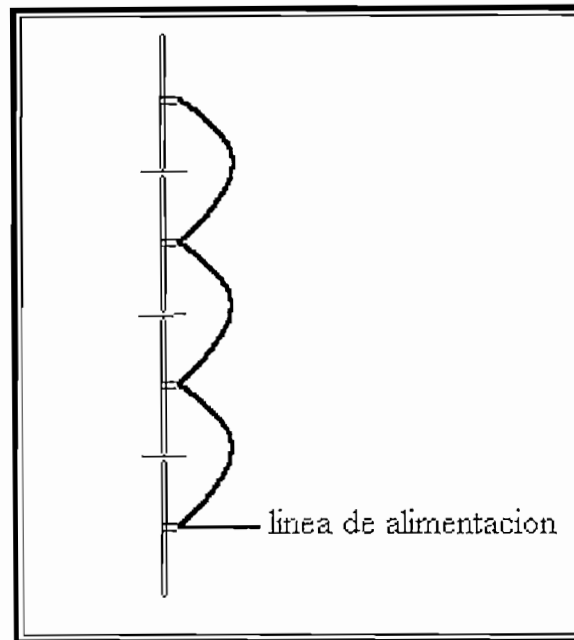


*Fig. 1.33 Antena colineal constituida por cuatro dipolos de media onda.*

De esta misma manera se puede seguir apilando dipolos, uno tras otro, obteniendo cada vez mayores ganancias en el sistema; sin embargo, mientras mayor sea el número de dipolos colineales en la antena, mayor será la longitud de la misma y por ende, su manejo resultará más difícil.

Teóricamente, se puede construir antenas colineales con alimentación independiente para cada dipolo, tan grande como se quiera.

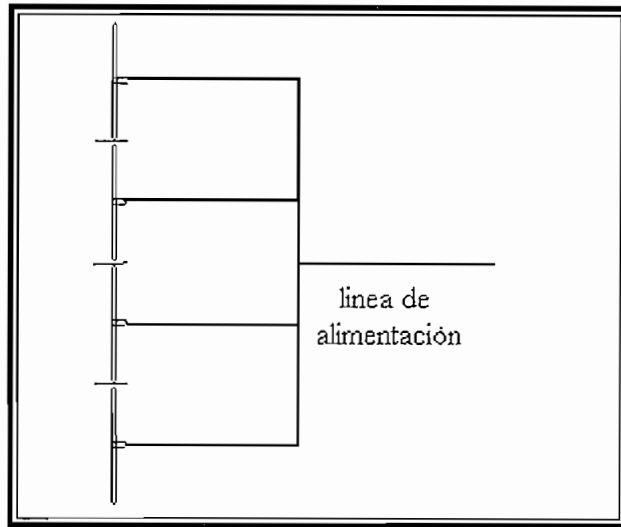
No obstante, si se alimenta a todo el arreglo a través de un solo dipolo (tramo a tramo), la energía se propagará de un elemento radiante a otro, perdiéndose en el camino mucha energía radiada, que es precisamente lo menos deseado en una antena (figura 1.34).



*Fig. 1.34 Dipolos alimentados tramo a tramo.*

Como la energía es radiada a medida que se propaga por cada dipolo – hacia arriba como en el caso de la figura 1.34 – cada vez será menor la corriente en cada dipolo, a medida que ascendemos por la antena. Y la aportación o mejora de la ganancia y directividad hacia el horizonte será menor por cada uno que se le añada, para evitar esto, generalmente se usan arreglos de dipolos  $\lambda/2$  en número de a tres.

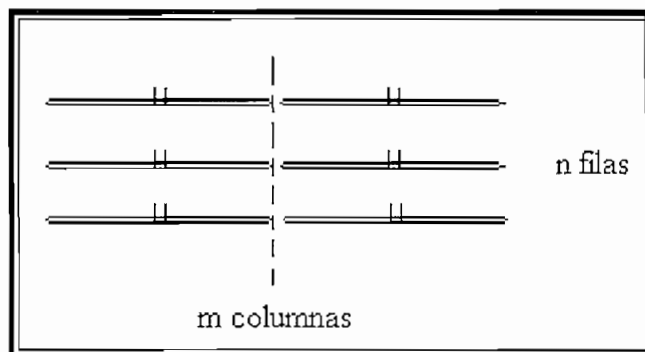
En el caso de que cada dipolo se alimente con un cable independiente (figura 1.35), es evidente que se pueden poner cuantos dipolos se desee, puesto que todos recibirán una potencia igual, siempre que el reparto en los cables de alimentación esté bien hecho.



*Fig. 1.35 Alimentación de dipolos con cables independientes.*

### 1.8.2 DIPOLOS EN FILA

Los dipolos en fila son un arreglo rectangular de antenas que consiste en una agrupación de  $n$  filas de  $m$  dipolos alineados y alimentados en fase (figura 1.36). Esto puede ser considerado como una agrupación de  $m \times n$  radiadores puntiformes que dan la ganancia  $G$  de  $m \times n$  en comparación con la de un dipolo único. El diagrama de campo en el plano horizontal, se obtiene multiplicando el diagrama de campo de un dipolo único por el factor de agrupación. El factor de agrupación es el producto del diagrama debido a una línea horizontal de radiadores puntiformes, por el de una agrupación vertical de radiadores, obteniendo todos los diagramas para el mismo plano horizontal.



*Fig. 1.36 Dipolos en fila.*

## 1.9 MULTIPLICACIÓN DE DIAGRAMAS DE RADIACIÓN

Encontrar el lóbulo de radiación de un radiador isotrópico ó el de un dipolo de media onda no es nada difícil, incluso los diagramas de radiación para un arreglo de 2, 3, 4, 5 y hasta 6 radiadores isotrópicos – sean estos broadside o endfire – resultan simples de establecer.

En la práctica, para la implementación de los arreglos de antenas se utilizan dipolos de una determinada longitud de onda (es especial de  $\lambda/2$ ), cuyos lóbulos de radiación independientes determinan la forma del diagrama de radiación del arreglo.

La multiplicación de diagramas tiene tres pasos a seguir:

1. Se reemplaza cada antena real por un radiador puntiforme y se obtiene su diagrama de radiación.
2. Se debe obtener el diagrama de radiación; de un solo elemento del arreglo y sólo de uno.
3. Por último, se deben multiplicar los lóbulos de radiación encontrados anteriormente y obtener el resultado.

Matemáticamente, el diagrama resultante de una agrupación de antenas, se podría encontrar multiplicando las amplitudes y sumando las fases de los campos de radiación, tanto de los N radiadores isotrópicos, como de la antena real.

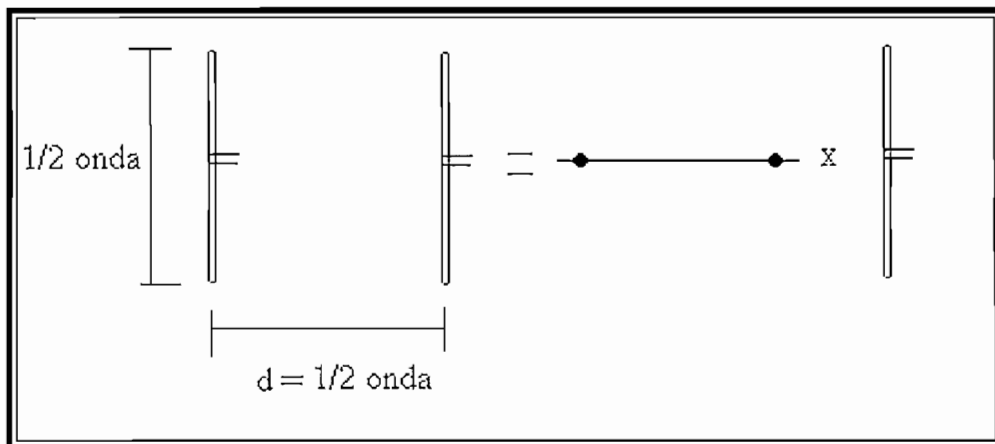
$$|E_{\theta \text{ arreglo de radia. isot.}} \times E_{\theta \text{ antena real}}| = \sqrt{|E_{\theta \text{ arr. de radia. isot.}}|^2 + |E_{\theta \text{ antena real}}|^2} \quad (63)$$



Donde:  $E\theta_{\text{arreglo de radia. isot.}}$  es la amplitud del campo de radiación producido por el arreglo de los  $N$  radiadores isotrópicos, y  $E\theta_{\text{antena real}}$  la amplitud del campo producido por una antena real. La segunda parte de esta expresión corresponde a la suma de las fases de cada campo producido, tanto por el arreglo de radiadores, como por la antena real.

En la práctica, esto no es utilizado; resulta más simple trabajar directamente con los diagramas de radiación, este método consiste en dividir al arreglo de antenas en dos sistemas individuales: el primero como una agrupación de  $n$  radiadores y el segundo como una antena única. De cada sistema se obtiene su respectivo diagrama de radiación, la multiplicación de los diagramas se logra, superponiendo los lóbulos de radiación; el diagrama resultante del arreglo será el área común a los dos lóbulos de radiación.

Para entender mejor esto, considérese una agrupación "broadside" de dos dipolos  $\lambda/2$  colocados en forma vertical, separados por una distancia de  $\lambda/2$  uno del otro. Gráficamente tendríamos lo siguiente:



*Fig. 1.37 Arreglo de dos dipolos de media onda.*

Tanto los diagramas de radiación de los 2 radiadores como el de una sola antena son de la forma:

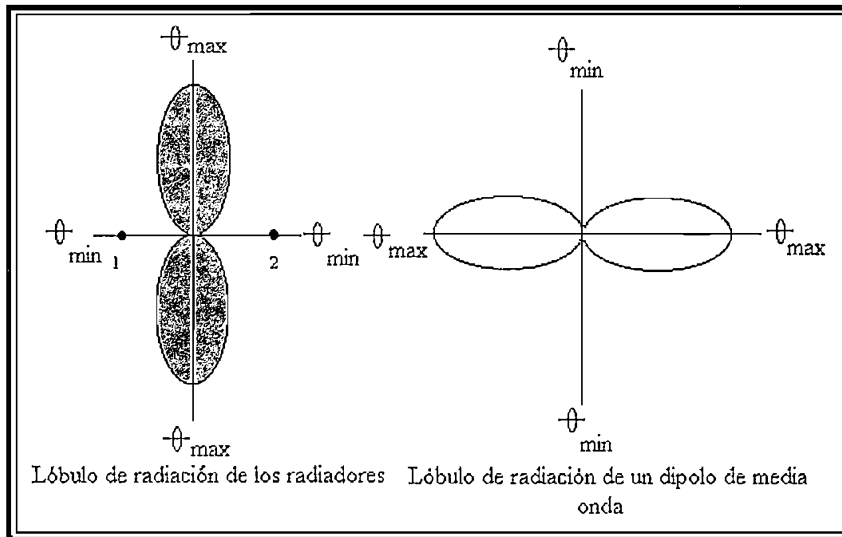


Fig. 1.38 Lóbulos de radiación del arreglo.

El área común que resulta de la superposición de los diagramas anteriores, corresponden al lóbulo de radiación del arreglo.

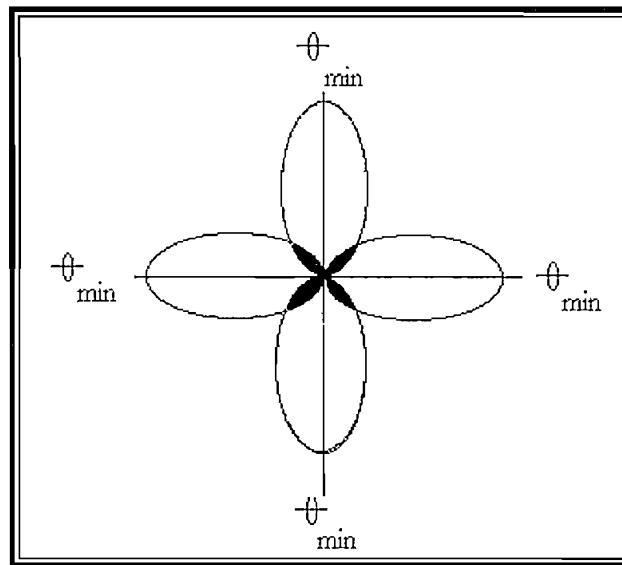


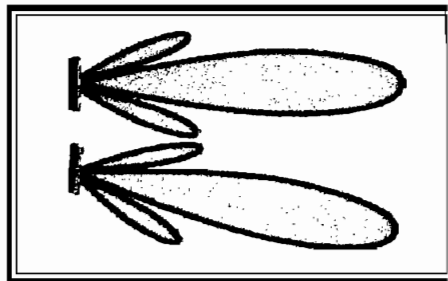
Fig. 1.39 Diagrama de radiación resultante del arreglo de dos dipolos de media onda.

De la misma manera se puede proceder para diferentes tipos de arreglos sean estos con antenas colineales, en fila, verticales u horizontales, ya sea en configuración "broadside o endfire".

## 1.10 ANTENAS DE TELEFONÍA MÓVIL

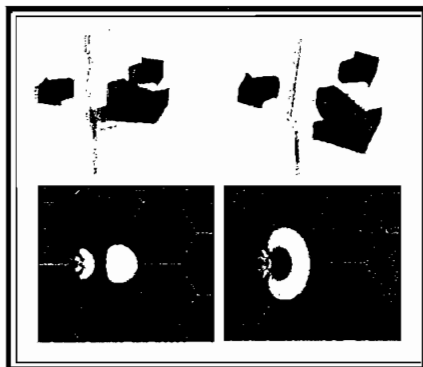
### 1.10.1 ANTENA “DOWN TILT”

La antena “down tilt” sirve como método de enfoque de la radiación, con el cual se puede dirigir hacia abajo la radiación que fluye de la antena, con el objetivo de reducir o concentrar la radiación excesiva en el área de cobertura que está siendo abarcada por la misma, buscando optimizar el “handoffs\*”, corrigiendo problemas de interferencia con celdas pequeñas por la consecuencia del aumento de capacidad de tráfico.



*Fig. 1.40 Diagrama de radiación de una antena Down tilt.*

El método más simple de efectuar el “down tilt” es el “down tilt” mecánico. Esto es inclinar la antena hacia abajo, utilizando unos ejes de la antena que permiten este tipo de ajuste.



*Fig. 1.41 “Down tilt” mecánico y lóbulos de radiación.*

\* El handoff es el proceso de pasar una llamada de un canal de voz en una celda a un nuevo canal en otra celda o en la misma, a medida que el usuario se mueve a través de la red.

Como se puede observar en el gráfico, el área frontal de cobertura es reducida, pero la cobertura de la región lateral de la antena con "down tilt" mecánico aumenta, esto se debe a que los lóbulos de irradiación laterales no se apoyan hacia abajo del cuerpo de la antena.

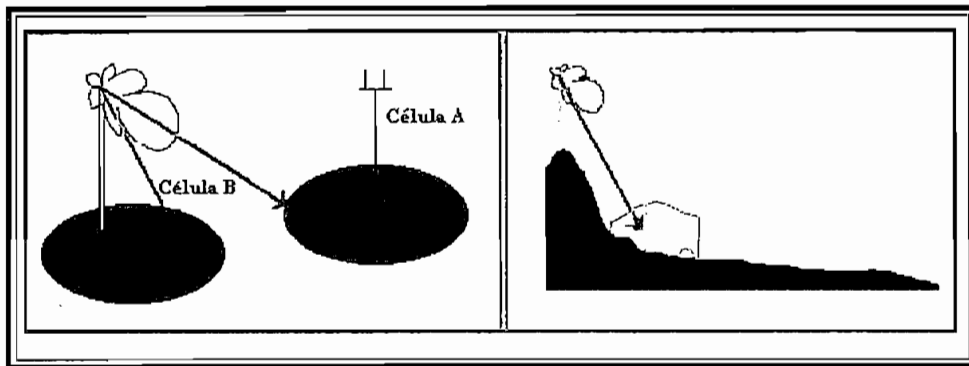
El Downtilt es comúnmente usado por dos razones:

1.- Reduce interferencia.

- Reduce la radiación a celdas co-canal distantes
- Concentra la radiación dentro de una célula servidora

2.- Previene "Overshoot".

- Mejora la cobertura de blancos cercanos debajo de la antena, de otra manera, dentro del patrón de "ceros" de la antena.



*Fig. 1.42 Formas de radiación de la antena Down tilt.*

Si se considera los ángulos de depresión vertical, estos:

- Son importantes para fijar patrones verticales vs. blancos de cobertura.
- Sirven para comparar los ángulos hacia objetos vs. el patrón vertical de la antena.
- Se utilizan para no poner un cero de la antena hacia un blanco de cobertura importante.

### 1.10.2 ANTENAS ADAPTATIVAS

El término de antena adaptativa se les da a los arreglos que son capaces de ajustar su diagrama de forma prefijada, dependiendo de las fases y de las amplitudes recibidas desde fuentes externas.

El ejemplo más típico de una antena adaptativa es la denominada SLC ("Sidelobe Canceller Antenna"), que ajusta el diagrama de forma que aparece un nulo en la dirección de la interferencia. Una antena como la indicada consiste en un elemento de elevada ganancia y varias antenas auxiliares con un diagrama prácticamente omnidireccional. El número de antenas auxiliares determina el máximo número de interferencias que se pueden cancelar.

Otro ejemplo es el denominado SLB ("Sidelobe Blanking Antenna"). En este caso se compara la señal recibida a través de la antena principal y la antena auxiliar. Se desconecta el receptor cuando la señal que llega es superior en el canal auxiliar.

Los algoritmos matemáticos relacionados con las antenas adaptativas son relativamente complejos. La implementación práctica se puede realizar en forma analógica o digital, últimamente muy utiliza la tecnología digital.

El objetivo básico en la actualidad es la reducción de los tiempos de convergencia de los algoritmos y la obtención de arreglos superdirectivos, con un gran poder de resolución.

Las antenas adaptativas pretenden mejorar las características de eficiencia y funcionalidad, teniendo una serie de prestaciones avanzadas, entre las que se incluye:

- Extender/contraer el área de cobertura en una determinada dirección (ajuste dinámico).
- Mejora capacidad de manejo de congestión.
- Minimiza interferencia co-canal.
- Seguimiento de estaciones móviles.
- Disminución de desvanecimiento multitrayecto.

### 1.10.3 ARREGLOS DE ANTENAS ADAPTATIVAS

La antena adaptativa representa lo más próximo a la tecnología de antenas inteligentes (que serán vistas en el siguiente capítulo).

Las antenas inteligentes utilizan una variedad de nuevos algoritmos, el sistema adaptable se aprovecha de su habilidad para poder localizar eficazmente y buscar varias señales que se encuentran a su alrededor, para minimizarlas frente a la señal que se desea recibir, la señal a recibir es aumentada al máximo para que no sea interferida por señales vecinas.

Los elementos de la antena pueden colocarse en forma lineal, redonda o en configuración plana, que es utilizada en una estación, también pueden usarse en teléfonos móviles o computadoras portátiles.

En los sistemas de antenas adaptables, la comunicación entre un usuario y una estación base se da una manera diferente. Los arreglos adaptables utilizan algoritmos sofisticados para poder distinguir continuamente entre las señales deseadas, las múltiples fases, la interferencia de señal, así como calcular la llegada de las señales al receptor. Con esta clase de antenas se puede transmitir las señales sin que puedan ser interferidas.

La habilidad de rastrear a los usuarios fácilmente con los lóbulos principales y las interferencias con los nulos\* asegura que este tipo de tecnología aumenta al máximo la capacidad de los sistemas debido a que no existen macro sectores ni modelos predefinidos.

En la figura 1.43 se ilustran las áreas relativas para los sectores convencionales y para los que utilizan el sistema de antenas adaptables.

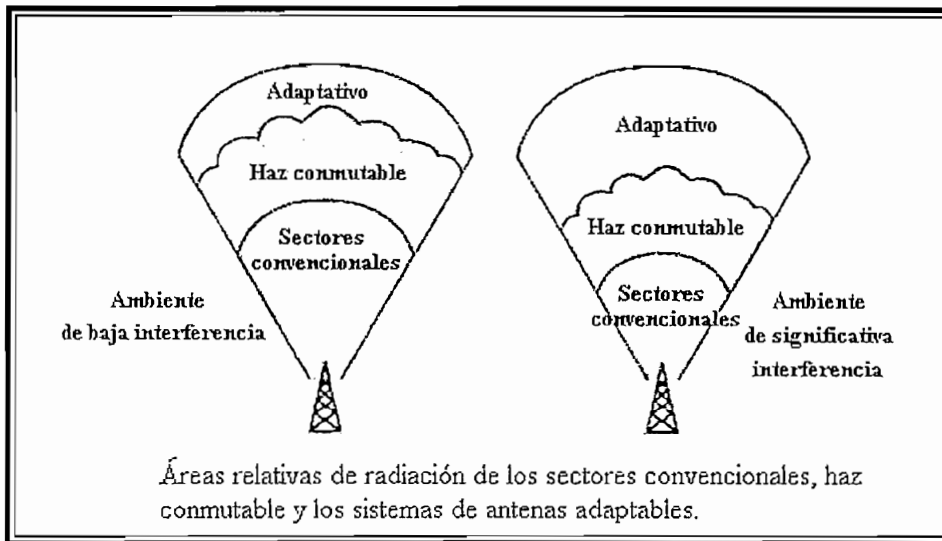
Tanto los sistemas de antenas adaptables como los de haces conmutables son dos tipos de sistemas de antenas inteligentes que proporcionan ganancias superiores por encima de los sectores convencionales.

El bajo nivel de interferencia en el lado izquierdo representa un nuevo sistema inalámbrico con los más bajos niveles de penetración.

---

\* *Los nulos o ceros son áreas donde no existe cobertura.*

El nivel de interferencia en el lado derecho representa un sistema inalámbrico con más usuarios.



*Fig. 1.43 Áreas de radiación de las antenas.*

#### 1.10.4 ARREGLO VERTICALES COLINEALES

- Son esencialmente omnidireccionales en el plano horizontal.
- Su ganancia de potencia es aproximadamente igual al número de elementos.
- Presentan en el patrón vertical, cero salidas a menos que sea deliberadamente llenada.

#### 1.10.5 ARREGLO EN EL PLANO HORIZONTAL

Son direccionales en el plano horizontal: lo cual es útil para sectorización.

Dentro de estas tenemos, las antenas:

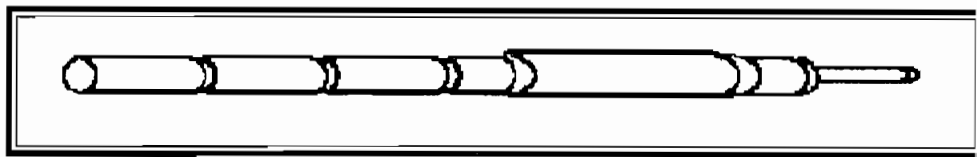
- Yagi: Constituida por un único elemento activo o controlador, emplea elementos parásitos: directores y reflectores paralelos a la antena, los cuales mejoran la directividad de ella.

- Log-Periódica: Posee varios elementos activos y un ancho de banda grande.



*Fig. 1.44 Arreglo en el campo horizontal.*

#### 1.10.6 Arreglo vertical colineal para uso omnidireccional



*Fig. 1.45 Arreglo vertical colineal.*

En la familia de antenas celulares omnidireccionales; el número de elementos determina:

- Tamaño físico
- Ancho del haz
- Ganancia
- Primer ángulo cero

Los modelos con muchos elementos tienen un haz de luz muy delgado.

- Requieren monturas estabilizadoras y una alineación cuidadosa.
- Cuidando que los ceros no caigan en áreas de cobertura importantes.



### 1.10.6.1 Arreglos colineales típicos

Número de elementos	Ganancia de Potencia	Ganancia (dB)
1	1	0.00
2	2	3.01
3	3	4.77
4	4	6.02
5	5	6.99
6	6	7.78
7	7	8.45
8	8	9.03
9	9	9.54
10	10	10.00
11	11	10.41
12	12	10.79
13	13	11.14
14	14	11.46

*Tabla 1.1 Arreglo colineales típicos*

### 1.10.7 ARREGLOS PARA ANTENAS SECTORIZADAS

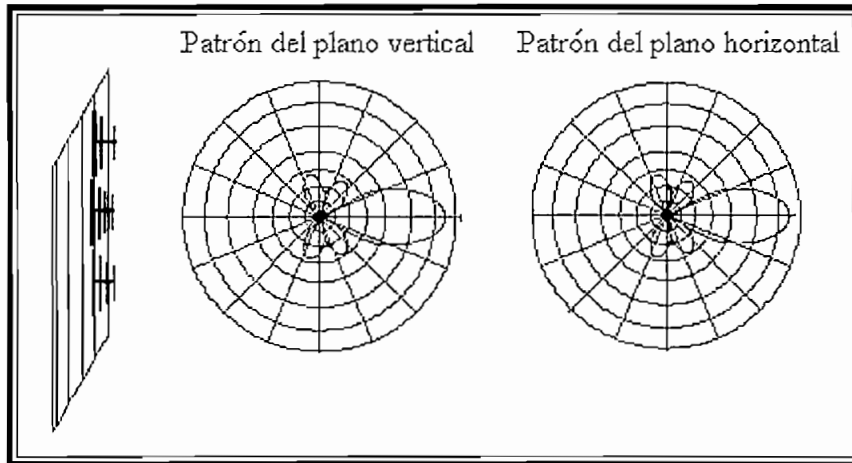
Las antenas sectorizadas típicas comerciales son combinaciones verticales de dipolos, yagis o elementos log-periódicos con reflector (panel o rejilla) trasero.

El patrón de plano vertical esta determinado por:

- El número de elementos verticalmente separados los cuales varían en número de 1 a 8, afectando a la ganancia y el ancho del haz en el plano vertical.

El patrón de plano horizontal esta determinado por:

- El número de elementos horizontalmente espaciados, y
- La forma o reflectores.



*Fig. 1.46 Antenas sectorizadas.*

Todos estos tipos de antenas son usados en tecnología celular.

# CAPITULO 2

## Antenas inteligentes

## CAPÍTULO 2

Las últimas tendencias en comunicaciones móviles, principalmente hacia UMTS<sup>1</sup>, apuntan a la utilización de antenas inteligentes o adaptativas para mejorar la capacidad y la calidad de los servicios de telecomunicaciones, así como para ofrecer un mayor número de servicios inalámbricos. Todo ello es posible gracias a las antenas inteligentes, que dirigen la señal al usuario en forma directiva. El sistema funciona de tal forma que cuando el usuario se desplaza o cambia la distribución geográfica del tráfico, se modifica la dirección del lóbulo para que se dirija hacia él.

Las antenas adaptativas permiten transmitir el haz en varios lóbulos muy directivos, de forma que se reduce la interferencia en la red considerablemente y se incrementa la capacidad en ambos sentidos, ofreciendo a los operadores la posibilidad de compartir infraestructuras, ahorrando energía y mejorando notablemente el impacto ambiental. Además de una reducción en la interferencia y una disminución significativa en el número de estaciones necesarias para alcanzar un determinado nivel de servicio. Aunque esta tecnología pueda ser unitariamente algo más cara que la tradicional, finalmente los operadores obtendrán significativos beneficios económicos. Además, se trata de una tecnología que puede implementarse en los actuales nodos de las redes celulares sin necesidad de intervenir en el terminal del usuario. En vista de los grandes beneficios que presenta esta nueva tecnología de antenas inteligentes para las comunicaciones móviles, se ve la necesidad de hacer un estudio de ella, no sólo para conocer sus características, ventajas y funcionamiento; si no más bien, para estar acorde con el avance tecnológico mundial, de tal forma que las futuras generaciones tengan un documento, cuyo contenido les permita empaparse de estas nuevas tendencias tecnológicas en las comunicaciones.

---

<sup>1</sup> UMTS (Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles), ver el anexo A.

## ANTENAS INTELIGENTES

### 2.1 INTRODUCCIÓN A LAS ANTENAS INTELIGENTES

Las antenas inteligentes son aquellas que poseen la capacidad de ajustar su lóbulo de radiación de forma prefijada. El sistema funciona de tal forma que cuando el usuario se desplaza, se modifica la dirección del lóbulo para que se mueva con él.

La tecnología de antenas inteligentes o adaptativas en comunicaciones móviles ha alcanzado enorme interés mundial en los últimos años, debido que la introducción de este tipo de antenas en el mercado de las comunicaciones a posibilitado un gran aumento en capacidad: un aumento tres veces mayor en los sistemas de TDMA<sup>2</sup> y cinco veces para los de CDMA<sup>3</sup>, aproximadamente. Otras ventajas incluyen mayor ancho de banda y el potencial para introducir nuevos servicios.

Los mayores inconvenientes y factores del costo radican en el incremento de complejidad de transceptores y de administración de recurso en la radio bases.

En el otoño de 1998 Ericsson, en cooperación con "Mannesmann Mobilfunk" en Alemania, se convirtió en el primero en cursar tráfico comercial a través de una estación base, empleando antenas inteligentes.

Sé prevé que en el futuro se experimentará un aumento enorme de tráfico por los sistemas de comunicaciones móviles y personales, todo esto consecuencia del aumento en él número de usuarios así como, la introducción de nuevos servicios que requieren altas velocidades para la transmisión de datos.

Esta tendencia se observa en los sistemas de la segunda generación<sup>4</sup> y continuará ciertamente para sistemas de la tercera generación que sé están introduciendo en el ámbito mundial. El aumento en tráfico, demandará tanto a los fabricantes como a los operadores una mayor capacidad en las redes.

---

<sup>2</sup> TDMA, ver el anexo A.

<sup>4</sup> Generación de los sistemas de telecomunicaciones, ver el anexo A

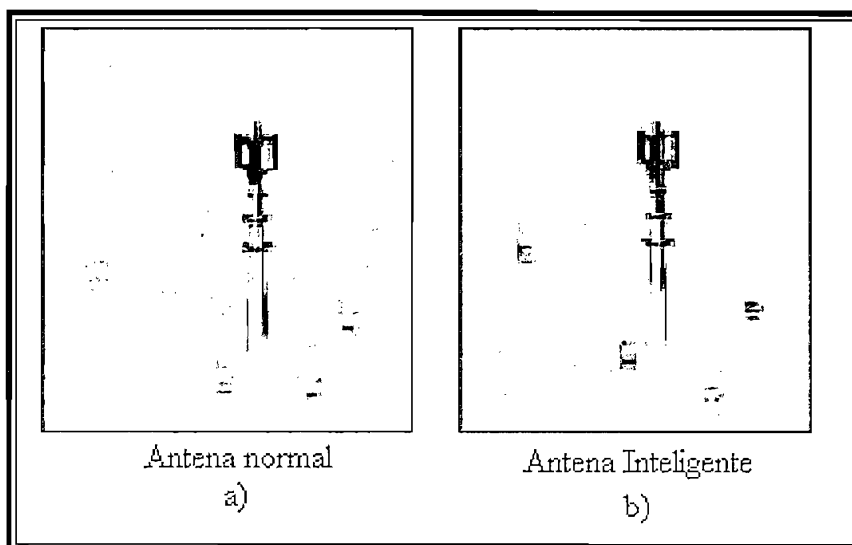
<sup>3</sup> CDMA, ver el anexo A

---

*Antenas Inteligentes*

Hoy en día, una de las técnicas más prometedoras para aumentar la capacidad en sistemas celulares, debido al aumento de la demanda, son las antenas inteligentes; y aunque es factible también usar estas técnicas en, por ejemplo, los sistemas satelitales y las WLAN (redes de área local inalámbricas), la discusión aquí se limita a los sistemas celulares en el rango de frecuencia 1-2 GHz. En estas frecuencias está la dificultad de introducir antenas inteligentes en las estaciones móviles debido al espacio limitado que se tienen en las mismas y al tamaño que conllevarán las antenas en términos de longitud de onda.

La razón fundamental para usar antenas inteligentes en una red de telefonía móvil es la de incrementar su capacidad, esto es, la posibilidad de manejar más usuarios por estación base. Dicha capacidad depende, principalmente, del nivel de interferencia comparado con la potencia recibida (SINR), ya que la principal fuente de ruido en estos sistemas es la interferencia de otros usuarios.



*Fig. 2.1 Formas de radiación de la antena inteligente.*

En GSM<sup>5</sup>, dos usuarios no pueden utilizar en el mismo instante el mismo intervalo de tiempo y la misma frecuencia portadora, ya que se interferirían entre sí. Por ello, debe existir una determinada separación entre células donde se reusa la misma frecuencia de portadora y así evitar interferencias co-canal.

---

<sup>5</sup> GSM, ver el anexo A.

Al ser el número de frecuencias limitado, esto reduce el número de posibles células en un área y por tanto, la capacidad del sistema.

Mientras que las estaciones base convencionales radian energía siempre y de forma omnidireccional (figura 2.1a), con las antenas inteligentes, al hacer uso de antenas adaptativas, la señal se envía directamente a cada usuario, creando "rayos" individualizados, que sólo existen cuando se requiere el servicio (figura 2.1b), consiguiéndose, pues, un considerable ahorro energético.

Además, al "dirigir" la energía hacia el usuario, se hace un uso mucho más eficiente de la misma, permitiendo mayores coberturas y alcances, con lo que el número de estaciones base (BTSs) necesarias se puede reducir entre 3 y 4 veces respecto a la situación actual. Ello, unido al uso de técnicas de multiplexación, que permitirá la compartición de estaciones base por parte de distintos operadores, y al hecho de que se puedan usar las mismas antenas inteligentes para diversos estándares (por ejemplo GSM y UMTS), hará mucho más eficientes a las redes resultantes, así como disminuirá notablemente la inversión requerida para el despliegue de las mismas y redundará en un progresivo descenso del número de estaciones base, con la correspondiente mejora en lo referente a impacto ambiental y visual causado por éstas.

Ahora bien, la tecnología de las antenas inteligentes no sólo es conveniente a la hora de desplegar nuevas redes, sino que también se trata de una buena solución para la optimización de las redes actuales ya desplegadas, fundamentalmente para resolver los problemas de capacidad de las células con un elevado tráfico.

Al poder tener acceso a información acerca de la posición de los móviles, podrían introducirse nuevos servicios como radiolocalización de llamadas de emergencia, publicidad de servicios cercanos, gestión avanzada de flotas, etc. Con la introducción de la tecnología de las antenas inteligentes, existe la posibilidad de aislar, durante un intervalo de tiempo configurable, determinadas zonas o lugares en los que no se quiera o no interese que haya cobertura o exposición a radiaciones (escuelas, hospitales, cines,...).

Por último, supondrá una mejora de la seguridad, ya que es más difícil interceptar una comunicación cuando se usan antenas inteligentes puesto que para ello, el equipo ajeno debería colocarse en la misma dirección en la que apunta la antena.

### **2.1.1 APRECIACIÓN GLOBAL**

Es conocido que una antena en un sistema de telecomunicaciones es el puerto a través del cual la energía de la frecuencia de radio (RF) es transmitida al mundo externo y viceversa, al receptor del mundo externo.

Sin embargo, las antenas han sido las más abandonadas de todos los componentes de un sistema de comunicaciones personales. Todavía, la manera en la que la energía es distribuida y recogida del entorno de la antena, depende del uso eficaz de espectro, del costo de establecer nuevas redes, y de la calidad de servicio proporcionada por esas redes, es decir de las características de un sistema inalámbrico.

Se considera que las antenas inteligentes son la última innovación tecnológica que tienen el mayor potencial para aumentar la capacidad de los sistemas de comunicaciones inalámbricas. Las antenas inteligentes tienen las ventajas siguientes con relación a los sistemas inalámbricos: un aumento de los ingresos, incrementa la calidad de las comunicaciones, aumento de la capacidad del sistema, bajo consumo de baterías en los terminales móviles, localización geográfica del usuario y reducción de la interferencia a otros usuarios.

Incluso los sistemas de radar pueden optimizar el recurso espacio-tiempo con la utilización de las antenas inteligentes.

### **2.1.2 CARACTERÍSTICAS DE UN SISTEMA INALÁMBRICO**

#### **2.1.2.1 Cobertura**

La cobertura del sistema se refiere a las zonas geográficas en las que se va a prestar el servicio. La tecnología más apropiada es la que permite una máxima cobertura con un mínimo de estaciones base, manteniendo las exigencias de calidad que requieren los usuarios. La tendencia en cuanto a cobertura de la red



es permitir al usuario acceso a los servicios en cualquier lugar, ya sea local, regional, nacional e incluso mundial, lo que exige acuerdos de interconexión entre diferentes operadoras para extender el servicio a otras áreas de influencia diferentes a las áreas donde cada red ha sido diseñada.

#### **2.1.2.2 Capacidad**

Se refiere a la cantidad de usuarios que se pueden atender simultáneamente. Es un factor muy importante, pues del adecuado dimensionamiento de la capacidad del sistema, depende la calidad del servicio que se preste al usuario.

Esta capacidad se puede incrementar mediante el uso de técnicas tales como la reutilización de frecuencias, la asignación adaptativa de canal, el control de potencia, saltos de frecuencia, algoritmos de codificación, diversidad de antenas en la estación móvil, etc.

#### **2.1.2.3 Diseño de las celdas**

La estructura de las redes inalámbricas se diseña teniendo presente la necesidad de superar los obstáculos y manejar las características propias de la radio propagación. Disponer de un radio enlace directo para cada suscriptor, predecir las características de la señal en zonas urbanas donde la densidad de suscriptores es alta y las edificaciones tienen gran influencia en la propagación, son factores que establecen limitaciones fundamentales en el diseño y ejecución de los sistemas inalámbricos orientados a las necesidades personales y empresariales.

Los mecanismos que gobiernan la radiopropagación son complejos y diversos, y generalmente se atribuyen a fenómenos que sufren las ondas electromagnéticas en su transporte, tales como reflexión, difracción, dispersión y en general pérdidas de propagación. Los requerimientos para reducir el efecto de estos fenómenos en las comunicaciones son definidos de diversas maneras dependiendo de la tecnología utilizada.

Según la capacidad y cobertura requeridas en el área de influencia de las redes, su diseño implicará la utilización de celdas de diferentes radios y las antenas de las estaciones base presentarán diferentes alturas y potencias de transmisión. De allí surgen las definiciones de sistemas macrocelulares, microcelulares y picocelulares.

Las macroceldas son los modelos de comunicación más comunes para operación celular. El rango de cubrimiento de éstas se encuentra entre 1 y 30 kilómetros, por lo que son utilizadas principalmente para el manejo del tráfico originado por usuarios que se encuentran en movimiento a gran velocidad, disminuyendo de esta forma el número de handoff y aumentando de esta manera la calidad del servicio al reducir la probabilidad de caída de llamadas.

El uso de microceldas (con rango de cubrimiento entre 100 y 1000 metros) incrementa la capacidad de la red, ya que permite hacer un mayor manejo de tráfico y hace posible la utilización de potencias de transmisión muy bajas. Desde el punto de vista del operador, esto se traduce en ventajas adicionales como una mejor cobertura, bajos costos de la red por suscriptor y mayor eficiencia en la operación del sistema. Los requerimientos claves del sistema microcelular incluyen la coexistencia e interoperabilidad con los sistemas ya instalados, necesiándose un desarrollo mínimo de ingeniería para su diseño.

Al reducir mucho más el tamaño de las celdas, se logran las picoceldas (cubrimiento menor a 100 metros).

Como se sabe, una reducción en el tamaño de una celda implica un aumento en su capacidad (manejo de tráfico), por lo que las picoceldas se utilizan para brindar cobertura en las zonas identificadas como de muy alto tráfico, tales como centros de negocios o centros comerciales, donde los usuarios tienen un patrón de comportamiento de baja movilidad y se encuentran en un ambiente cerrado.

#### **2.1.2.4 Manejo del handoff (manos libres)**

El handoff es el proceso de pasar una llamada de un canal de voz en una celda a un nuevo canal en otra celda o en la misma, a medida que el usuario se mueve a

través de la red. El manejo de estas transiciones es un factor vital para garantizar la continuidad de las comunicaciones tanto de voz como de imágenes y datos, caso en el que es muy crítica la pérdida de información.

#### **2.1.2.5 Movilidad**

En la nueva generación de sistemas de telefonía celular digital, se involucra tanto la movilidad personal como la movilidad del terminal. La movilidad personal se refiere a la posibilidad de que el usuario tenga acceso a los servicios en cualquier terminal (alámbrico o inalámbrico) sobre la base de un número único personal y a la capacidad de la red para proveer esos servicios de acuerdo con el perfil de servicio del usuario.

Por otro lado, la movilidad del terminal es la capacidad de un terminal inalámbrico de tener acceso a servicios de telecomunicaciones desde diferentes sitios mientras está en movimiento, y también la capacidad de la red para identificar, localizar y seguir ese terminal.

#### **2.1.2.6 Calidad**

Uno de los parámetros a tener en cuenta para establecer las diferencias entre un sistema u otro, se refiere a la medida de calidad del servicio prestado. Las consideraciones que un usuario debe tener en cuenta a la hora de suscribirse a un servicio de telefonía móvil tienen que ver con el precio y las características de operación del dispositivo portátil, la disponibilidad de una variedad de servicios, la duración de la batería, la cobertura geográfica y la posibilidad de disfrutar el servicio en áreas diferentes a la que está inscrito, así como una confiable calidad de transmisión de voz y datos. Que no haya llamadas caídas o interrumpidas.

Por otra parte, la calidad es un factor de especial atención desde el punto de vista de los operadores, pues es conveniente lograr la rentabilidad de sus negocios paralelamente a la satisfacción de sus clientes, al dimensionar óptimamente las redes con la adecuada relación costo/beneficio, reducir los costos de operación y

mantenimiento, utilizar eficientemente el espectro radioeléctrico y disponer de mecanismos que permitan mejorar la operación del sistema de acuerdo con los nuevos avances tecnológicos que surjan.

#### **2.1.2.7 Flexibilidad y compatibilidad**

Debido a la interacción con redes de diferente tipo que debe soportar una red con cubrimiento global (tales como Red Digital de Servicios Integrados, Redes Celulares Análogas, Red Telefónica Pública Conmutada, Redes de Datos, Redes Satelitales), ésta debe suministrar las interfaces adecuadas para la interoperabilidad y poseer elevados niveles de gestión que permitan realizar cambios en su estructura inicial sin causar traumatismos en el funcionamiento.

#### **2.1.2.8 Costos de infraestructura**

Los costos de infraestructura se reflejan principalmente en el precio entre las estaciones base, ya que el manejo de una tecnología u otra en las mismas, no son un factor diferenciador. Lo deseable es que el dimensionamiento de la red minimice el número de celdas, la cantidad de equipos en general y sus costos de operación y mantenimiento.

### **2.1.3 EFECTOS SOBRE LA CAPACIDAD DEL SISTEMA**

En un sistema celular la comunicación entre el usuario y una estación base se producen dentro de una célula. Debido a que la banda de frecuencias es un recurso limitado, la capacidad es dada por la densidad de la célula, la distancia en el reuso de frecuencias y el número de usuarios que pueden ser servidos simultáneamente por cada estación base.

Las interferencias es uno de los factores que influyen enormemente en las prestaciones y en la capacidad del sistema celular, pues limitan el patrón de reutilización de frecuencias que el operador puede implementar, es decir, la menor distancia a la que deben encontrarse dos células del sistema para,

utilizando la misma frecuencia no interferirse de forma significativa. Este hecho resulta vital, tanto más si se toma en cuenta que el patrón de reutilización de frecuencias determina la capacidad del sistema en cuanto al tráfico que es capaz de absorber. Las técnicas para incrementar la capacidad de los sistemas celulares han incluido el uso de células más pequeñas llamadas microceldas, mediante la reutilización de frecuencias y mediante el uso de antenas direccionales en lugar de antenas comunes.

En un sistema de telefonía móvil celular las interferencias pueden tener muy distinta procedencia. Sin embargo, existen dos tipos que inciden especialmente en las prestaciones del sistema:

#### **2.1.3.1 Interferencias co-canal**

Las interferencias co-canal, se deben a las transmisiones procedentes de células no adyacentes en las que se utiliza la misma banda de frecuencias. Este tipo de interferencias es particularmente importante en los límites de la célula, donde la separación entre las células co-canal es mínima.

#### **2.1.3.2 Interferencias de canal adyacente**

Las interferencias de canal adyacente, se producen porque las bandas de transición de los filtros no eliminan toda la potencia de RF que es parte de los canales vecinos empleados en células colindantes. Los sistemas de antenas inteligentes (SAS) permiten una utilización del espectro radioeléctrico mucho más eficiente que los sistemas móviles convencionales.

Este aumento de las prestaciones es debido, principalmente, al dramático aumento de la relación portadora a interferente ( $C/I$ , portadora a interferencia de radiación), siendo este parámetro un indicador muy importante de la calidad de una llamada, desde dos puntos de vista. Para el usuario, una  $C/I$  más alta supone mayor movilidad, menos llamadas perdidas y una mejora sustancial de la calidad del audio. Para el operador, debido a que la mejora en la  $C/I$  permite definir

células de mayor tamaño y una reutilización de frecuencias mucho más fina, aumenta la capacidad global del sistema.

#### 2.1.4 EL ESPECTRO DE LA RADIO

Generalmente, los usuarios que se comunican mediante la misma estación base, son separados a través de frecuencia, como en FDMA<sup>6</sup> (Acceso Múltiple por División de Frecuencia); por tiempo, como en TDMA (Acceso Múltiple por División de Tiempo); o por código, como en CDMA (Acceso Múltiple por División del Código). Las antenas Inteligentes agregan una nueva manera de separación de usuarios, esto es por espacio, a través de SDMA<sup>7</sup> (Acceso Múltiple por División Espacial). En SDMA, los usuarios de una misma célula pueden usar el mismo canal físico de comunicación, lo cual se presenta como el paso final en el camino evolutivo hacia la optimización de los servicios.

## 2.2 DEFINICIÓN

En la literatura se usan varias definiciones diferentes para las antenas inteligentes. Una definición útil y consistente puede ser que la diferencia entre una antena del tipo inteligente/adaptativa ("smart/adaptive") y una antena del tipo tonta/fija ("dumb/fixed") es la propiedad de tener un diagrama de radiación adaptable y fijo, respectivamente.

Normalmente, el término "antena" comprende sólo la construcción mecánica que transforma las ondas electromagnéticas de radio frecuencia (RF) en señales eléctricas que viajan en un cable blindado y viceversa. Al hablar de antenas inteligentes, el término "antena" tiene un significado más extenso. Consiste en varios elementos radiadores, en una red que permite la combinación y división de la señal y en una unidad de mando.

---

<sup>6</sup> FDMA, ver el anexo A.

<sup>7</sup> SDMA, ver el anexo A

---

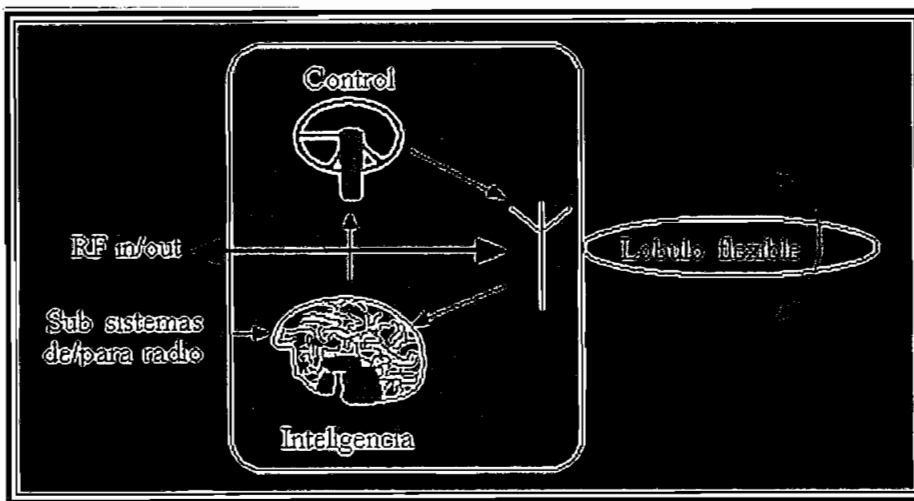
*Antenas Inteligentes*

La unidad de mando viene a constituir la inteligencia de la antena inteligente, normalmente se realiza usando un procesador digital de señales (DSP).

El procesador controla los parámetros de la alimentación de la antena, basados en varias entradas para perfeccionar el enlace de comunicaciones. Esto indica que las antenas inteligentes no son solo antenas, sino más bien adquieren un concepto de transceptores completos. Con esta consideración se puede tener una mejor apreciación de lo que es una antena inteligente para así dar una definición más exacta de ella, entonces:

Una antena inteligente es aquella que, en vez de disponer de un diagrama de radiación fijo, es capaz de generar o seleccionar haces muy directivos enfocados al usuario deseado, e incluso adaptarse a las condiciones radioeléctricas en cada momento.

La siguiente figura muestra gráficamente el concepto fundamental de la antena inteligente (figura 2.2).



*Fig. 2.2 Ilustración del concepto de una antena inteligente.*

## 2.3 FUNDAMENTOS BÁSICOS

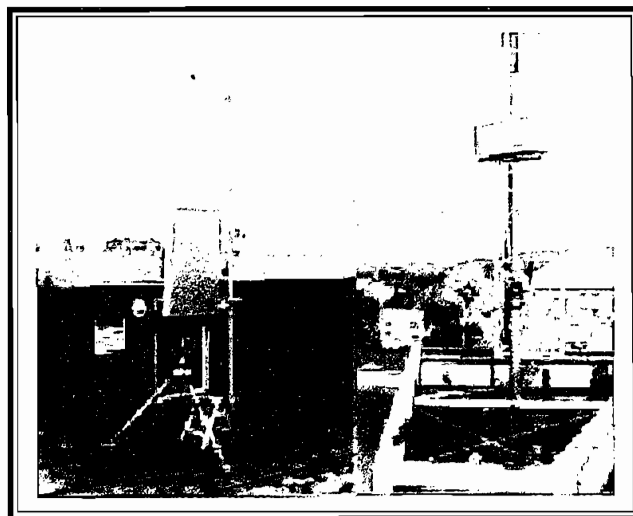
La teoría detrás de las antenas inteligentes no es nueva. Esta técnica fue usada durante muchos años en la guerra electrónica (EWF<sup>8</sup>) para contrarrestar el espionaje electrónico. En los sistemas de radares militares se usaron ya técnicas similares durante la Segunda Guerra Mundial.

En principio hay varias maneras para generar haces adaptables que fijen la posición de un usuario, por ejemplo a través de antenas mecánicamente dirigidas (por ejemplo: Antenas Down tilt).

Sin embargo, la tecnología sugerida casi exclusivamente para los sistemas de comunicaciones móviles sobre tierra y personales son los arreglos de antenas.

La idea principal para que la posición geográfica del usuario no tenga interferencia se basa en el aumento de la ganancia de la antena al máximo en la dirección deseada, utilizando lóbulos de radiación mínimos simultáneamente en las direcciones de la interferencia, con esto la calidad de las comunicaciones pueden ser mejoradas significativamente.

A continuación se muestra los prototipos de antenas inteligentes que permitirán tener un enfoque más general de su forma.



*Imagen 2.1 Prototipo de antena inteligente de la firma Allgon.*

---

<sup>8</sup> EWF, ver el anexo A.



En este punto, se presenta una incógnita, muy interesante: ¿Porqué el repentino interés de la tecnología de las antenas inteligentes en años recientes y no hace cinco o diez años? La respuesta muy probable será el hecho de que para la mayoría de los operadores el aumento de la capacidad y la eficacia del espectro, no ha sido una preocupación. También, que con el incremento del número de usuarios, las radio bases requerirán de la localización de los mismos, y por ende el costo computacional será mayor o que sólo en los años recientes, se han puesto disponibles procesadores con suficiente capacidad. Sin embargo, la verdadera razón esta en que este tipo de tecnología presenta un incremento importante de la capacidad de los sistemas, además de otras variadas ventajas en las redes celulares que incluyen un aumento en el ancho de banda, un nivel más alto de seguridad y la posibilidad para los nuevos servicios.

Por otro lado, no hay que olvidar que, hoy en día las antenas de la estación base tienen un comportamiento omnidireccional o sectorizado. Esto puede considerarse como un "derroche" de potencia debido a que la energía que sale de la estación base, radiará más en otras direcciones que hacia el usuario. Además, se experimentará, también, la potencia radiada por otros usuarios de otras direcciones como interferencia. La idea de las antenas inteligentes es usar antena en las estaciones base con lóbulos que no sean fijos, sino mas bien variables, pero adaptados a las condiciones de la telefonía celular actual.

Esto puede visualizarse como la antena que sólo dirige su energía hacia un punto determinado. La diferencia entre la fija y el concepto de la antena inteligente se ilustra en figura 2.3

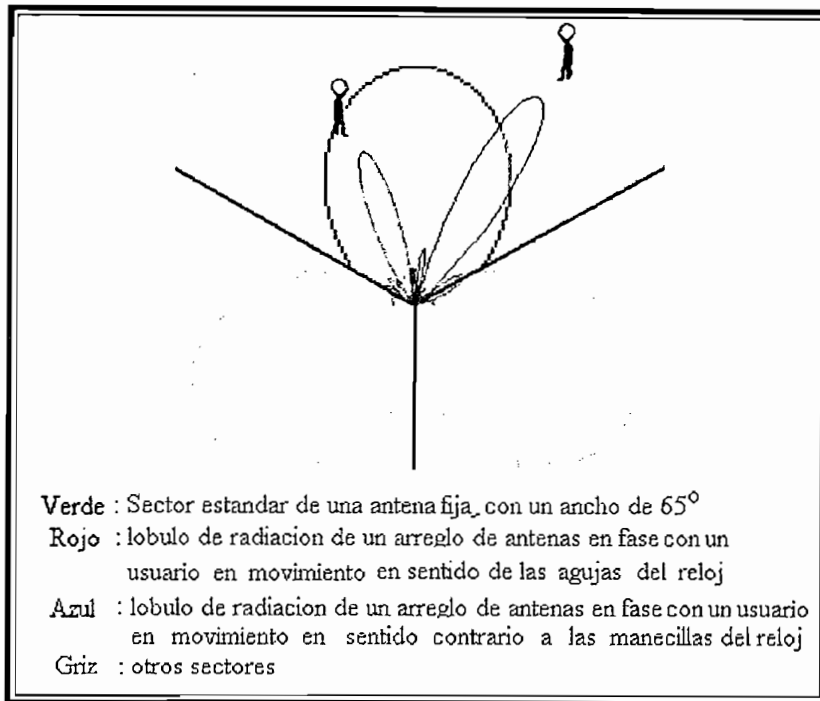


Fig. 2.3 Formas de radiación de las antenas convencionales e inteligentes.

### 2.3.1 RAZONES DEL USO DE ANTENAS INTELIGENTES

Como ya se dijo, una de las razones fundamentales para el uso de las antenas inteligentes, es el rápido crecimiento recientemente experimentado en la demanda de comunicaciones móviles. El hecho de que un sistema de antenas inteligentes en la estación base, permite incrementar al mismo tiempo tanto la capacidad del sistema como la calidad de la comunicación, constituyen una razón importante para el uso de las mismas.

Otra gran razón es que este tipo de tecnología se presenta muy beneficiosa para el medio ambiente; puesto que las antenas inteligentes en vez de radiar energía en todas las direcciones como las antenas tradicionales, envía la señal directamente a cada usuario y sólo cuando se requiere el servicio, consiguiéndose, pues, un considerable ahorro energético y una disminución de este tipo de contaminación. Si a esto sumamos, que la antena inteligente posibilita un considerable descenso y mejora del número de referente a impacto ambiental y visual causado por las estaciones base necesarias en una red.

## Antenas Inteligentes

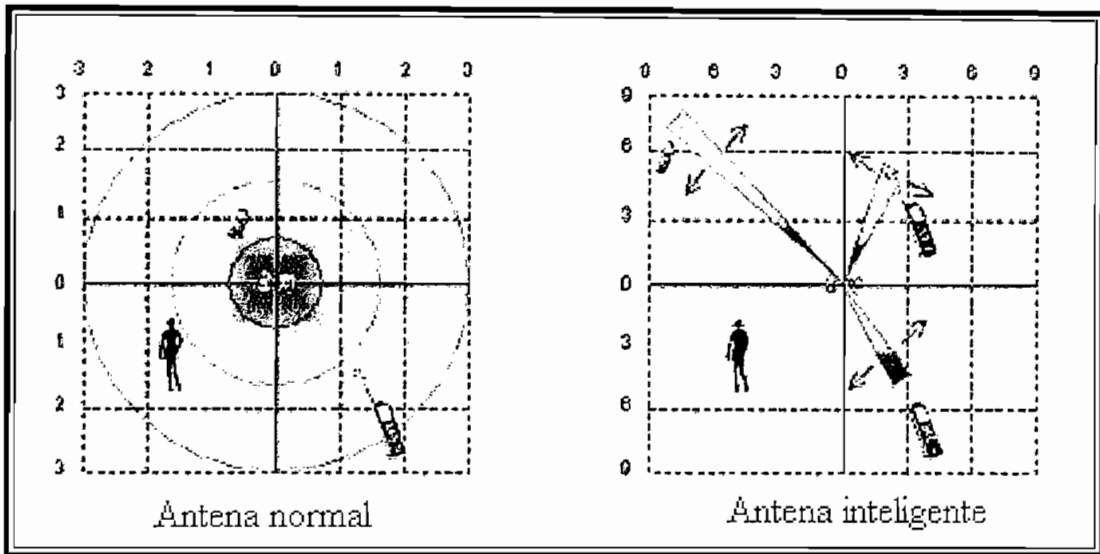
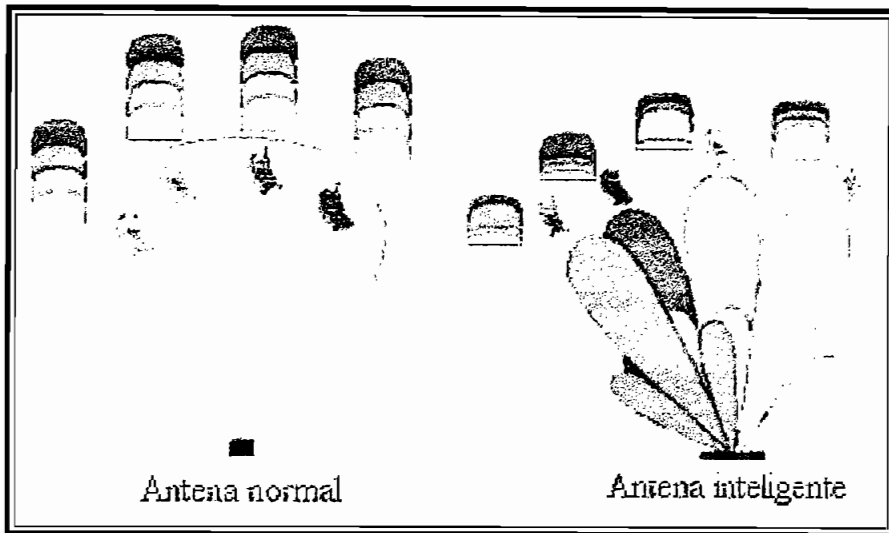


Fig. 2.4 Mejora de la radiación de la energía.

Haciendo uso de las antenas inteligentes, la potencia radiada por la estación base hacia el usuario es siempre menor o igual que la emitida con la tecnología tradicional. Además, con esta tecnología, al incrementarse la ganancia de las antenas, aumenta la sensibilidad\* de la estación base, por lo que los móviles también pueden transmitir con menor potencia. No obstante, al contrario de lo que se ve, la radiación incidente en el usuario disminuye gracias al uso de la antena inteligente. Tradicionalmente, las antenas usadas en las redes de comunicaciones móviles radian la energía en todas las direcciones dentro de su sector, de forma que sólo un pequeño porcentaje de la misma alcanza al usuario deseado. El resto se convierte en interferencias para los otros usuarios, como ya se ha mencionado, lo que en último término limita la capacidad del sistema y degrada la calidad de servicio.

\* Sensibilidad: es la mínima señal para la cual un receptor de radio es capaz de dar a la salida una señal utilizable

*Antenas Inteligentes*

*Fig. 2.5 Lóbulos de radiación.*

Las antenas inteligentes haciendo uso de arreglos de antenas y de avanzados algoritmos adaptativos basados en técnicas de procesamiento digital de señal, son capaces de adaptar el diagrama de radiación a las condiciones radioeléctricas en cada momento (figura 2.5), y como ya se dijo, dirigiendo haces enfocados únicamente hacia el usuario deseado, minimizando o incluso anulando las señales de interferencia recibida.

Con ello se consigue reducir hasta una cuarta parte la energía emitida, disminuyendo el impacto ambiental, y al reducirse las interferencias entre usuarios del sistema, aumentar la capacidad del mismo, la calidad de servicio y el área de cobertura de cada estación base. De esta forma, las antenas dejan de ser elementos pasivos para convertirse en sistemas combinados de hardware y software.

### **2.3.2 PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO**

Los sistemas de comunicaciones móviles tradicionales utilizan una antena monohaz para dar cobertura a una única célula. Sin embargo, existe una limitación en el ancho de dicho haz que viene dada por la ganancia de la antena, pues ganancias (o directividades) elevadas implican anchos de haz reducidos y

viceversa. Esta restricción no existe en los sistemas de antenas inteligentes. Una antena inteligente se caracteriza, fundamentalmente, por emplear un arreglo en fase, capaz de generar haces muy estrechos, con lo que la ganancia es notablemente superior a la de las antenas convencionales.

Cada uno de los haces es asignado a un usuario, de tal forma que lo “persigue” a medida que se desplaza por el interior de la célula. Estos sistemas multihaz mejoran la recepción de la señal procedente del móvil, minimizando, además, las interferencias. Pero, para lograr esto, se deben emplear algoritmos de conmutación entre haces y software de procesamiento de la señal de RF bastante complejos.

Para cada llamada, estos algoritmos determinan cuáles son los haces que mantienen una mejor calidad de la señal, eligiendo el mejor de ellos en cada momento. De este modo, el sistema asegura a los usuarios una calidad óptima mientras dura su llamada. La conmutación entre los diferentes haces se efectúa a medida que el móvil se desplaza. Para ello, el SAS monitorea, continuamente, la calidad de la señal, determinando cuándo un cierto haz debe ser seleccionado y cambiando.

## **2.4 LA INTELIGENCIA**

La idea de usar múltiples antenas y la innovación en el procesamiento de la señal para tener células más inteligentes ha existido durante muchos años. De hecho, ya se han aplicado grados de variación de sistemas de la antena inteligentes relativamente costosos en sistemas militares de defensa. Hasta los recientes años, las barreras del costo han impedido su uso en sistemas comerciales. Con la llegada de poderosos procesadores digitales de señales a bajos costos (DSPs), procesadores de propósito general, así como las técnicas de procesamiento de las señales basadas en software innovadoras (algoritmos), ha hecho práctico el uso de las antenas inteligentes para los sistemas de comunicaciones celulares. Hoy en día, cuando espectralmente las soluciones eficaces son cada vez más imperativos comerciales, estos sistemas están prometiendo mayores ahorros en

el sitio de las células, con un rechazo más alto a la interferencia y mejoras sustanciales en la capacidad (que se mencionarán mas adelante).

Las antenas tradicionales son elementos radiantes pasivos que simplemente actúan como transpondedores de energía. Las antenas inteligentes, por el contrario, son sistemas formados por un arreglo ("array") de antenas, varios circuitos y una unidad de control normalmente compuesta por un procesador digital de señal (DSP) y cierto software. En dicho software es donde reside la inteligencia de la antena.

#### 2.4.1 NIVELES DE INTELIGENCIA

Como se ha mencionado, la característica básica que se busca en el diseño de un sistema de antena inteligente es la capacidad de seleccionar espacialmente a los distintos usuarios.

Principalmente, existen dos formas de implementar un sistema de antenas inteligentes: haz conmutado y arreglo adaptativo. Aunque más compleja y con mayor carga computacional, la tecnología de arreglos adaptativos ofrece unas mejores prestaciones (aumento de la capacidad, incremento de la zona de cobertura,...) que la de haces conmutados.

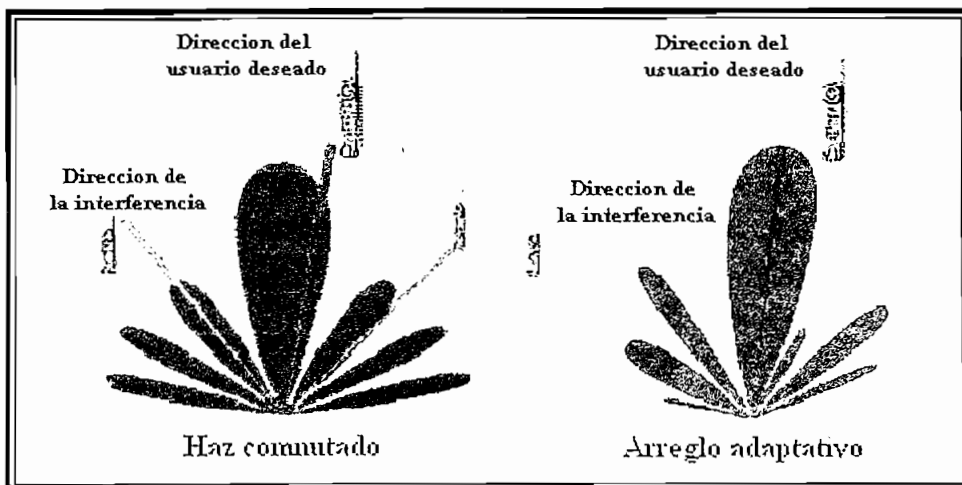


Fig. 2.6 Formas de implementación de las antenas inteligentes.

Podríamos decir que los arreglos adaptativos suponen el máximo nivel de inteligencia con que se puede dotar al sistema. Basado en la definición de la

inteligencia de una antena, se puede definir algunos "niveles de inteligencia" (figura 2.7), los cuales serán mencionados de acuerdo al nivel de dificultad que presentan en su implementación.

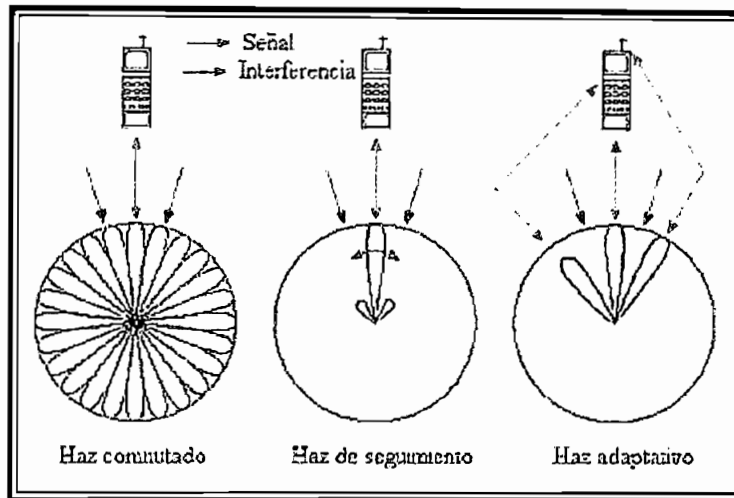


Fig. 2.7 Niveles de inteligencia.

#### 2.4.1.1 Haz conmutado

El haz conmutado se lo llama también "Switched Lobe" (cambio de dirección del lóbulo). Es la técnica más simple. El sistema radiante genera varios haces fijos, cada uno de ellos apuntando en una dirección distinta, de modo que entre todos se cubre toda 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 SINR y mejor C/I.

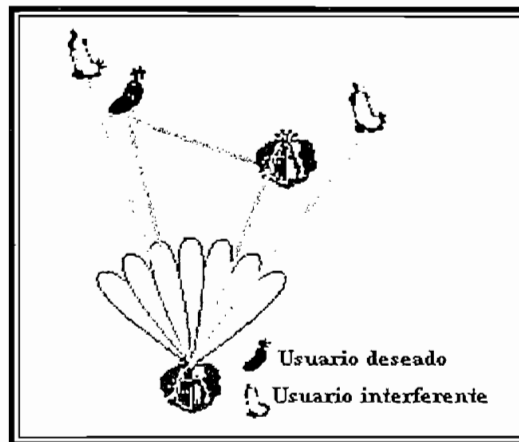
Esta técnica no garantiza que el móvil se encuentre en la dirección de máxima radiación del haz que le da servicio, ni que las señales interferentes se vean notablemente reducidas (ya que siempre es posible que alguna entre por uno de los lóbulos secundarios).

\* Celda: es el área cubierta por una estación transmisora y receptora.

De hecho, es 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 mas avanzada de esta técnica consistiría en seleccionar con un haz la señal deseada y con otros algunas de sus componentes multitrayecto, de forma que puedan procesarse todas con un receptor RAKE.

Este tipo de antena será más fácil de realizar en células donde existan estructuras más sofisticadas de arreglos adaptativos, pero esto da una mejora limitada.



*Fig. 2.8 Antena de haz conmutado.*

#### 2.4.1.2 Haz de seguimiento

El haz de seguimiento es conocido también como "arreglo dinámico en fase" y puede verse como una generalización del concepto del haz conmutado.

Esta técnica es más compleja que la anterior, requiere el uso de un arreglo progresivo (arreglo de fase); es decir, un arreglo en el que se pueden controlar electrónicamente las fases con las que se alimentan los distintos elementos, de modo que pueda modificarse a voluntad la dirección en la que apunta el lóbulo principal de la antena (figura 2.9). A su vez, es necesario utilizar algún algoritmo de detección de la dirección de llegada (DoA) de la señal, 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 con un receptor RAKE<sup>9</sup>. También, en este caso la potencia recibida se aumenta al máximo.



*Fig. 2.9 Antena de haz de seguimiento.*

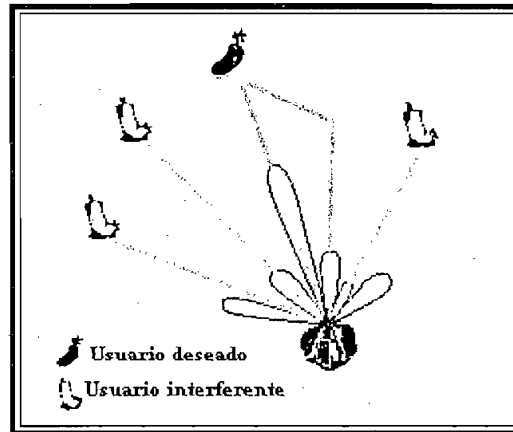
#### 2.4.1.3 Haz adaptativo

Este es el máximo nivel de inteligencia con que se podría dotar al sistema. En este caso, un algoritmo de DoA se utiliza para determinar la dirección hacia las fuentes de la interferencia (por ejemplo: Otros usuarios). Aquí, 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.

---

<sup>9</sup> RAKE, ver el anexo A.

Además, usando los algoritmos especiales y técnicas de diversidad de espacio, el diagrama de radiación puede adaptarse para recibir múltiples señales que puede combinarse.



*Fig. 2.10 Antena de haz adaptativo.*

No siempre será posible eliminar toda la interferencia, ya que el número de fuentes interferentes que se pueden suprimir están directamente relacionado con el número de elementos de la antena.

Esta técnica, como ya se dijo, requiere del uso de complicados algoritmos, tanto para la detección de las señales deseada e interferente como para la optimización de los parámetros 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. Los sistemas móviles convencionales normalmente emplean alguna clase de diversidad de la antena (ejemplo: diversidad de la polarización o de espacio). Las antenas adaptables pueden considerarse como un esquema de diversidad extendido y pueden tenerse más de dos ramas de diversidad. En este contexto, los arreglos de antenas en fase tendrán un incremento potencial de ganancia, que el de haz conmutable entre antenas, debido a que todos los elementos pueden usarse para diversidad combinada.

## 2.5 PROPAGACIÓN DE LA SEÑAL

Todos los niveles de inteligencia descritos anteriormente son hoy en día tecnológicamente realizables. Sin embargo, en el dominio de las comunicaciones personales y móviles, puede preverse una evolución gradual en la utilización de antenas inteligentes hacia soluciones más avanzadas. La evolución puede ser dividida en tres fases:

- Antenas inteligentes usadas únicamente en enlace ascendente (“uplink”) - el usuario está transmitiendo y la estación base está recibiendo -. Usando una antena inteligente para aumentar la ganancia en la estación base, la sensibilidad y rango son aumentados. Este concepto se llama receptor de alta sensibilidad (HSR, que será visto mas adelante) y en principio no es diferente de las técnicas de diversidad llevadas a cabo en los sistemas de comunicaciones móviles de hoy.
- En la segunda fase, se usan los haces de la antena dirigidos en la dirección del enlace descendente (“downlink”) – la estación base transmite y el usuario recibe – además del HSR. De esta manera, la ganancia de la antena aumenta en los dos sentidos del “uplink” y “downlink” que implican un filtrado espacial en ambas direcciones. Pueden rehusarse las frecuencias más estrechamente, así se dan aumentos de capacidad del sistema.  
El método se llama filtrado espacial para la reducción de la interferencia (SFIR, que se los vera mas adelante). Es posible introducir este principio en sistemas de segunda generación.
- La última fase en el desarrollo será llena por el acceso múltiple por división espacial (SDMA). Esto implica que más de un usuario puede asignarse al mismo canal físico de comunicaciones simultáneamente en la misma célula, sólo separada por ángulo. En un sistema de TDMA, se asignarán dos usuarios al mismo tiempo en el mismo intervalo de tiempo y a la frecuencia de portadora y en la misma célula.

En fase 2, la capacidad se aumenta con la utilización del reuso de frecuencias permitiendo la circulación de más portadoras por la estación base. En fase 3, se logra un aumento adicional en capacidad, permitiendo a más usuarios por la portadora. Introducir SDMA en los sistemas de segunda generación como TDMA, quizá será difícil e indeseable, pero puede volverse un componente natural en sistemas de la tercera generación.

Los "niveles de inteligencia" en la sección anterior describen el nivel de desarrollo tecnológico, mientras que los pasos descritos aquí puede considerarse como parte de una evolución del sistema.

### **2.5.1 MULTITRAYECTORIA E INTERFERENCIA CO - CANAL**

Considérese una piscina de agua absolutamente inmóvil en la que una piedra se deja caer. Las ondas que salen de ese punto son uniformes y disminuyen uniformemente en fuerza. Esta fuerza omnidireccional que transmite de igual manera la señal originada se puede considerar como el "uplink". La cual se interpreta como una señal que viaja por todas partes.

Imagínese ahora una estación base a una distancia corta del origen de la onda. Si el sistema permanece tranquilo, no es un desafío para una estación base interpretar dichas ondas.

Pero cuando las ondas empiezan a salir fuera de los bordes de la piscina, ellas regresan (quizás en una combinación de direcciones) para cortar con las ondas del sistema original. Cuando estas se mezclan, debilitan la fuerza de las ondas. Éstos son problemas de interferencia de multitrayectoria. Ahora, imagínese que se dejan caer más piedras en diferentes áreas de la piscina, equivalente a otro arranque de las llamadas. ¿Cómo podría una estación base en cualquier punto particular en la piscina distinguir la señal de la piedra que estaba recogiendo y de qué dirección? Este problema de fuente múltiples se llama interferencia co-canal.

Éstas analogías bidimensionales; comprenden la distinción entre las llamadas y/o señales en la atmósfera de la tierra que es la inteligencia que una estación base

debe poseer para poder analizar la información en un verdadero contexto espacial.

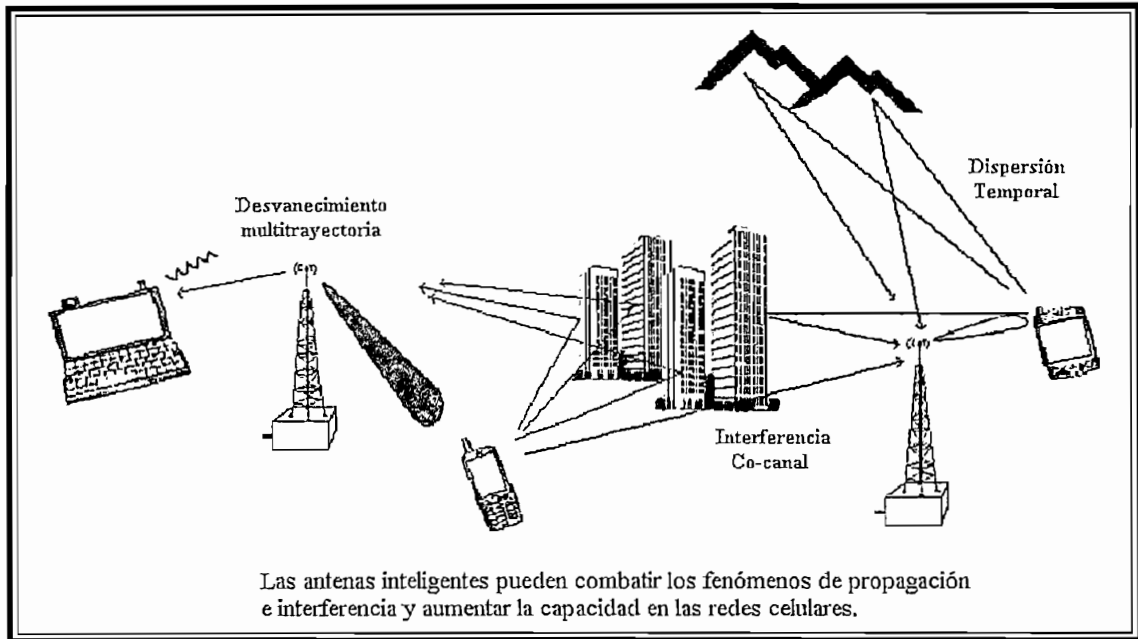


Fig. 2.11 Reducción de la interferencia y aumento de la capacidad.

### 2.5.2 MULTITRAYECTORIA

La Multitrayectoria es una condición donde la señal de radio transmitida es reflejada por la forma de las estructuras físicas (casas, edificios, puentes, montañas, etc) y crea múltiples caminos señalados entre la estación base y el terminal del usuario.

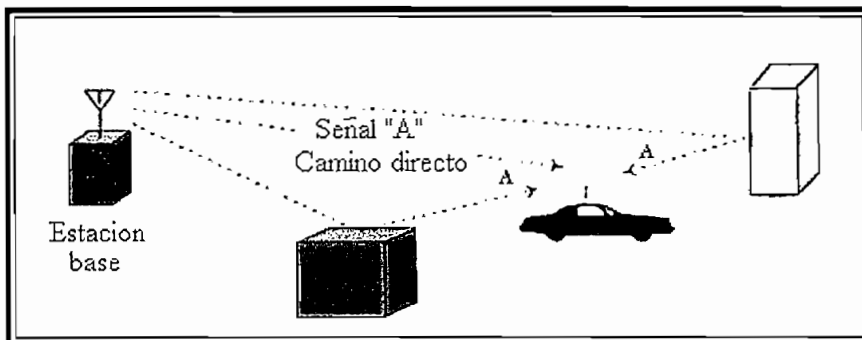
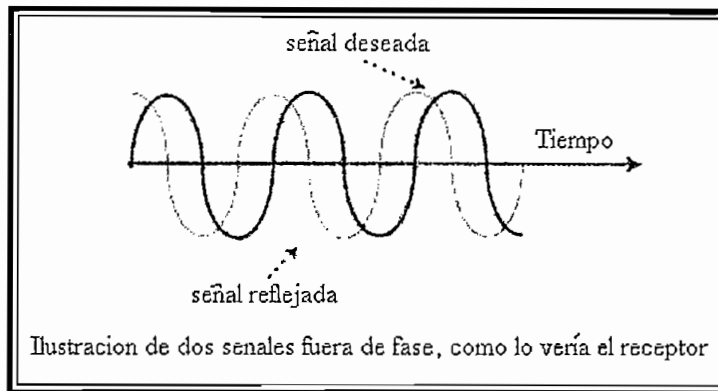


Fig. 2.12 El efecto de la multitrayectoria en un usuario móvil.

### 2.5.3 LOS PROBLEMAS ASOCIADOS CON LA MULTITRAYECTORIA

Un problema, consecuencia de tener señales reflejadas no deseadas, es el que las fases de las ondas que llegan a menudo a la estación receptor no emparejan. La fase de una onda de radio simplemente es un arco de una onda de radio, medido en grados, en un tiempo y en un punto específico.



*Fig. 2.13 Señales fuera de fase.*

Las causas que producen las multitrayectoria son:

#### 2.5.3.1 Desvanecimiento

Cuando las señales de multitrayectoria están fuera de fase, la reducción en la potencia de la señal puede ocurrir. Dicho tipo de reducción se llama desvanecimiento; el fenómeno es conocido como "Desvanecimiento de Rayleigh" o "desvanecimiento rápido"

El desvanecimiento es constantemente un fenómeno tridimensional cambiante. Muchos de los problemas dentro de un ambiente de multitrayectoria son causados por la atenuación periódica de las señales emitidas por los usuarios que las atraviesan. En otras palabras, la potencia de la señal recibida fluctuará hacia abajo y causará una momentánea, pero periódica, degradación en calidad.

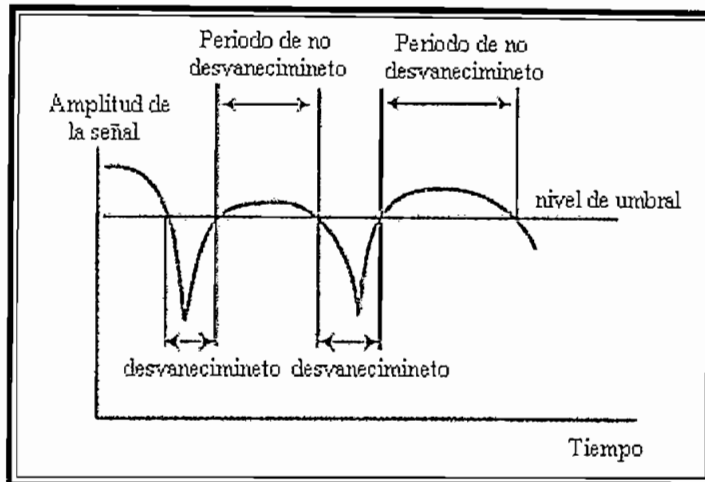


Fig. 2.14 Desvanecimiento de RAYLEIGH en una señal.

### 2.5.3.2 Cancelación de Fase

Cuando en la multitrayectoria dos señales con una diferencia de fase exactamente igual a  $180^\circ$  se juntan, las señales se cancelan. Mientras esto parece severo, raramente se ejecuta en cualquier llamada telefónica. Es decir, una llamada puede mantenerse para un cierto periodo de tiempo mientras haya una señal parecida, aunque con calidad muy pobre.

El efecto de más preocupación es cuando la señal del canal de mando se cancela y produce un vacío, si esto sucede en una área de servicio, la llamada podría no concretarse.

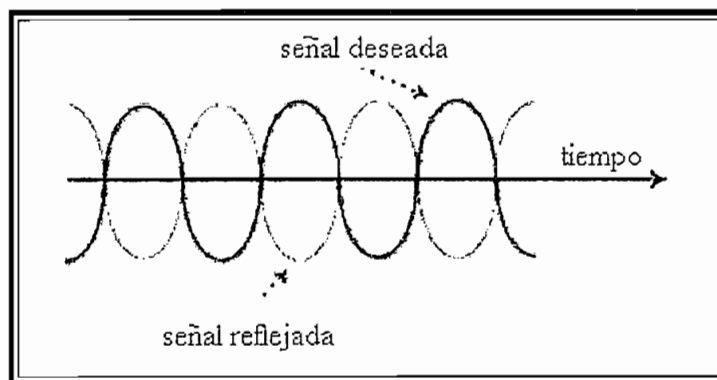


Fig. 2.15 Cancelación de fase.

### 2.5.3.3 Retardo de propagación

Aquí, la preocupación principal lo constituyen las múltiples reflexiones de la misma señal, puesto que pueden llegar al receptor en momentos diferentes. Esto puede producir interferencia de intersímbolo (o pedazos que chocan entre sí) que el receptor no puede ordenar. Cuando esto ocurre, la tasa de bits errados, en el futuro, son las causas de la degradación notable en calidad de la señal.

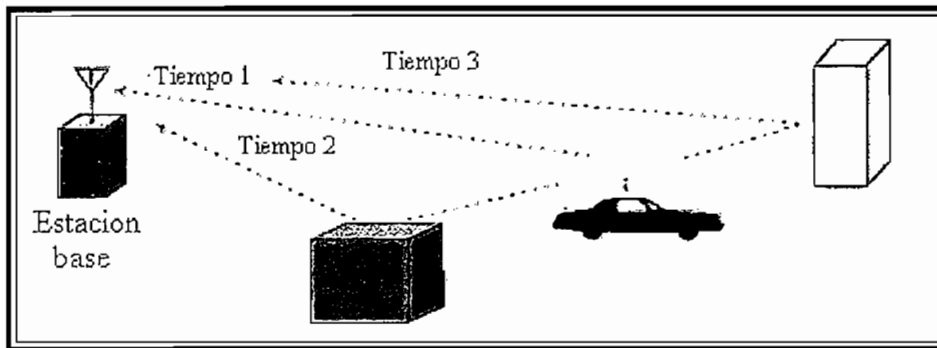


Fig. 2.16 Multitrayectoria causada por el retardo de propagación.

### 2.5.3.4 Interferencia co-canal

Una de las formas primarias de degradación artificial de la señal asociada con la radio digital, es la interferencia co-canal, esto ocurre cuando la misma frecuencia de portadora es utilizada por dos transmisores separados que se comunican con un mismo receptor.

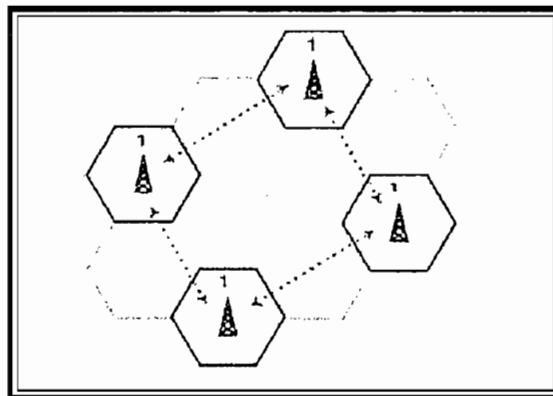


Fig. 2.17 Interferencia co-canal en un área celular típica.



Como se ha visto, cuando una antena o un sistema de antenas transmiten, la señal es difundida sobre áreas relativamente anchas. Las señales que sirven a un usuario intencional o deseado pueden volverse interferencia para los usuarios en la misma frecuencia y en las mismas o inmediatas células.

Aunque las antenas sectorizadas multiplican el uso de canales, ello no supera la mayor desventaja de la interferencia co-canal en la transmisión de una antena normal. El manejo de la interferencia co-canal es uno de los principales limitantes para alcanzar al máximo la capacidad de un sistema inalámbrico. En la batalla contra los efectos de la interferencia co-canal, los sistemas de antenas inteligentes se enfocan no sólo direccionalmente en usuarios intencionales, sino también eliminan la interferencia de estos usuarios con otros.

## **2.6 LA TECNOLOGÍA DE ANTENAS INTELIGENTES**

Se considera que las antenas inteligentes son el último grito tecnológico, aun mayor que los grandes avances en los sistemas de comunicaciones. Esto hace que las antenas inteligentes sean muy anheladas por los sistemas inalámbricos, pues las características y ventajas que ellas presentan, como aumento de la calidad de la comunicación, bajo consumo de la batería en los teléfonos móviles, la rápida ubicación del usuario y la reducción de la interferencia entre los usuarios vecinos, las hace muy atractivas.

A continuación se presentan las características más relevantes de las antenas inteligentes, así como sus ventajas e inconvenientes que presentan para las comunicaciones.

### **2.6.1 CARACTERÍSTICAS**

Las antenas inteligentes poseen ciertas características, que las hace diferentes o particulares frente a otros tipos de antenas y arreglo que se utilizan en la actualidad para poder mejorar la señal, evitar interferencia y tener máxima ganancia.

Algunas de las características de este tipo de antenas son:

### **2.6.1.1 Ganancia**

En la ganancia de la señal se combinan las entradas de las múltiples antenas para poder optimizar el nivel establecido.

### **2.6.1.2 Rechazo a la interferencia**

En el rechazo a la interferencia, el diseño de la antena puede generar interferencia co-canal.

Con la utilización de antenas inteligentes, se reduce el nivel de interferencia entre usuarios cercanos, debido a que tiene mayor directividad, lo que ayuda a discriminar a los usuarios que pueden causar interferencia de la señal del móvil deseado.

Este tipo de reducción ocurre tanto en el enlace ascendente, como en el enlace descendente debido a que se reduce el nivel de potencia para no interferir con la señal de los usuarios cercanos.

Con esto se deriva a la mejora de la relación portadora a interferencia C/I, la cual tiene dos consecuencias.

Una mejora de C/I involucra necesariamente la mejora del BER (Tasa de bits errados) para poder mejorar la señal.

Una reducción de C/I puede mejorar la capacidad del sistema.

### **2.6.1.3 Diversidad espacial**

La información compuesta desde el arreglo de antenas es usada para minimizar el efecto de propagación de múltiple fase.

### **2.6.1.4 Optimización de la potencia**

Combina las entradas de los múltiples elementos a optimizar para perfeccionar la ganancia del proceso en el enlace de subida (hacia el usuario).

## 2.6.2 VENTAJAS

El propósito dual de un sistema de la antena inteligente es aumentar la calidad de la señal del sistema de radio base a través de la transmisión más directa de señal de radio mientras se refuerza su capacidad a través del reuso de frecuencia. La implantación de las antenas inteligentes en una red de comunicaciones móviles se limita, en principio, a las estaciones base, debido a que necesariamente se deben emplear sistemas radiantes de mayor tamaño (arreglo de varios elementos).

Esto tiene la ventaja añadida 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 si han contemplado la posibilidad de incorporar antenas inteligentes a los terminales móviles.

Las antenas inteligentes han sido pensadas bajo la exigencia de flexibilidad, modularidad y transparencia en su funcionamiento, de forma que sea posible adaptarse a cualquier estación base independientemente de si está preparada o no para trabajar con antenas adaptativas (plug & play)<sup>10</sup>.

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:

### 2.6.2.1 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. Este hecho podría permitir reducir el número de estaciones base necesarias para cubrir una zona, siempre y cuando no sea el tráfico el factor limitante.

---

<sup>10</sup> Plug & play, ver el anexo A.

Aunque su tecnología pueda ser unitariamente algo más cara que la tradicional, al aumentar significativamente la capacidad del sistema y al incrementar el área de cobertura, una única estación base con antena inteligente puede dar el mismo servicio que 3 o 4 estaciones base tradicionales (esto ya mencionado), con lo que finalmente los operadores obtienen significativos beneficios económicos por el ahorro en costos de mantenimiento, despliegue de infraestructura y consumo de espectro.

En las partes rurales y en los pueblos escasamente poblados la capacidad de la radio bases dará las premisas para el despliegue de estación base, debido a que las antenas inteligentes son más directivas que las antenas omnidireccionales en los sectores tradicionales, esto aumentará potencialmente el rango de cobertura disponible; lo cual significa que esas estaciones base podrán ponerse más separadamente unas de otras. La mayor ganancia de las antenas y los requerimientos más bajos de potencia, posibilitarán también un mayor tiempo de vida útil en las baterías y menores tamaños de ellas en los teléfonos móviles.

#### **2.6.2.2 Reducción de costos**

Esto se vería reflejado en la utilización de amplificadores con costos más bajos, menor consumo de potencia y una rentabilidad más alta.

#### **2.6.2.3 Incremento de la capacidad**

La razón principal del creciente interés en las antenas inteligentes es el aumento de la capacidad. En áreas densamente pobladas los sistemas móviles están normalmente limitados por las interferencias y el significado de esa interferencia de otros usuarios es la fuente principal de ruido en el sistema. Esto significa que la relación de la señal a ruido más interferencia (SINR), es mucho más grande que la relación señal a ruido (C/I). Las antenas inteligentes prometen una mejora, en el aumento del nivel recibido de la señal útil y simultáneamente bajan el nivel de la interferencia, aumentando el SINR. Sobre todo, los arreglos adaptativos

darán una mejora significativa. Se ha informado de resultados experimentales que han incrementado en promedio el SINR en 10 dB en áreas urbanas.

En los sistemas TDMA, la implicación del SINR aumentado es la posibilidad para reducir la distancia en el reuso de frecuencia. Un ejemplo se muestra en la figura 2.18, donde la agrupación del siete-células tradicional se ha reducido a un racimo o grupo de tres celdas. Esto llevará a un aumento de capacidad de 7/3 debido a que en todas las células puede asignarse esta misma cantidad de portadoras.

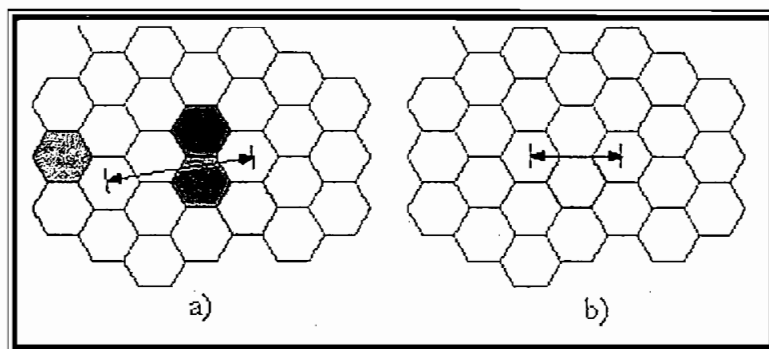


Fig. 2. 18 Reducción en la distancia del reuso de frecuencias.

#### 2.6.2.4 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, a pesar de que cada elemento del arreglo este radiando una potencia muy inferior. Así se relajarían las especificaciones sobre los amplificadores de potencia utilizados, que podrían resultar más baratos.

#### 2.6.2.5 Nuevos servicios

Puesto que la red podría tener acceso a información acerca de la posibilidad 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, gestión avanzada de flotas, etc.

Con respecto a la tarificación geográfica y la radiolocalización; cuando se usan antenas inteligentes la red tiende a tener acceso a información espacial sobre los usuarios. Esta información puede usarse para estimar las posiciones de los usuarios con mucha más precisión que en las redes extendidas.

Estos sistemas permitirán la información de la situación geográfica del usuario con una exactitud que permite un rango de error de 125 metros, con tendencia a ser mucho menor, lo cual permitirá que la facturación pueda darse en función de la situación específica del usuario.

#### **2.6.2.6 Reducción de la propagación multitrayectoria**

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 la característica de dispersión de retardo del canal). Esto permitirá disminuir los requisitos exigidos al ecualizador del terminal móvil, en UMTS, si bien se puede aprovechar la recepción multitrayectoria mediante el uso de receptores "RAKE", cuando los móviles se desplacen a gran velocidad esta ventaja puede ser muy significativa.

En el caso del enlace ascendente, la antena inteligente de la estación base podría discriminar las componentes multitrayecto de la señal recibida desde el móvil, o incluso explotarlas (mediante receptores RAKE, por ejemplo). Esto dependerá de la configuración de antena escogida.

Pueden reducir el retardo de propagación dentro de un canal y puede permitirse un incremento en la velocidad de transmisión con el uso de ecualizadores.

Usando un haz estrecho de la antena en la estación base la propagación de multitrayectoria puede reducirse un poco. La reducción real depende de la forma como se guía el haz y no siempre es significativa. Aunque los ecualizadores de

canal y receptores de RAKE manejan a menudo e incluso aprovechan los componentes de la multitrayectoria, en conexiones de gran velocidad esto no sirve.

Principalmente, la reducción de propagación de multitrayectoria puede usarse para aliviar los requerimientos en la designación de sistemas futuros.

### **2.6.2.7 Mejora la seguridad**

Una de las principales características que tiene la antena inteligente es la seguridad que ofrece al usuario, la cual es muy importante, debido a que el usuario exige a la operadora total confidencialidad para poder realizar sus llamadas e inviolabilidad de su terminal.

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, ya que con el uso de las antenas inteligentes es más difícil interferir una transmisión.

Para acceder ilegalmente o interferir una conexión con éxito, el intruso debe posicionarse en la misma dirección que el usuario como visto de la estación base. Además, posibilita la localización precisa de usuarios que estuvieran realizando un uso fraudulento de los servicios ofertados por la red.

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

## **2.6.3 INCONVENIENTES**

### **2.6.3.1 Mayor complejidad de transceptores**

En comparación con los sistemas radiantes convencionales, los sistemas de antenas inteligentes son mucho más complejos y difíciles de diseñar. Será imprescindible el uso de potentes procesadores (DSPs) para ejecutar los

algoritmos de optimización, conformación de haz, detección del ángulo de llegada (DoA)<sup>11</sup>, etc.

Es obvio que un transceptor de la antena inteligente es mucho más complejo que un transceptor tradicional de la estación base. La antena necesitará separadas cadenas de transceptores para cada uno de los elementos del arreglo de antena y calibración exacta en tiempo real de cada uno de ellos. Además, la formación del lóbulo de radiación de la antena (o "beamforming") es un proceso computacionalmente complejo, sobre todo si los arreglos adaptables son usados. Esto significa que la antena inteligente de la estación base deberá incluir procesadores numéricos muy poderosos y sistemas de control. Habrá una necesidad creciente del desarrollo de algoritmos eficaces para la optimización del tiempo real y rastreo de la señal.

En definitiva, se llega a la conclusión de que no será posible diseñar independientemente el sistema radiante y la propia estación base.

Por otro lado, las antenas inteligentes de las estaciones base serán indudablemente mucho más caras que las antenas de estaciones bases convencionales.

### **2.6.3.2 Tamaño físico**

Para que una antena inteligente obtenga una ganancia razonable, es necesario un arreglo de antenas con varios elementos. Típicamente se han sugerido arreglos que consisten de seis a diez elementos, los mismos que deberán estar separados horizontalmente al aire libre para ambientes móviles.

El espaciamiento necesario entre elemento es 0.4 a 0.5 longitudes de onda. Esto significa que una antena de ocho elementos en los 900 MHz sería aproximadamente de 1.2 metros ancho y de 60 cm a 2 GHz.

Con una demanda pública creciente para las estaciones base menos visibles, este tamaño, aunque no excesivo, podría proporcionar un problema.

---

<sup>11</sup> DoA, ver el anexo B.



### 2.6.3.3 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 de reelección de celda, establecimiento de conexiones, "handover"<sup>12</sup> (nueva conexión), "paging" (verificación del canal activo de la red y ubicación geográfica del mismo), etc.

### 2.6.3.4 Dirección del recurso

Las antenas Inteligentes son principalmente una tecnología de radio, esto implica también nuevas demandas en funciones de las redes tales como recurso y dirección de movilidad. Cuando se inicia una nueva conexión o la conexión existente es entregada a una nueva estación base, ninguna información angular está disponible en la nueva estación base. Esto puede ser manejado permitiendo a la estación base un barrido continuo a través de la célula con un haz de "búsqueda" que busca a candidatos para una nueva conexión o un "handover".

Otra posibilidad es usar un sistema externo por posicionamiento, por ejemplo: GPS. Hasta donde el handover está concentrado, una tercera posibilidad está disponible: la información direccional que se extiende por la célula puede ser usada por la red para proporcionar una "información aproximada" sobre que célula permite la conexión.

Como se explicó antes, SDMA involucra a usuarios diferentes que usan el mismo canal de comunicación físico en la misma célula, sólo separados por ángulo. Cuando las colisiones angulares entre estos usuarios ocurren, uno de ellos debe cambiar rápidamente a otro canal para que la conexión no esté rota. Esto significa en esos sistemas que proporcionan solo SDMA, habrá mucho más handovers entre celdas que en convencionales sistemas TDMA o de CDMA y más necesidad de supervisar las redes.

---

<sup>12</sup> Handover, ver el anexo A.

### 2.6.3.5 Planificación de la radio

Para que las antenas inteligentes puedan tener la ganancia deseada las estaciones base deben poder separar a los usuarios en el dominio angular. Esto significa que algunas de las estrategias actuales para planificación de radio necesariamente deben ser modificadas.

En la extensión de las redes las estaciones base a menudo se colocan a lo largo de las carreteras y líneas de la vía férrea. Desde el punto de vista de la antena inteligente es mucho más eficaz posicionar la estación base lejos del camino o vías férreas. De esta manera la dimensión espacial se explota mejor (figura 2.19).

Otros puntos difíciles son las pequeñas células urbanas con estaciones base posicionadas debajo del nivel de la azotea. En estos casos la señal de los usuarios deseados se mezclará con la interferencia que se producen en los largos callejones y lo harán difícil separarlos en el dominio angular.

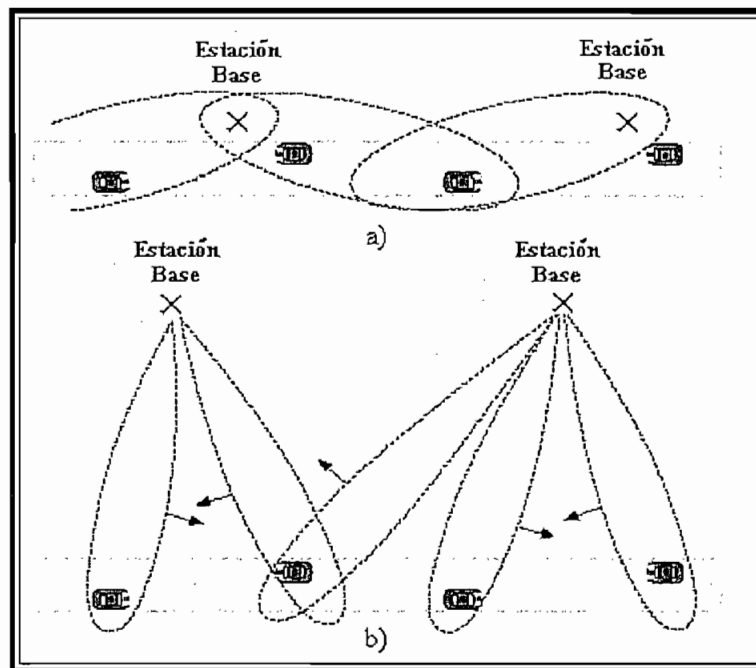


Fig. 2.19 Ubicación adecuada de las antenas inteligentes.

Los modelos de canal de radio y las herramientas de planeación de radio necesitan una renovada atención con la introducción de antenas inteligentes. Estadísticamente se usan modelos de canal de radio en pruebas de rendimiento y diseños de sistemas de radio. Sin embargo, los modelos existentes no describen el canal en el dominio angular y no pueden usarse por consiguiente en la evaluación de sistemas que emplean antenas inteligentes. El trabajo en la actualidad es proporcionar modelos estadísticos de canal de radio que describen el dominio direccional.

Igualmente, existen herramientas que planifican la radio comercial, estas son normalmente sólo relacionadas con el nivel de señal y posiblemente el tiempo de dispersión en el enlace. Sin embargo, en el futuro será beneficioso el uso de estas herramientas para predecir también la dispersión angular.

#### **2.6.3.6 Cambios en los métodos de planificación.**

La introducción de un sistema de antena inteligente implica 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 de alcance, la eliminación de fuentes de interferencia, el seguimiento angular de los usuarios, etc.

## **2.7 SISTEMA DE ANTENAS**

### **2.7.1 LAS ANTENAS Y LOS SISTEMAS DE ANTENAS**

Las antenas de radio son antenas que acoplan la energía electromagnética de un medio (espacio) a otro (ejemplo: Alambre, el cable coaxial, o guías de onda). Las antenas omnidireccionales, desde los comienzos de las comunicaciones inalámbricas, han sido representadas por antenas dipolo simple que radia y recibe en todas las direcciones de igualmente manera. Para encontrar a sus usuarios, este elemento de señal transmite omnidireccionalmente en una forma similar a las ondas que se radian fuera de una piscina de agua.

Todo esto adecuado a simples ambientes de RF donde no existe un conocimiento específico de la localización de los usuarios, el enfoque de las antenas esparce la señal y localiza a los usuarios deseados con sólo un pequeño porcentaje de la energía que se usa en dicho ambiente.

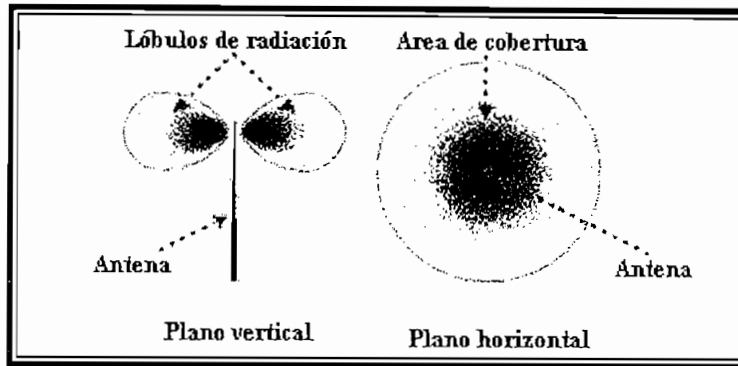


Fig. 2.20 Antenas omnidireccionales y diagramas de radiación.

Con esta limitación, las estrategias omnidireccionales intentan superar desafíos medio ambientalistas simplemente elevando el nivel de potencia de transmisión de la señal. En una escena de numerosos usuarios (mucho interferencia), esto hace que la situación empeore, pues las señales de un usuario intencional se vuelven interferencia para usuarios en las mismas o inmediatas células.

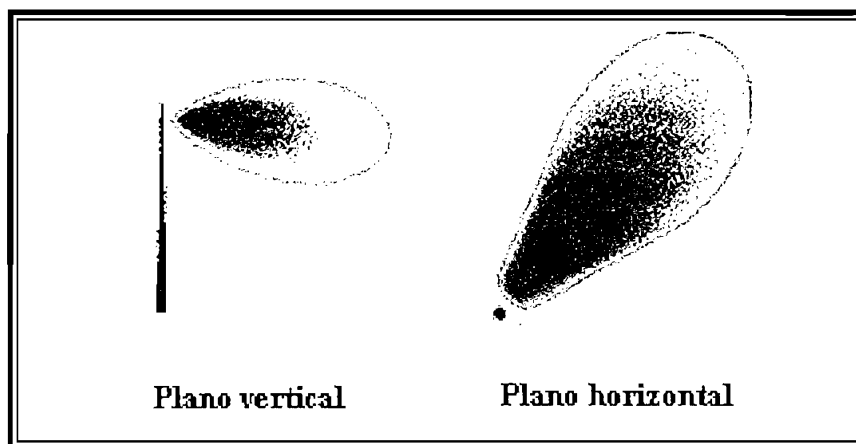
En aplicaciones del "uplink", las antenas omnidireccionales no ofrecen ganancia preferencial de señales para servir a los usuarios. En otras palabras, los usuarios tienen que competir por la energía de la señal. Por otra parte, la antena no puede rechazar las señales que interfieren con aquéllas de los usuarios deseados, ni puede mitigar los efectos de la multitrayectoria espacial o capacidades de ecualización. Las estrategias de la omnidireccionalidad impactan directamente y adversamente en la eficacia espectral, limitando el reuso de frecuencia. Estas limitaciones obligan a los diseñadores de los sistemas y a los proyectistas de la red a pensar en soluciones sofisticadas y costosas.

En los recientes años, las limitaciones de tecnología de antena de transmisión en la calidad, capacidad y en la cobertura de sistemas inalámbricos han incitado una evolución en el plan fundamental y papel de la antena en un sistema inalámbrico.

Una antena direccional también puede construirse para tener cierta transmisión preferencial fija y direcciones de la recepción. Como una alternativa al método más simple de agregar nuevos sitios de transmisión, se ha implementado el método de las celdas sectorizadas.

Un área de  $360^\circ$  es a menudo repartida en tres subdivisiones de  $120^\circ$  por cada una, que cubren menos área de transmisión. Todo el resto es igual, las antenas sectorizadas proporcionan ganancia aumentada encima de un rango restringido de acimut comparada con una antena omnidireccional. Esto normalmente es la llamada ganancia del elemento de antena y no debe confundirse con las ganancias asociadas con los sistemas de antena inteligentes.

Mientras las antenas sectorizadas multiplican el uso de canales, ello no supera las desventajas mayores de transmisión de antena omnidireccional normal como interferencia del co-canal.



*Fig. 2.21 Antena direccional y lóbulos de cobertura.*

## 2.7.2 SISTEMAS DE LA ANTENA

La pregunta más significativa aquí es: ¿Cómo puede hacerse una antena más inteligente?

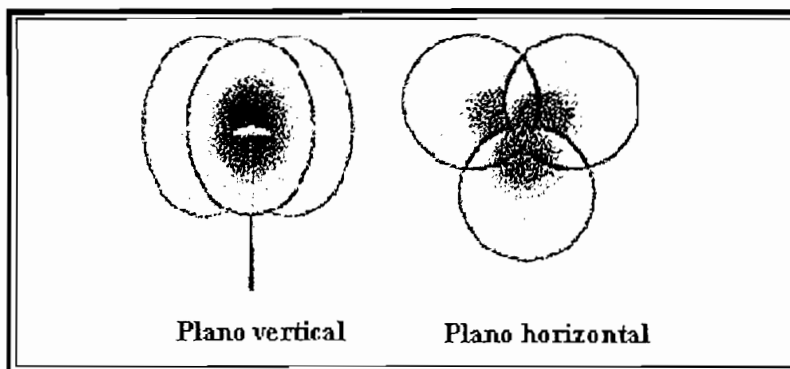
Primero, su plan físico puede ser modificado agregando más elementos.

Segundo, la antena puede volverse un sistema de antenas que puede diseñarse para cambiar la señal antes de la transmisión de cada uno de los elementos sucesivos para que la antena tenga un efecto compuesto. Este hardware básico y el concepto del software son conocidos como el arreglo de antenas en fase.

### 2.7.3 TIPOS DE SISTEMAS DE ANTENAS INTELIGENTES

#### 2.7.3.1 Sistemas sectorizados

Los sistemas de antenas sectorizadas toman una área celular tradicional y lo subdividen en sectores que se cubren usando antenas direccionales. Operacionalmente, cada sector se trata como una célula diferente, el rango de cobertura es mayor que en el caso omnidireccional. Las antenas sectorizadas aumentan la posibilidad de reuso de los canales de frecuencia en tales sistemas celulares, reduciendo potencialmente la interferencia original de la célula. Al combinar más de una de estas antenas direccionales, la estación base puede cubrir todas las direcciones.



*Fig. 2.22 Antena sectorizadas y lóbulos de cobertura.*

### 2.7.3.2 Sistemas de diversidad

En el próximo paso hacia las antenas inteligentes, el sistema de diversidad incorpora dos elementos de la antena en la estación base, la ligera separación física (diversidad espacial) que se ha usado históricamente para mejorar la recepción y la neutralización de los efectos negativos de la multitrayectoria.

La diversidad ofrece una mejora en la fuerza eficaz de la señal recibida usando uno de los siguientes métodos:

#### 2.7.3.2.1 *Cambio diversidad*

En el cambio de diversidad, los sistemas presentan un salto continuo de utilización entre las antenas (conecta cada uno de los canales receptores a la antena que está sirviendo mejor) para siempre usar el elemento con el rendimiento más grande.

Mientras se reducen los efectos negativos de desvanecimiento de la señal, ello no aumentan la ganancia, por lo tanto sólo una antena se usa en ese momento.

#### 2.7.3.2.2 *Diversidad combinada*

Con la diversidad combinada se corrige el error de la fase de dos señales de multitrayectoria y se combina eficazmente la potencia de ambas señales para producir ganancia.

Otros sistemas de diversidad, tales como los sistemas que combinan la máxima relación C/I, combinando los rendimientos de todas las antenas para aumentar al máximo la relación de energía de la señal recibida a ruido.

## Antenas Inteligentes

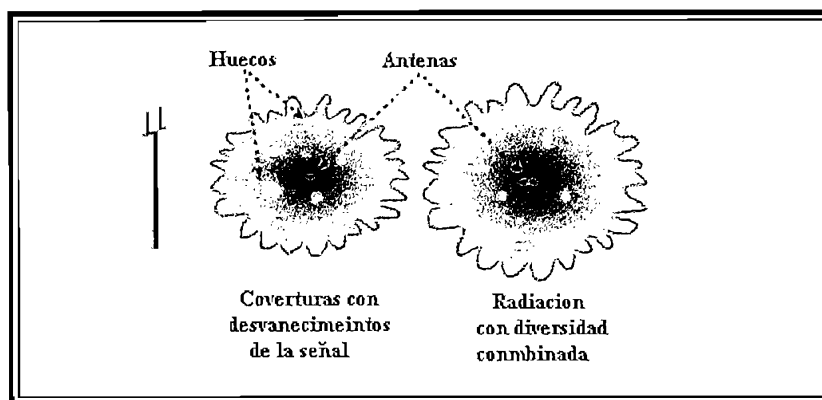


Fig. 2.23 Diversidad combinada y cobertura de diversidad combinada con desvanecimiento.

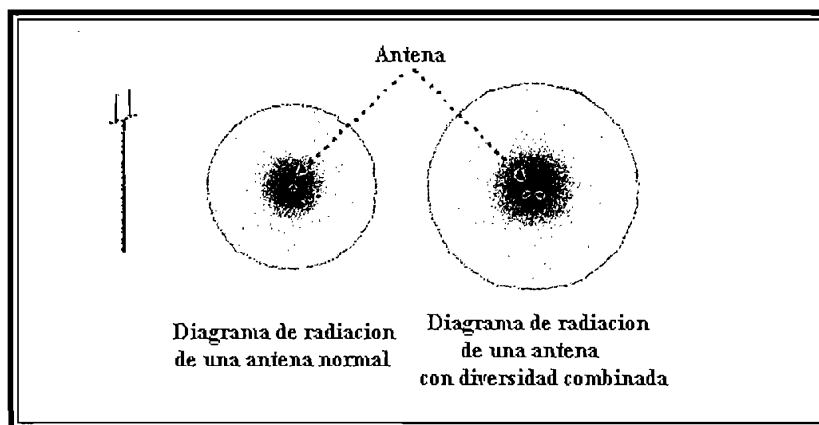


Fig. 2.24 Lóbulos de radiación de una antena con diversidad combinada.

Con la diversidad, el funcionamiento de la antena cambia de un elemento a otro. Aunque este procedimiento mitiga el severo desvanecimiento multitrayectoria, el uso de un elemento en un determinado momento ofrece una mejora de la ganancia del enlace ascendente que el uso de un solo elemento de señal. La necesidad de transmitir más eficazmente a los numerosos usuarios sin agudizar el problema de la interferencia llevó al próximo paso de evolución de los sistemas de antena que inteligentemente integran el funcionamiento simultáneo de elementos de antena de diversidad.



## 2.8 USOS DE LA TECNOLOGÍA DE LA ANTENA INTELIGENTE

La tecnología de la antena inteligente puede mejorar significativamente el rendimiento y la economía de los sistemas inalámbricos para un rango numeroso de usuarios. Esto posibilita a los operadores de PCS (Servicio de comunicación personal), celular y las redes de área local inalámbricas (WLAN) a obtener significantes aumentos en calidad señal, capacidad y cobertura.

Los operadores requieren a menudo combinaciones diferentes de estas ventajas en momentos diferentes. Como resultado, esos sistemas ofrecen la mayor flexibilidad en términos de configuración y crecimiento siendo a menudo las soluciones más económicas y efectivas a largo plazo.

### 2.8.1 NORMAS APLICABLES

Los sistemas de la antena inteligentes son aplicables, con algunas modificaciones, para todas las normas y los protocolos inalámbricos, por ejemplo para:

#### 2.8.1.1 Métodos de acceso

- Analógico - acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA) (ejemplo, AMPS, TACS)
- Digital - acceso múltiple por división de tiempo (TDMA) (ejemplo, GSM); el acceso múltiple por división del código (CDMA) (ejemplo, IS-95)

#### 2.8.1.2 Métodos dobles

Doble división de frecuencia (FDD); y doble división de tiempo (TDD)<sup>13</sup>.

---

<sup>13</sup> TDD y FDD, ver el anexo A.

### **2.8.2 TRANSPARENCIA A LA RED**

La flexibilidad de tecnología de la antena inteligente adaptable, permite la creación de nuevos productos de valor agregado y de servicios que les permiten a los operadores obtener una significativa ventaja competitiva. No se restringen las antenas inteligentes adaptables a cualquier formato de modulación en particular o a un protocolo interfaz aire.

Ellos son compatibles con todos los esquemas de modulación de interfaz aire actual.

### **2.8.3 VENTAJAS AGREGADAS DE PROCESO ESPACIAL**

Una amplia gama de sistemas de comunicación inalámbricos puede beneficiarse del procesamiento espacial, incluso pueden ser participes de esto, los sistemas celulares de alta movilidad, sistemas de corto alcance de baja movilidad, aplicaciones de lazos locales inalámbricas, comunicaciones del satélite y LAN inalámbrico.

Empleando los arreglos de antenas, es posible la multiplexación de canales en la dimensión espacial así como en la frecuencia y dimensiones de tiempo.

## **2.9 ENTORNOS MACRO Y MICRO DE LA CÉLULA**

En verdad, las antenas no son antena inteligente los sistemas son los inteligentes. Generalmente en una estación base, un sistema de antena inteligente combina un arreglo de antenas con una capacidad digital de procesamiento de la señal para transmitir y recibir en una adaptable, espacialmente de manera sensible.

En otras palabras, semejante sistema puede cambiar la direccionalidad de sus lóbulos de radiación automáticamente en contestación a su ambiente señalado. Esto puede aumentar dramáticamente las características de funcionamiento (como capacidad) de un sistema inalámbrico.

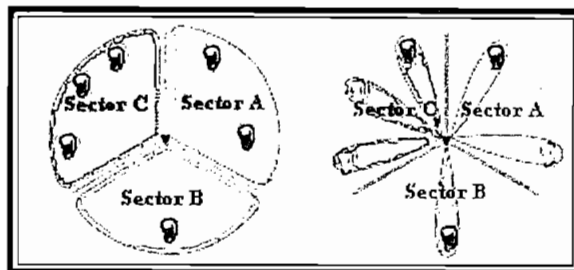


Fig. 2.25 Formas de radiación de las antenas inteligentes dentro de una célula.

Los sistemas de antenas inteligentes son generalmente categorizados, no obstante, como sistemas de haz conmutable o sistemas de arreglos adaptativos. Lo siguiente es la distinción entre las dos categorías mayores de antenas inteligentes en función de la forma de trasmisión:

### 2.9.1 HAZ CONMUTABLE

Los sistemas de antena con haz conmutable forman en particular múltiples arreglos de haces con elevada sensibilidad de las direcciones. Éstos sistemas de antenas localizan señales fuertes, escogen a una de varias radiaciones fijas predeterminadas y cambian de un lóbulo a otro en función de los movimientos del móvil a lo largo del sector.

En lugar de formar el diagrama de antena direccional con las propiedades metálicas y el plan físico de un solo elemento (como una antena sectorizada), los sistemas de haces conmutables combinan los rendimientos de múltiples antenas de una forma sectorizada (direccional) radiando con más selectividad espacial que lo que puede lograrse con un sistema convencional, aprovechando un elemento de señal.

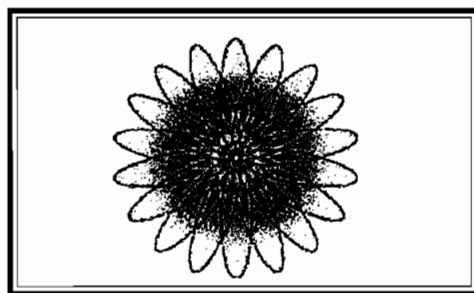
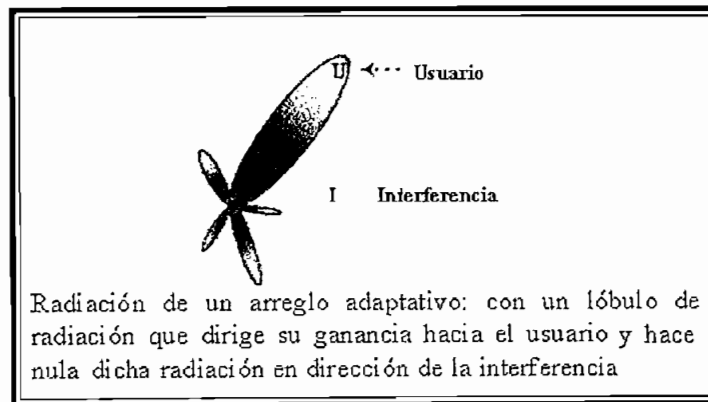


Fig. 2.26 Sistemas de haces conmutables (sectores).

## 2.9.2 ARREGLOS ADAPTATIVOS

Aquí un número infinito de diagramas son ajustados en tiempo real. La tecnología de la antena adaptable representa el acercamiento de la antena inteligente más avanzado. Usando una variedad de nuevos algoritmos de procesamiento de la señal, el sistema adaptable se aprovecha de habilidad para localizar eficazmente y rastrear varios tipos de señales para dinámicamente minimizar la interferencia y aumentar al máximo la recepción de la señal intencional.

Ambos sistemas intentan aumentar la ganancia según la situación del usuario; sin embargo, sólo el sistema adaptable proporciona ganancia óptima mientras que simultáneamente permite la identificación, rastreo y minimiza las señales de interferencia.



*Fig. 2.27 Radiación de un arreglo adaptativo.*

Las antenas omnidireccionales se distinguen evidentemente de sus similares inteligentes por el número de antenas (o elementos de la antena) empleados. Las de haz conmutable y los sistemas de arreglos adaptables, sin embargo, comparten muchas características del hardware y son principalmente distinguidas por su inteligencia adaptable.

Procesar información que es direccionalmente sensible requiere una serie de elementos de la antena (típicamente 4 a 12), las entradas desde cualquiera se combinan para controlar adaptablemente la transmisión de la señal. Los

elementos de la antena pueden colocarse en forma lineal, circular, o en configuraciones del plano, instalándose a menudo en la estación base, aunque ellos también pueden usarse en teléfonos móviles o en computadoras portátiles.

Como la mayoría de los adelantos modernos en electrónica, el formato digital para manipular los datos de RF ofrece numerosas ventajas en términos de exactitud y flexibilidad de funcionamiento. El discurso empieza y termina con información analógica. Por el camino, sin embargo, los sistemas de la antena inteligentes capturan, convierten, y modulan las señales analógicas para la transmisión como señales digitales y reconvierten a ello en información analógica en el otro extremo.

En los sistemas de antenas adaptables, esta capacidad fundamental de procesamiento de la señal es argumentada por técnicas avanzadas (algoritmos), eso se aplica para controlar el funcionamiento de combinación complicada en las condiciones de operación.

El beneficio de mantener un uso más enfocado y eficaz de la potencia del sistema y asignación del espectro puede ser significativo.

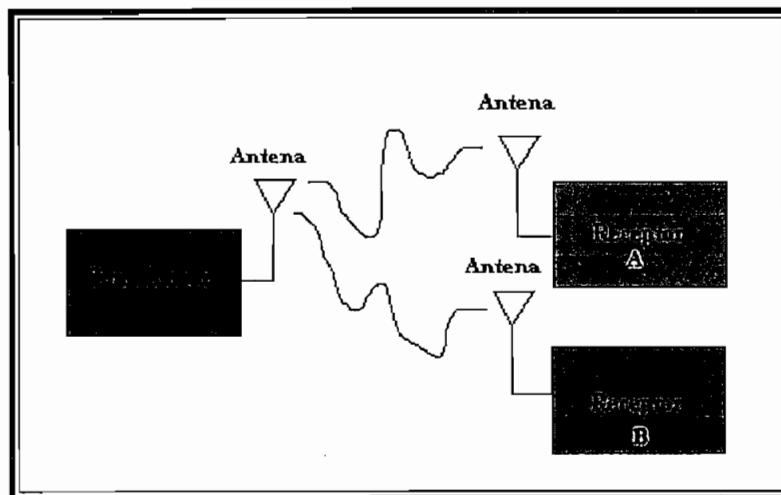
## **2.10 DIVERSIDAD DE ANTENAS**

### **2.10.1 DIVERSIDAD DE ESPACIO**

Los sistemas por diversidad de espacio, transmiten una señal a dos antenas receptoras instaladas con cierta separación vertical.

El sistema por diversidad de espacio trabaja con el principio de que las dos componentes de una misma señal que van por dos caminos distintos no tendrán puntos de interferencia comunes.

Una misma longitud de onda tiene diferentes grados de interferencia en dos puntos espaciados verticalmente por que dicha onda llega a las antenas por dos caminos diferentes.



*Fig. 2.28 Diversidad de espacio.*

En la diversidad de espacio, dos ondas refractadas de igual longitud se propagan por diferentes trayectos y no ejercen la misma interferencia sobre las ondas directas.

Cuando no se obtiene suficientes asignaciones de frecuencia, la diversidad de espacio es una buena protección contra el desvanecimiento por efecto de múltiples trayectos.

Generalmente se eligen la mayor separación posible entre las antenas, teniendo en cuenta la altura máxima de las torres y otros factores mecánicos, limitaciones de orden económico y aspectos topográficos que va a variar de una región a otra.

Esta solución se fundamenta en la posibilidad de que el rendimiento del sistema aumentará en relación con la separación entre antenas.

### **2.10.2 DIVERSIDAD DE POLARIZACIÓN**

En la diversidad de polarización dos señales que provienen del transmisor son enviadas simultáneamente por dos antenas separadas, una con polarización

vertical y la otra horizontal. La diversidad de polarización resulta útil para la transmisión por onda indirecta en la parte baja del espectro de frecuencias.

En cambio, este método no da resultados en la transmisión de microondas por onda espacial debido a que generalmente ambas señales polarizadas se desvanecen al mismo tiempo.

### **2.10.3 DIVERSIDAD DE FRECUENCIA**

En la diversidad por frecuencia se utilizan una antena tanto en el transmisor como en el receptor, la información se envía en dos frecuencias diferentes.

## **2.11 APLICACIONES DEL SAS (Sistema de Antena Inteligente)**

El principal beneficio de los SAS es que mejoran la capacidad de los sistemas, aumentando el número de usuarios por área y optimizando el uso del espectro. Por tanto, será posible implementar más células para cubrir la misma zona e incrementar así la capacidad total del sistema. Este hecho es importante especialmente para ofrecer servicios personalizados en entornos urbanos. En zonas suburbanas, permite extender la cobertura de las células de modo que se reduzca el número de las mismas. Por tanto, en ambos casos, posibilita ofrecer servicios de valor añadido con mayor cobertura a un menor costo.

Por otra parte, puesto que la ganancia y la sensibilidad de una antena inteligente son mejores que la de una antena convencional, la potencia transmitida por el móvil es menor. Esto permite, como ya se mencionó, reducir el tamaño de los terminales y además, alarga la duración de las baterías.

El control de potencia se hace tanto en el móvil (enlace ascendente) como en la BTS (enlace descendente), de forma que cuando los móviles se encuentran cerca de la estación base, ambas partes transmiten a menor potencia, reduciendo de esta forma la interferencia en la red y por tanto, haciendo el sistema más robusto frente al "fading" o desvanecimiento.

En el caso de los sistemas UMTS, donde se utiliza un control de potencia más rápido y preciso que de los propios sistemas de segunda generación; compartiendo todos los usuarios la misma frecuencia, las antenas multihaz permiten la comunicación entre las estaciones de radio y los usuarios, de modo que no exista interferencia – suma de potencia – entre las distintas conversaciones o comunicaciones de datos. Por ello, la capacidad del sistema aumenta considerablemente, tanto en el número de usuarios que pueden ser atendidos como en el mayor tamaño efectivo de la célula que se consigue, ya que el móvil se puede alejar más sin tener que elevar su nivel de potencia para contrarrestar las emisiones de los demás que están en la misma zona. Los algoritmos de admisión y control de congestión, evitan que la red se sature o congestione, admitiendo más o menos móviles.

### **2.11.1 APLICACIONES EN EL SISTEMA DE TELEFONÍA MÓVIL**

El sistema proveerá a sus usuarios de una gran cantidad de servicios con cobertura global, acordes con las demandas actuales y futuras del mercado, entre ellos se pueden destacar los siguientes:

- Voz digital.
- Buzón de voz.
- Servicios de valor añadido.
- Transmisión de datos.
- Fax.
- Servicios de mensajería.

Para poder soportar todos estos servicios, los terminales deben ser diseñados para introducir en ellos una serie de características opcionales, como pueden ser un puerto externo, un buffer interno, tarjetas "inteligentes" ("Smartcards o SIMs"), antenas integradas para comunicaciones vía satélite, etc.



Por otra parte, el sistema inteligente ofrece diversos servicios en función del mercado al que van dirigidos, ofreciendo soluciones a los problemas específicos de cada sector.

#### **2.11.1.1 Telefonía personal**

Al utilizar un sistema de antenas inteligentes se tiene una ventaja como:

- Terminales ligeros.
- Transmisión de voz, datos, fax, mensajes cortos, buzón de voz...
- Posibilidad de utilizar las redes celulares vigentes.
- Un solo número para todas las aplicaciones.

#### **2.11.1.2 Planificación de transporte**

Esto ofrece la posibilidad de conocer la posición de la flota de vehículos de una empresa en todo momento y de tener información en tiempo real de las rutas más factibles a seguir por el estado de las carreteras, el tiempo...

Comunicaciones de pasajeros con el exterior del vehículo mediante terminales en los vehículos.

#### **2.11.1.3 Radio localización en llamadas de emergencia**

La Radio localización en llamadas de emergencia es un servicio muy importante, en cuanto a las aplicaciones que ofrecen las antenas inteligentes; un usuario puede reportar alguna emergencia o accidente que le haya ocurrido, en función de esto, la radio base más cercana automáticamente identifica el sector de donde proviene la señal de auxilio, facilitando de esta manera, tanto a la policía, bomberos, ambulancias, etc., una respuesta inmediata.

También su funcionalidad radica, en la gran ayuda que presenta para encontrar a personas que utilizan este sistema de modo inadecuado, ya sea, solo para jugar o desviar atención de las autoridades.

#### **2.11.1.4 Tarifación geográfica**

La tarifación geográfica ayuda a la operadora a conocer la posición geográfica del usuario, y en función de la misma poder tarifar la llamada que se realiza, tomando en cuenta desde donde y hasta que distancia se efectúa la llamada, así también se podrá conocer si la llamada se desarrolla dentro del país o fuera de él, y si la operadora posee el servicio de "roaming".

#### **2.11.1.5 Publicidad de servicios cercanos**

Con la ayuda de localización que posee el sistema de antenas inteligentes, se puede detectar la posición de un usuario respecto a un sitio de distracción determinado y así comunicarle la clase de servicio cercano con cuenta en ese momento.

#### **2.11.1.6 Información de lugares turísticos**

El servicio de información de lugares turísticos, es muy parecido al anterior, la diferencia radica en la información que recibe el usuario, es decir, la información, en este caso, daría a conocer los museos, lugares de comida, sitios de recreación,... etc, más cercanos al usuario en ese instante.

Con una información extra, que indique al usuario el costo del servicio que puede encontrar, haciendo que su estadía en un determinado lugar sea lo más placentera posible.

#### **2.11.1.7 Servicios a zonas remotas**

Estos servicios se ofrecerán a través de:

- Teléfonos fijos.
- Un sistema de interfaz.
- Una antena inteligente.

En zonas rurales se ofrecerá la posibilidad de transmitir voz, así como de proveer números de emergencia a médicos y a servicios antiincendios o de seguridad.

#### **2.11.1.8 Servicios gubernamentales**

- Comunicaciones seguras de voz, datos, fax, mensajes cortos.
- Alta calidad y duración de sus equipos.
- Posibilidad de encriptar y descifrar mensajes.

#### **2.11.1.9 Servicios de negocios**

Van enfocados a la posibilidad de tener negocios en zonas inaccesibles al teléfono fijo.

- El básico: Terminal remoto fijo que ofrece transmisión de voz, fax, mensajes cortos.
- El avanzado: Este incluirá además, la transmisión rápida de datos, imágenes.
- El móvil: Permite tener la movilidad que no tienen los servicios fijos.

#### **2.11.1.10 Servicios aeronáuticos**

Van enfocados a pasajeros de aviones.

Son los siguientes:

- Teléfono, fax, datos y mensajes.
- Transmisión rápida de datos.
- Envío de correo electrónico.
- Acceder a bases de datos de información.

### 2.11.1.11 Servicios marítimos

Los usuarios y los servicios serán los mismos que los aeronáuticos.

Habrán varios tipos de terminales:

- Terminales multicanales (para barcos grandes). Poseen transmisión rápida de datos y pueden ser montados en el puente de mando.
- Terminales simples o multicanales (para barcos medianos o pequeños) que contemplan la transmisión más lenta de señales.
- Terminales portátiles.

### 2.11.3 MODOS DE APLICARLA EN UNA RED DE COMUNICACIONES MÓVILES

Una vez conocidos los tipos de antenas inteligentes, es necesario conocer 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:

#### 2.11.3.1 Receptor de alta sensibilidad (HSR)

Esta configuración consiste en utilizar antenas inteligentes solo 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. Esto 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 menos tasa de errores y una mejor calidad. No podría emplearse la mejora en la C/I para incrementar la capacidad de un sistema CDMA, ya que dicha mejora solo este presente en el enlace de subida y no en el de bajada.

#### **2.11.3.2 Rechazo de interferencia por filtrado espacial (SFIR)**

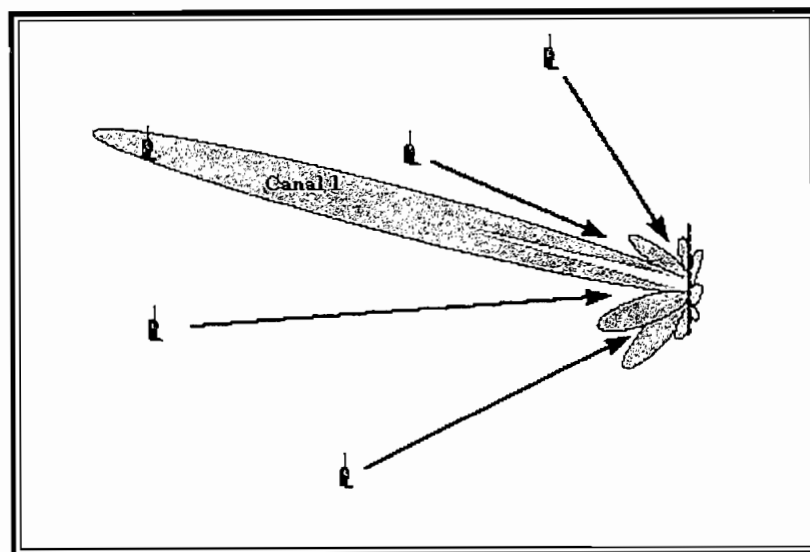
En esta configuración se emplean antenas inteligentes tanto en el enlace ascendente como en el descendente, con lo cual se consigue aprovechar la mejora por selectividad espacial en ambas direcciones.

En este caso, la mejora que experimenta la C/I, además de reducir el BER del sistema, puede explotarse directamente para aumentar la capacidad de un sistema CDMA como en un UMTS. Esto también podría lograrse indirectamente en GSM, si se hace un plan de frecuencias mas ajustado; al ser menor la distancia de reutilización, puede aumentar el número de portadoras por estación base.

#### **2.11.3.3 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 podría haber varios usuarios utilizando al mismo tiempo la misma frecuencia y el mismo código de scrambling (o el mismo intervalo de tiempo en GSM), estando discriminados únicamente por su posición angular respecto de la estación base.

En este caso el aumento en la capacidad se produce de forma directa, debido a que se ha añadido una nueva dimensión para la gestión del espectro.



*Fig. 2.29 Concepto de SDMA.*

## 2.12 MEJORA DEL DESEMPEÑO

El objetivo principal de la tecnología de las antenas inteligentes es buscar oportunidades para el aumento de la eficiencia de las comunicaciones móviles. El uso de varias antenas es una oportunidad emergente que pronto mejorará el desempeño en un ancho de banda fijo.

Ya es conocido, que las implementaciones de la antena inteligente varían de métodos muy sencillos, donde se selecciona la antena más eficaz entre dos antenas, hasta la aplicación de algoritmos de procesamiento de señal complejas y sofisticados a través de una matriz de antenas. La tecnología de antena inteligente puede aplicarse para mejorar la fiabilidad de la señal y aumentar el rendimiento de los datos a la vez que se aumenta tanto la frecuencia como el uso del espacio.

En el lado del receptor, puede utilizarse un sistema de antena inteligente a fin de brindar un factor de multiplicación y aumentar la ganancia de señal, a la vez que se anula el efecto de desvanecimiento de la señal en múltiples rutas. En el lado del transmisor, puede utilizarse una antena inteligente para concentrar la energía

transmitida en una dirección específica basada en la ubicación del receptor. La dirección de la energía de este modo no solamente mejora el desempeño.

Esta técnica también ayuda a reducir la interferencia mediante el aislamiento de otros aparatos de radio no asociados con la transferencia y de aquellos que se encuentran fuera de la ruta de transmisión directa.

Otra eficacia importante que puede proveer la tecnología de antena inteligente es la admisión simultánea de una cantidad arbitrariamente grande de clientes que utilizan un conjunto fijo de elementos de antena. Esta capacidad mejora la reutilización de la frecuencia para ofrecer una mayor capacidad de espacio.

La aplicación de la tecnología de antena inteligente resultará en un uso más eficaz del espectro y en el aumento del rango, el desempeño de red y la capacidad de espacio, a la vez que reducirá la interferencia en un espectro de frecuencia.

La antena inteligente, al permitir a la estación base discriminar las señales de usuarios interferentes a favor de la señal del móvil deseado (en el caso de enlace ascendente) y reducir el nivel de potencia transmitida en las direcciones de esos otros usuarios (en el caso del enlace descendente), proporciona, respecto a una antena tradicional, una mejora de la SINR de hasta 12.5 dB en el enlace ascendente y de 6.5 dB en el enlace descendente.

La mejora de la SINR permite disminuir la interferencia co-canal y, consecuentemente, reducir la distancia de reutilización de frecuencias, aumentando así la capacidad.

### **2.12.1 DESPLIEGUE DE NUEVAS REDES**

El uso de la tecnología de las antenas inteligentes, proporciona una mayor capacidad de transmisión (aumento de 300% en la capacidad del sistema) o una reducción significativa (entre un 66% y un 75% menos) en el número de estaciones base necesarias para alcanzar un determinado nivel de servicio, es decir se tendrán 3 o 4 veces menos la cantidad de estaciones base que hoy se

tienen, los resultados obtenidos por los operadores tendrán significativos beneficios económicos de ahorro en costos (reducción de hasta un 60% del costo total de la infraestructura requerida para implantar una nueva red). A esto contribuye también el concepto multioperador, que facilita a los operadores el compartir la misma infraestructura, suponiendo un ahorro añadido de inversiones por parte de los mismos y una reducción en el impacto urbanístico y medioambiental.

La antena inteligente es la forma más asequible y adecuada de aumentar la capacidad en redes ya desplegadas, puesto que sólo requiere instalar sobre una estación base ya existente cierto software y hardware, sin tener que desplegar nuevas estaciones base ni replanificar la red (plug & play).

En los sistemas de segunda y tercera generación, las antenas inteligentes ofrecerán de igual manera una mejora substancial en el rendimiento de sus sistemas, el aumento de la capacidad de los mismos será una característica importante de esta tecnología. Específicamente, en los sistemas de tercera generación el aumento significativo de la ganancia de la capacidad de la red puede lograrse conjuntamente con la implementación de sistemas de antenas inteligentes y técnicas de modulación como FDMA, TDMA y CDMA en que se basan las redes de telefonía móvil.

Si a esto sumamos, que el empleo de las antenas inteligentes presenta varios beneficios y ventajas, (entre estos se encuentra la reducción de la interferencia co-canal, aumento del uso capacidad del sistema y el área espectral, reducción del número de errores en el momento de transmisión) podemos predecir que los actuales sistemas con los que cuenta las redes, experimentarán cambios drásticos en su desempeño, lo que traerá consigo una potencial convergencia tecnológica de los sistemas. Por ejemplo:

En los sistemas TDMA se prevé una mejora tres veces mayor con el uso de las antenas inteligentes.



Antenas Inteligentes

Por otro lado, las evaluaciones del rendimiento de IS-95 CDMA indican que con la utilización del sistema antenas inteligentes, pueden reducirse los costos operacionales (aunque la operación con códigos convolucionales no mejoran con la utilización del sistema de antenas inteligentes). Aquí, en cambio, se vislumbra una mejora substancial cinco veces mayor que la capacidad del sistema actual.

A continuación se muestran gráficamente las mejoras que se presentan en los sistemas de comunicaciones mediante la utilización de las antenas inteligentes.

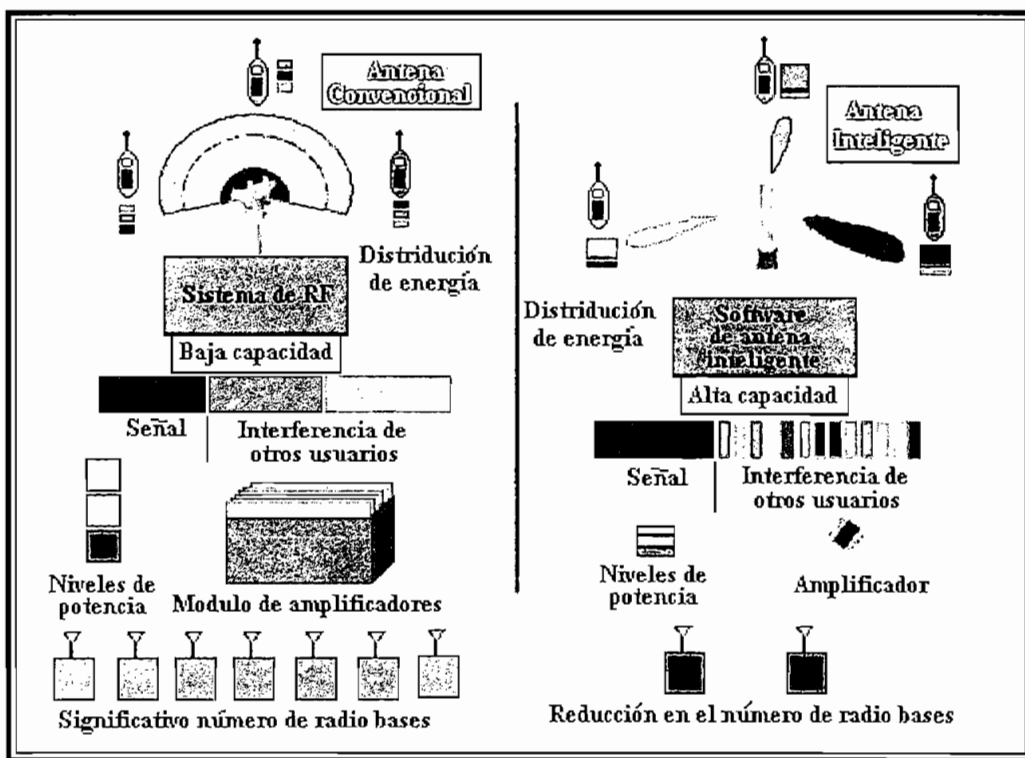


Fig. 2.30 Mejora del desempeño.

# CAPITULO 3

Teoría básica  
para el diseño de las  
antenas inteligentes.

## **CAPÍTULO 3**

### **TEORÍA BÁSICA PARA EL DISEÑO DE ANTENAS INTELIGENTES**

#### **3.1 DETALLES DE CONSTRUCCIÓN DE ANTENAS INTELIGENTES**

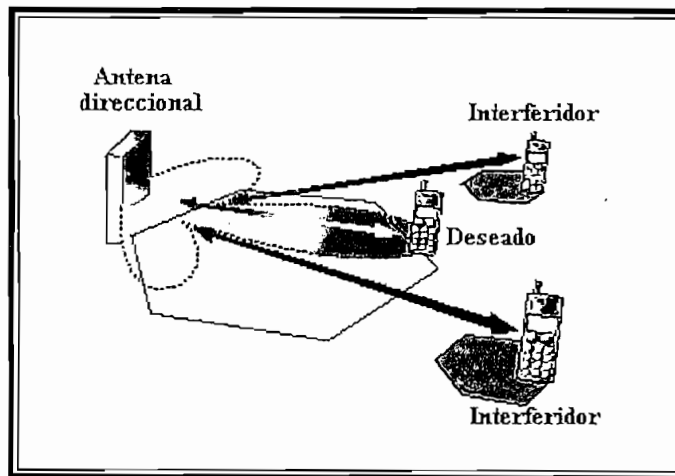
A diferencia de las antenas celulares convencionales, que radian energía por toda la celda, las antenas inteligentes o adaptativas limitan la energía radiada a un haz estrecho (figura 3.1). La posibilidad de dirigir la energía difundida por un haz estrecho representa un incremento en la ganancia de señal y una mayor variedad de camino para la misma señal, así como menor reflexión de ruta múltiple, más eficiencia espectral y mayor capacidad en la red. No obstante, no se puede dejar de lado algunas de las desventajas de esta tecnología, siendo la principal de ellas la necesidad de localizar continuamente la posición angular de los terminales móviles en la celda.

En una red celular convencional, una sola antena de estación base define los parámetros de la celda y es el centro de toda la comunicación radiada. Esto comprende tanto la transmisión y recepción del tráfico de voz y datos que genera beneficios, por ejemplo: la difusión de los parámetros más significativos relacionados con el sistema que permite operar la información de red que todo terminal móvil en uso dentro de la celda debe recibir continuamente y de forma simultánea. Entre la información relacionada con el sistema se encuentran: las frecuencias en uso, salto de frecuencia, la identidad de celda, niveles de potencia máxima, etc.

Un diseño de antena inteligente que incremente la capacidad del sistema demanda que la antena de estación base convencional sea reemplazada por uno o más equipos de antena adaptativa.

En lugar de inundar la celda con información radiada de un solo origen, las antenas inteligentes llenan la celda con varios haces estrechos de señales (típicamente cuatro u ocho). Una consecuencia inmediata de esta nueva tecnología y que debe tomarse en cuenta para el diseño de estas antenas, es que debe aplicarse una estrategia de enlace descendente distinta; es decir, deben usarse datos más complejos para la transmisión desde la estación base a los terminales móviles en la celda. Esto se debe a que el sistema precisa saber:

- Qué dirección de haz llega a qué terminales móviles; y
- Cómo puede enviar simultáneamente información de sistema a cada terminal móvil.



*Fig. 3.1 Sistema de antenas adaptativas.*

Estos requisitos se satisfacen con dos estrategias principales de enlace descendente. La primera precisa que se dirija un haz al terminal móvil; la segunda que se seleccione un haz de un juego de haces fijos (figura 3.2).

En cada caso, el haz de enlace descendente se basa en la estimación de la dirección de llegada (DoA)<sup>1</sup> del enlace ascendente del terminal móvil. Por tanto, en la solución de antena inteligente son elementos fundamentales los algoritmos que determinan el haz o ruta de haz del enlace descendente.

Para dirigir la energía radiada de una antena en forma de haz estrecho pueden emplearse varias arquitecturas de antenas diferentes (con distintos niveles de complejidad).

Por ejemplo, el frente de fase en los elementos de antena que corresponden a un haz puede generarse en la banda de base usando formación de haz digital<sup>2</sup> o puede generarse en radiofrecuencia usando una red pasiva o de desviadores de fase. Una ventaja importante de usar un haz de una red pasiva es que no precisa coherencia de fase entre el transmisor de radio y el formador de haz.

Existen numerosas arquitecturas de sistema para antenas adaptativas, incluyendo sistemas de antena separados para el enlace ascendente y descendente. Entre las principales se mencionan tres enfoques, las cuales parecen ofrecer la relación más apropiada entre prestaciones del nivel de sistema de antenas inteligentes, complejidad y costo de implementación.

- Arquitectura de haz múltiple o conmutado con una red de formación de haz pasiva;
- Haces conmutados intercalados en el enlace descendente; y
- Haces plenamente gobernables.

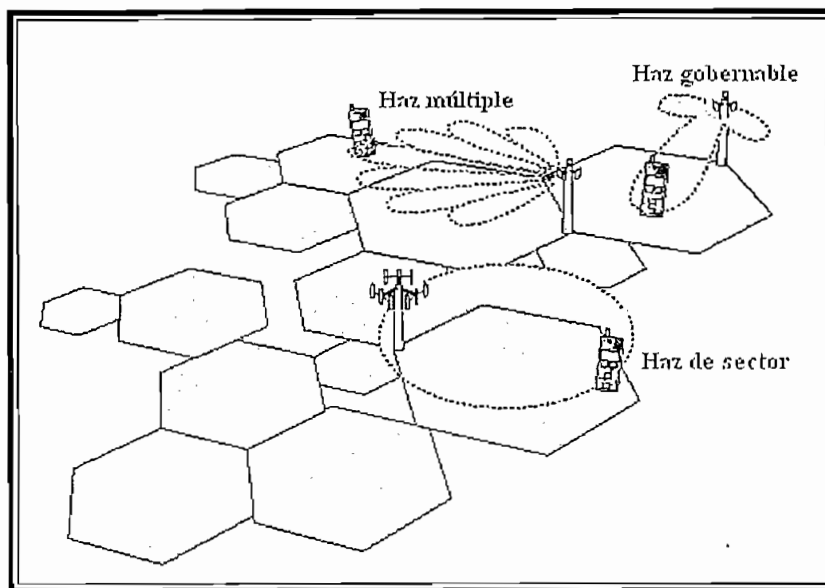
La solución de formación de haz pasiva es la menos compleja. Debido a que la dirección de llegada puede identificar el mejor haz de enlace ascendente, no se precisa coherencia de fase en el enlace ascendente o descendente.

---

*1 Algoritmo de estimación de la dirección de llegada (DOA), ver el anexo B.*

*2 Esquema de la formación del haz digital, ver el anexo B.*

La segunda solución, demanda haces de enlace descendente adicionales, forma haces de distinta manera en el enlace ascendente y descendente. En el primero, el número de haces está limitado por el número de ramales de receptor.



*Fig. 3.2 Antena de haz gobernable y haz múltiple conmutado en red celular.*

La dirección de llegada se calcula a partir de la información del enlace ascendente. Dicha información (algoritmo de estimación de llegada – DoA –) luego se emplea para seleccionar un haz de un conjunto mayor de haces de enlace descendente. En este último enlace, coexisten varias redes de formación de haz paralelas. Después de formado el haz, se combinan las señales de los elementos de antena. En comparación con el enfoque de haz gobernable, este método reduce los requisitos de coherencia de fase en el enlace descendente.

La solución completamente gobernable exige un transmisor individual para cada elemento de antena y coherencia de los ramales de los lados de recepción y transmisión. La ventaja principal de esta solución es que la formación de haz en el enlace descendente no se limita a un conjunto de haces o formas de haz fijas. Además, esta solución tiene posibilidades de reducir la interferencia en el enlace descendente mediante puesta a cero (“nulling”); es decir, formando el haz con ganancia reducida hacia terminales móviles co-canal interferidas. Concretamente,

los haces estrechos reducen las interferencias recibidas en el enlace ascendente y la distribución de interferencias en el descendente.

## 3.2 ARQUITECTURA

### 3.2.1 CÓMO TRABAJAN LOS SISTEMAS DE ANTENAS INTELIGENTES

El sistema de antenas inteligentes y los arreglos de antenas adaptativas permiten a una estación base individualizar el haz que ellos generan para cada usuario. Generalmente cada aproximación del lóbulo principal hacia los usuarios trata de rechazar la interferencia o ruido que existe fuera del lóbulo principal.

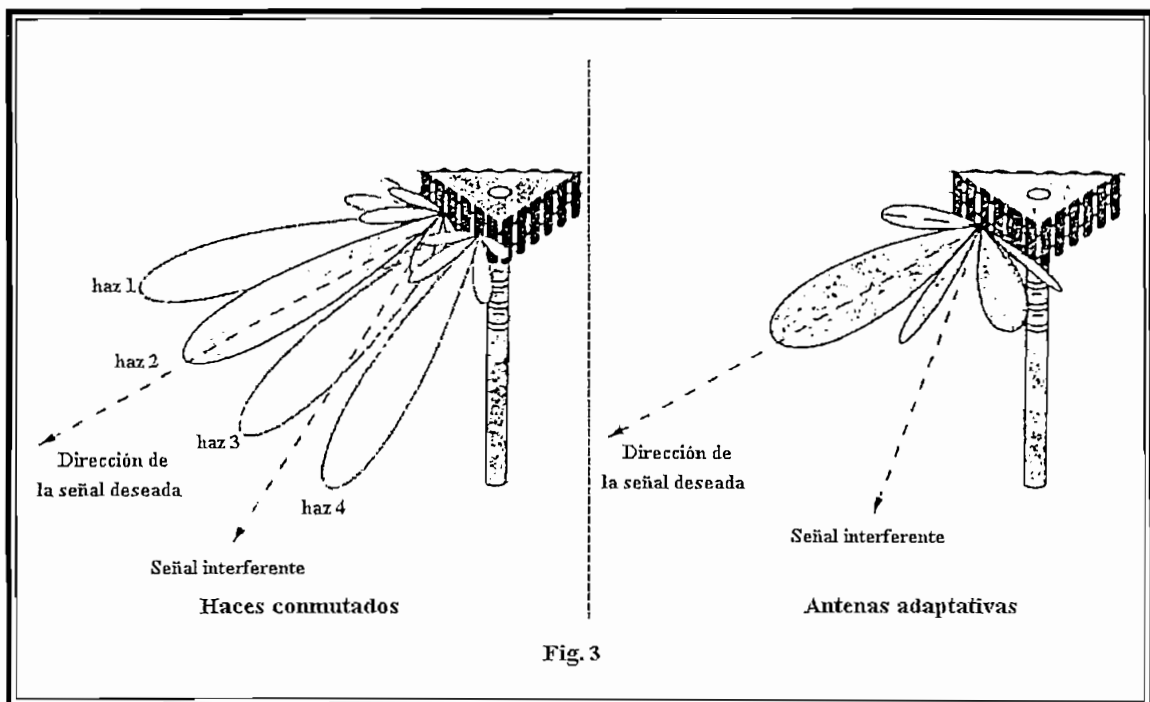


Fig. 3.3 Formación de lóbulos con las antenas inteligentes.

### **3.2.2 PROCESO EN EL ENLACE ASCENDENTE**

En este proceso se asume que la antena inteligente es utilizada sólo en la estación base.

Cada terminal radio remoto transmite usando antenas omnidireccionales, mientras que se deja a la estación base separar selectivamente las señales deseadas de la interferencia.

Las señales son combinadas para que a la salida del arreglo se pueda obtener un mejor rendimiento. Un algoritmo adaptable controla los pesos según los objetivos predefinidos. Para un sistema de haz conmutado estos podrían ser principalmente la máxima ganancia; para un sistema de arreglo adaptativo, otros factores podrían recibir igual consideración.

Estos cálculos dinámicos permiten al sistema cambiar el modelo de radiación para optimizar la señal de recepción.

### **3.2.3 PROCESO EN EL ENLACE DESCENDENTE**

La tarea de transmitir de una manera selectiva es la principal manera para diferenciar entre el haz conmutado y el sistema de arreglo adaptativo. Los sistemas de haz conmutado se comunican con los usuarios pudiendo cambiar entre los modelos direccionales definidos, las señales fuertes. En comparación los arreglos adaptativos intentan entender mejor las señales de RF más comprensiblemente y transmitir más selectivamente.

La forma de procesamiento de bajada usado, depende de sí el sistema de comunicación usa una doble división de tiempo (TDD), el cual trasmite y recibe en la misma frecuencia ó doble división de frecuencia (FDD), la cual usa frecuencias separadas para trasmite y recibir. En la mayoría de sistemas FDD, los enlaces de subida y de bajada se desvanecen y en los sistemas TDD los enlaces de subida y bajada pueden ser recíprocos.

En los sistemas TDD en los enlaces de subida, los canales de información pueden ser usados para lograr una transmisión selectiva. En los sistemas FDD,



en los enlaces de subida, los canales de información no pueden usarse directamente y deben considerarse otros enlaces de subida que se pueda procesar.

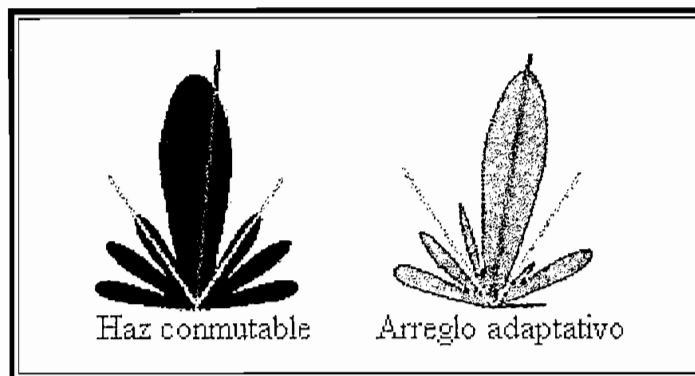
#### **3.2.4 SISTEMAS DE HAZ CONMUTADO**

Por lo que se refiere a los diagramas de radiación, el haz conmutado es una extensión del actual método de la micro-célula ó método de sectorización de una célula típica. El haz conmutado subdivide los macro-sectores en varios micro-sector como una forma de mejorar la capacidad. Cada micro-sector contiene un modelo de haz fijo predeterminado con la más grande sensibilidad localizada en el centro del haz y menos sensibilidad fuera de ella.

El plan de estos sistemas involucra una alta ganancia lo cual hace, que los sistemas de haz conmutables seleccionan uno de los modelos de haz fijo (basado en las consideraciones y combinaciones de salidas de antenas). Los sistemas cambian el haz en diferentes direcciones a lo largo del espacio, cambiando la fase de las señales usadas para alimentar a los elementos de las antenas ó recibidas de ellas.

Cuando el usuario móvil ingresa en un macro-sector en particular, el sistema de haz conmutable selecciona el micro-sector que contiene la señal más fuerte. A lo largo de la llamada, el sistema monitorea la señal más fuerte y cambia a otros micros-sectores fijos requeridos.

En la figura 3.4 se muestra los lóbulos de formación del haz (“beamforming”), el de haz conmutable (rojo), arreglo adaptativo (azul), los sistemas pueden escoger para los usuarios las señales deseadas (línea verde) e interferencia co-canal (línea amarilla)



*Fig. 3.4 Lóbulos de beamforming.*

Los sistemas de antenas inteligentes se comunican direccionalmente formando diagramas de haz de antenas específicas.

Cuando una antena inteligente dirige su lóbulo principal de mayor ganancia en la dirección del usuario, se forma naturalmente los respectivos lóbulos laterales y nulos en áreas de mediana y mínima ganancia respectivamente en direcciones fuera del lóbulo principal.

Los diferentes haces conmutables y sistemas de antenas inteligentes adaptativas controlan los lóbulos y los nulos con los grados variantes de exactitud y flexibilidad.

### 3.2.5 SISTEMA DE ANTENA ADAPTATIVAS

Los sistemas de antenas adaptativas realizan la comunicación entre un usuario y la estación base de una manera diferente, en efecto, adicionando una dimensión de espacio.

Dentro de un ambiente de radio frecuencia y con este cambio (o el origen de la señal en el espacio), la tecnología de antena adaptable puede alterar dinámicamente los diagramas de señales cerca del sistema inalámbrico.

Los arreglo adaptativos utilizan sofisticados algoritmos para procesar las señales, para distinguirlos continuamente entre las señales deseadas, fases múltiples, e interferencia de señales, así cómo calcular sus direcciones de llegada.

La habilidad de rastrear a los usuarios fácilmente con los lóbulos principales e interferencia con nulos asegura un aumento constante al máximo de la ganancia del sistema debido a que no existe micro-sectores ni modelos de radiación definidos.

### **3.2.6 BENEFICIOS RELATIVOS ENTRE LOS INTERCAMBIOS DE HAZ CONMUTABLE Y LOS SISTEMAS DE ARREGLOS ADAPTABLES**

#### **3.2.6.1 Integración**

Los sistemas conmutables son tradicionalmente diseñados para desplegarse en los sistemas celulares. Tienen que ser normalmente implementados como un agregado posterior de la tecnología aplicada que inteligentemente dirige las necesidades de redes. En comparación, se han desplegado los sistemas de arreglos adaptables con una aproximación totalmente integrada que ofrece menos redundancia del hardware que los sistemas de haz conmutables pero requiere nueva figura - externa.

#### **3.2.6.2 Rango/cobertura**

Los sistemas de haz conmutables pueden aumentar la cobertura de la estación base de 20 a 200 por ciento encima de las células convencionales sectorizadas, dependiendo de las circunstancias ambientales y de hardware/software usados. El aumento de cobertura puede ayudar al operador substancialmente en los costos de infraestructura y hacer más bajos los precios para los consumidores. También, el cambio dinámico de haz a haz conserva la capacidad porque el sistema no envía señales en todas las direcciones. En comparación, los sistemas de arreglos adaptables pueden cubrir un área más ancha, más uniforme con la misma potencia como un sistema de haz conmutable.

### **3.2.6.3 La supresión de la interferencia**

Las antenas de haz conmutable suprimen interferencia que llega de las direcciones fuera del centro del haz activo. Porque los diagramas de haz son fijos, sin embargo, el rechazo de la interferencia real es a menudo la ganancia del diagrama de haz de comunicación seleccionado en la dirección del interferente.

También, ellos son usados normalmente sólo para la recepción debido a la ambigua percepción del sistema recibido (las consecuencias de transmitir mal el haz puede ser obvio). También, porque sus haces son predeterminados, la sensibilidad puede variar ocasionalmente con los movimientos del usuario a través del sector

Las soluciones del haz conmutable trabajan mejor en mínima interferencia co-canal y tienen la dificultad de distinguir entre una señal deseada y un interferente. Si la interferencia de la señal está aproximadamente en el centro del haz seleccionado y el usuario está fuera del centro del haz seleccionado, la interferencia de la señal puede reforzarse mucho más que la señal deseada. En estos casos, la calidad se degrada para el usuario.

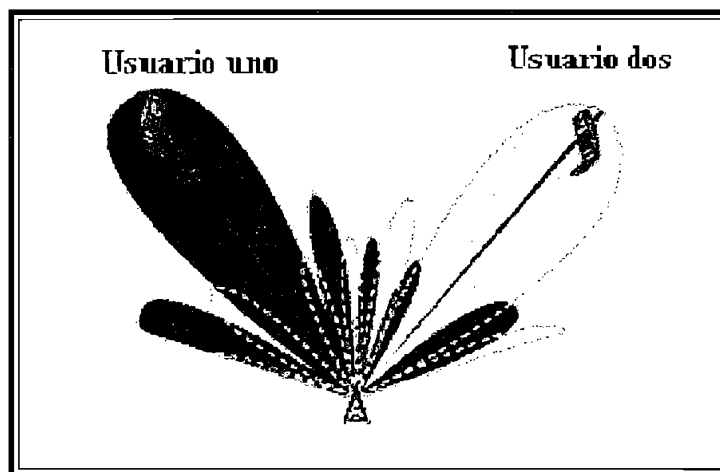
La tecnología de arreglos adaptables ofrece el rechazo a la interferencia, también porque transmite un infinito, en lugar de finito, número de combinaciones, crea menos interferencia a los usuarios vecinos que un acercamiento del haz conmutable.

### **3.2.6.4 El acceso múltiple por división espacial (SDMA)**

Entre las utilizaciones más sofisticadas de tecnología de la antena inteligente es SDMA que emplea las técnicas avanzadas de procesos, localiza y rastrea terminales móviles, dirigiendo las señales de la transmisión hacia los usuarios y fuera de interferencias. Esta tecnología de arreglos adaptativos logra niveles superiores de supresión de la interferencia, haciendo posible rehusar frecuencias de una manera eficaz, que él arregló hexagonal de los modelos de reuso.

En esencia, el esquema puede adaptar las asignaciones de frecuencia a dónde se localizan la mayoría de los usuarios.

La figura 3.5 muestra el proceso espacial totalmente adaptable, apoyando a dos usuarios simultáneamente en el mismo canal y en la misma célula.



*Fig. 3.5 Proceso espacial.*

Utilizando algoritmos muy sofisticados y hardware de rápido proceso, el proceso espacial toma ventajas del reuso que son el resultado de la supresión de interferencia a un nuevo nivel. El proceso espacial crea dinámicamente sectores diferentes para cada usuario y asignación de la frecuencia/canal de una manera continua, en el tiempo real.

El proceso espacial adaptable integra un alto nivel de medida y análisis de los aspectos del ambiente de RF. Considerando las técnicas de haz conmutable tradicional y de haz dirigido se asume una dirección correcta de transmisión hacia un usuario, el proceso espacial aumenta al máximo el uso de múltiples antenas para combinar las señales en el espacio.

### 3.3 IMPLEMENTACIÓN

El diseño y la implementación de la tecnología de antenas inteligentes se basan en arreglos de antenas donde el diagrama de radiación es modificado ajustando la amplitud y fase relativa en los diferentes elementos del arreglo. De aquí se ve la necesidad de enfocar nuevamente los arreglos de antenas, pero de un modo diferente; es decir tomando en cuenta su aplicación como antenas inteligentes.

#### 3.3.1 ARREGLOS DE ANTENAS

Electrónicamente la dirección del diagrama de radiación de una antena es frecuentemente generada por arreglos de antenas. Éstas antenas consisten en la agrupación de varios elementos de antena en los cuales la señal es dividida para combinar las fases y amplitudes (ver Capítulo 1). Generalmente, cualquier combinación de elementos puede formar un arreglo. Sin embargo, se usan elementos normalmente iguales en una geometría regular.

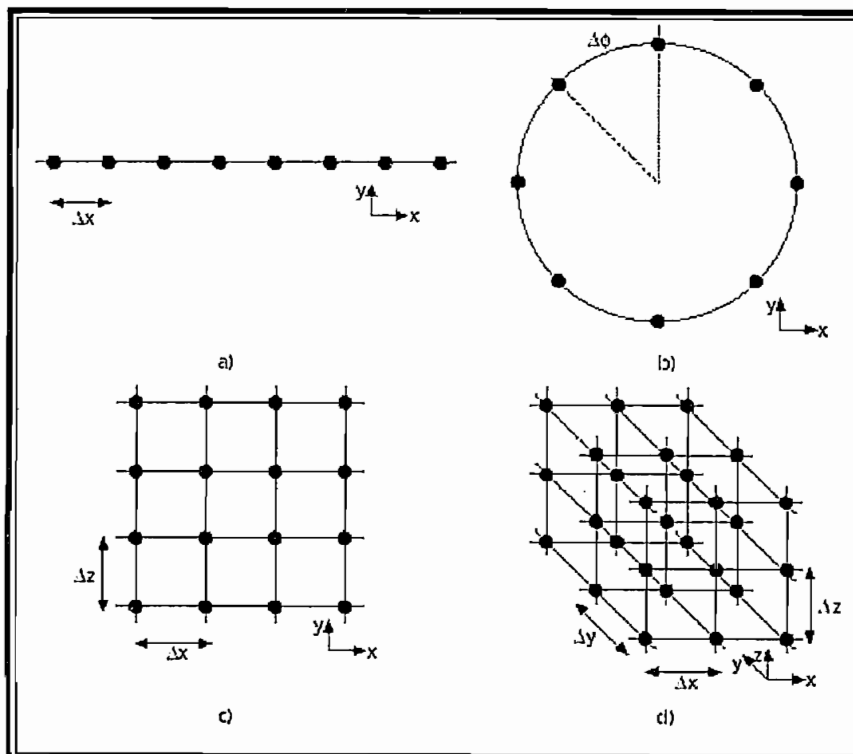


Fig. 3.6 Arreglos geométricos.

Los arreglos pueden ser uno, dos y en forma tridimensional, dependiendo de la dimensión del espacio que uno quiere acceder. La figura 3.6 muestra algunos ejemplos de geometrías de arreglos.

Usando geometrías regulares se simplifica el análisis y síntesis de los arreglos. En general, los arreglos lineales son tomados a menudo como un ejemplo. Las matemáticas pueden ser extendidas a más dimensiones y a otras geometrías, pero el principio es el mismo.

El diagrama de radiación total es dado por el tipo del elemento, las posiciones relativas y la excitación (amplitud y fase). Usando un arreglo de antena, es posible obtener un control muy bueno del diagrama de radiación, por ejemplo: la forma del lóbulo principal y el nivel del lóbulo lateral (SLL).

El diagrama de la radiación es dado singularmente por los parámetros mencionados.

### **3.3.2 CONSIDERACIONES PRÁCTICAS**

Es conocido que los diagramas de los elemento de un arreglo en teoría son todos idénticos y perfectos. En la implementación de un arreglo de antenas, éste no es el caso. Los diferentes elementos de la antena podrían tener diagramas ligeramente diferentes y así sucesivamente debido a tolerancias de la producción de lóbulos. Adicionalmente, cuando se montan varios elementos juntos (típicamente a menos de  $\lambda/2$ ) ellos influyen unos con los otros.

Este acoplamiento mutuo cambia los diagramas de los elementos y la impedancia. Esto significa que el funcionamiento del arreglo se degradará un poco.

### 3.4 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

Un sistema de antena inteligente tiene dos requerimientos principales:

- La necesidad de operar en tiempo real, y
- El requerimiento de flexibilidad y transparencia en su utilización, de forma que pueda conectarse a cualquier sistema independientemente de su disposición para trabajar o no con antenas inteligentes.

Teóricamente los sistemas de antenas inteligentes se componen de cuatro subsistemas o unidades:

- a) Subsistema de antena: Conjunto de elementos radiantes (3 arreglos de 4 antenas de doble polarización  $\pm 45^\circ$  con cobertura de  $120^\circ$  cada uno) y duplexores.
- b) Subsistema de RF/IF o unidad de radio: Componentes analógicos asociados al transmisor y receptor (amplificadores, convertidores de frecuencia, filtros, amplificadores de potencia y convertidores A/D y D/A, amplificadores de bajo ruido en recepción, redes combinadoras en transmisión y divisoras en recepción).
- c) Subsistema de algoritmo adaptativo o unidad de procesamiento de la señal:  
Procesos digitales asociados a la conformación del diagrama de radiación de la antena, tanto en transmisión como en recepción.  
Se usan algoritmos adaptativos de conformación del haz de referencia temporal (LMS, RLS)<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup> Algoritmos adaptativos LMS y RLS, ver el anexo C.



- d) Subsistema de software radio o unidad de formación del haz: procesos de separación de canales, modulación, demodulación, filtrado, codificación y decodificación asociados a los procesos de transmisión y recepción digitales.

### 3.4.1 RECEPTOR

La figura 3.7 muestra esquemáticamente los elementos de la parte de recepción de una antena inteligente. El arreglo de antena consta de  $N$  elementos. Las  $N$  señales están siendo combinadas en una sola señal, la cual es la entrada al resto del receptor (canal decodificado, etc.).

Como lo muestra la figura 3.7, la parte de recepción de la antena inteligente consiste en cuatro unidades. Además de la propia antena y como ya se mencionó, contiene una unidad de radio, una unidad de formación del lóbulo y una unidad de procesamiento de la señal.

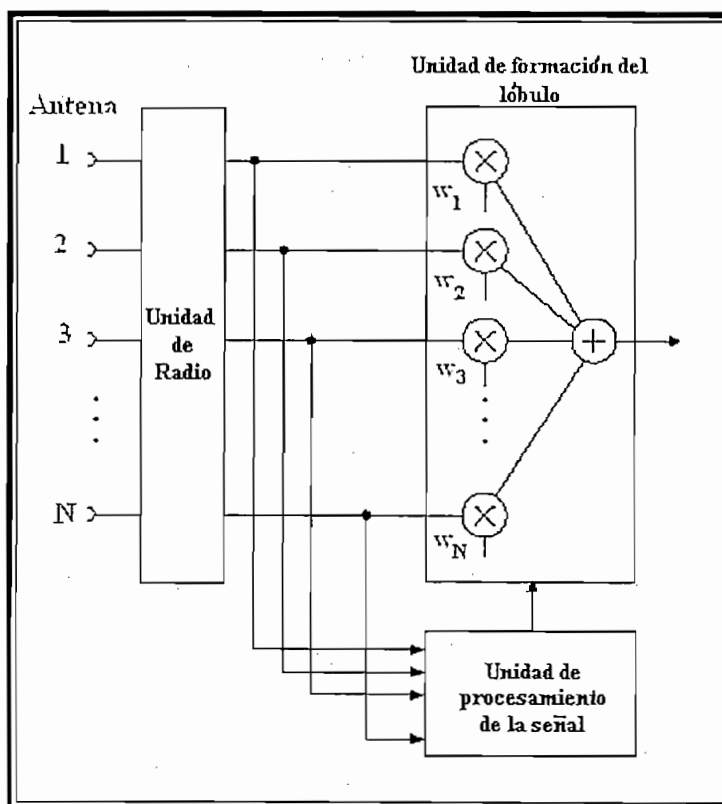


Fig. 3.7 Receptor

El arreglo tendrá a menudo un número relativamente bajo de elementos para evitar una alta complejidad innecesariamente en el procesado de la señal.

Como lo visto anteriormente, la figura 3.6 muestra cuatro ejemplos de geometrías de arreglos diferentes. Las dos primeras estructuras se usan para la formación del haz (el "beamforming") en el plano horizontal (acimut) y sólo ahí.

Esto normalmente será suficiente para los ambientes al aire libre, por lo menos en células grandes. El primer ejemplo (a) muestra un arreglo lineal unidimensional con un espaciado uniforme entre elemento de  $\Delta x$ . Esta estructura puede mejorar el "beamforming" en el ángulo del acimut dentro de un sector angular. Ésta es la estructura más común debido a su baja complejidad. El segundo ejemplo (b) muestra a breves rasgos un arreglo circular con elemento espaciados un ángulo de  $\Delta\phi = 2\pi/N$ . Esta estructura puede realizar "beamforming" en todos los ángulos del acimut. Las dos últimas estructuras son usadas para realizar la formación del haz en ambos ángulos de elevación y de acimut\*. Esto puede ser deseable para interiores de ambientes urbanos o densos.

La figura 3.6c es la vista delantera de un arreglo lineal bidimensional con elemento horizontal con un espaciado de  $\Delta x$  y el elemento vertical con espaciado de  $\Delta z$ . Esta estructura puede realizar "beamforming" dentro de un ángulo sólido. La formación del haz en el espacio entero, dentro de todos los ángulos sólidos, requiere alguna clase de estructura cúbica o esférica.

La figura 3.6d muestran un ejemplo de una estructura cúbica con separaciones de elementos de  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  y  $\Delta z$ .

#### 3.4.1.1 La unidad de radio

La unidad de radio consiste en cadenas de conversores de bajada o descendentes ("down-conversión") y conversores analógico-a-digital (A/D). Deben existir N cadenas de conversores descendentes, uno para cada uno de los elementos del arreglo.

---

\*Ángulo de acimut: es el ángulo respecto al plano horizontal referente al norte geográfico y en sentido horario. Ángulo de elevación : es el ángulo en sentido vertical

### 3.4.1.2 La unidad de procesamiento de la señal

La unidad de procesamiento de la señal estará basada en la señal recibida, calcula el peso complejo de los vectores  $w_1$   $w_N$  con los que la señal recibida de cada uno de los elementos del arreglo es multiplicada. Estos pesos darán la forma del diagrama de radiación de la antena en la dirección del enlace ascendente como lo mencionado anteriormente. Los pesos pueden optimizarse utilizando dos criterios principales: maximizando la señal recibida del usuario deseado (por ejemplo: lóbulo conmutado o arreglos en fase) o maximizando del SIR (Relación señal a interferencia), suprimiendo las señales de las fuentes de interferencia (arreglo adaptable). En teoría, con  $M$  elementos de antena uno puede ser nulo y anular la interferencia de la fuente  $M_1$ , pero debido a la propagación multitrayectoria este número normalmente será más bajo.

El método para calcular los pesos diferirá dependiendo del tipo de criterio de optimización. Cuando se usa cambió de lóbulo o haz conmutable (SL) el receptor probará todos los vectores de peso pre-definidos (correspondiendo al juego del lóbulo) y escogerá uno dando el nivel más fuerte de señal recibido. Si se usa los arreglos en fase (PA), el cual consiste en dirigir la máxima ganancia del haz hacia el componente de la señal más fuerte, la dirección de llegada (DoA) se estima primero y luego los pesos se calculan como lo describió en la sección anterior con amplitud uniforme y fase de acuerdo con ángulo de dirección del usuario deseado.

La estación base para poder estimar el canal de radio, normalmente necesita una referencia o sucesión de entrenamiento, es decir, una sucesión de bits conocida debe transmitirse periódicamente. Los métodos que aumentan al máximo al SIR en principio requieren conocimiento de la respuesta instantánea del canal del usuario deseado y todas las fuentes de la interferencia, cuya secuencia de entrenamiento resultante puede ser única para cada usuario.

### 3.4.1.3 La unidad de formación del lóbulo

En la unidad de formación del lóbulo los pesos reales de la señal recibida de cada uno de los elementos del arreglo son realizados. En el caso más avanzado esta unidad será una integración del receptor del canal ecualizador/RAKE y de la antena inteligente. En este caso  $N \cdot D$  será los pesos requeridos, donde  $D$  es el número de periodo del símbolo (profundidad) en el ecualizador del canal o el número de receptores RAKE. Esto se llama un filtro de espacio-temporal<sup>4</sup>, porque quita los componentes de las señales indeseadas y guarda las señales deseadas en el dominio del tiempo y del espacio.

Semejante unidad de formación de lóbulos se muestra esquemáticamente en figura 3.8. En este ejemplo el número de pesos es  $N \cdot 3$  y muestra que la profundidad del ecualizador es 3.

El tiempo entre uno y otro elemento de la antena es  $T$ . En un receptor RAKE, el retraso de tiempo entre los elementos no es uniforme.

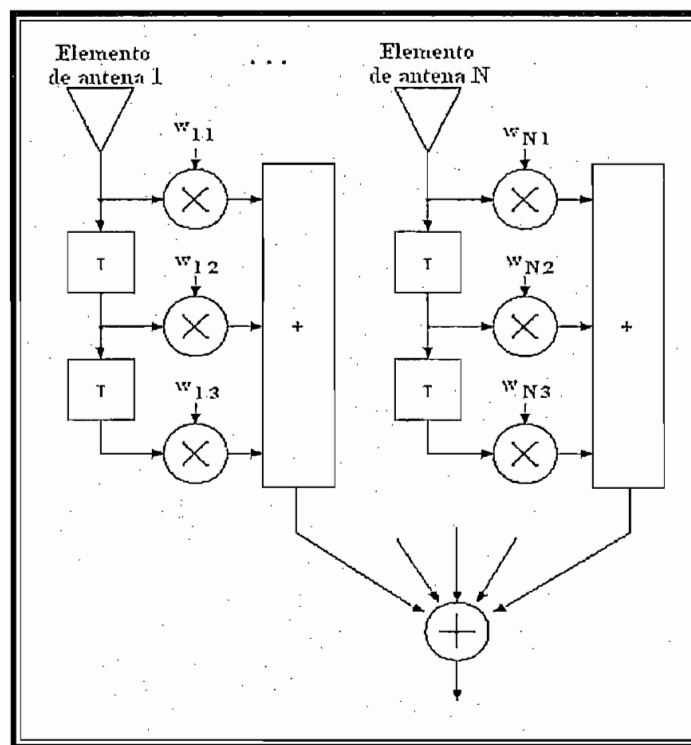


Fig. 3.8 Unidad de formación de lóbulos.

<sup>4</sup> Esquema del filtro de espacio-temporal, ver anexo B.

Cuando el lóbulo es formado digitalmente (después de A/D), la unidad de formación del lóbulo y la unidad de procesamiento de la señal normalmente se integrarán en la misma unidad, a saber el DSP (procesamiento digital de la señal). También es posible realizar la formación del lóbulo en hardware a frecuencia de la radio (RF) o frecuencia intermedia (IF).

Los tres métodos mencionados (SL, PA y AA) difieren en complejidad y carga computacional. Generalmente, SL es menos complejo que el PA que a su vez es menos complejo que el AA. Condiciones que influyen en esto son por ejemplo: la exactitud requerida y el funcionamiento en términos de potencia o C/I-ganancia.

### 3.4.2 TRANSMISOR

La parte de la transmisión de la antena inteligente será esquemáticamente muy similar a la parte de la recepción. Una ilustración se muestra en la figura 3.9. La señal es dividida en  $N$  ramas, los cuales son pesados por los pesos complejos  $Z_1 Z_N$  en la unidad que forma el lóbulo. Los pesos que dan la forma del diagrama de radiación en la dirección del enlace de bajada son calculados por la unidad de procesamiento de la señal.

La unidad de radio consiste en conversor de D/A y de cadenas de conversor de subida. En la práctica, algunos componentes tales como las mismas antenas y el DSP, será igual que en recepción.

La diferencia principal entre el enlace descendente y el enlace ascendente es que no hay ninguna antena inteligente aplicada a los terminales del usuario (estaciones móviles), subsecuentemente ningún conocimiento de la respuesta espacial del canal está disponible en el enlace descendente.

En un sistema de doble división de tiempo (TDD) la estación móvil y la estación base usan la misma frecuencia de portador sólo separadas en tiempo. En este caso los pesos calculados en "uplink" podrán ser optimizados en el "downlink" si el canal no cambia durante el periodo que se transmite del "uplink" al "downlink".

Sin embargo, no puede asumirse que este sea el caso general, por lo menos no en sistemas donde se espera que los usuarios se muevan a alta velocidad.

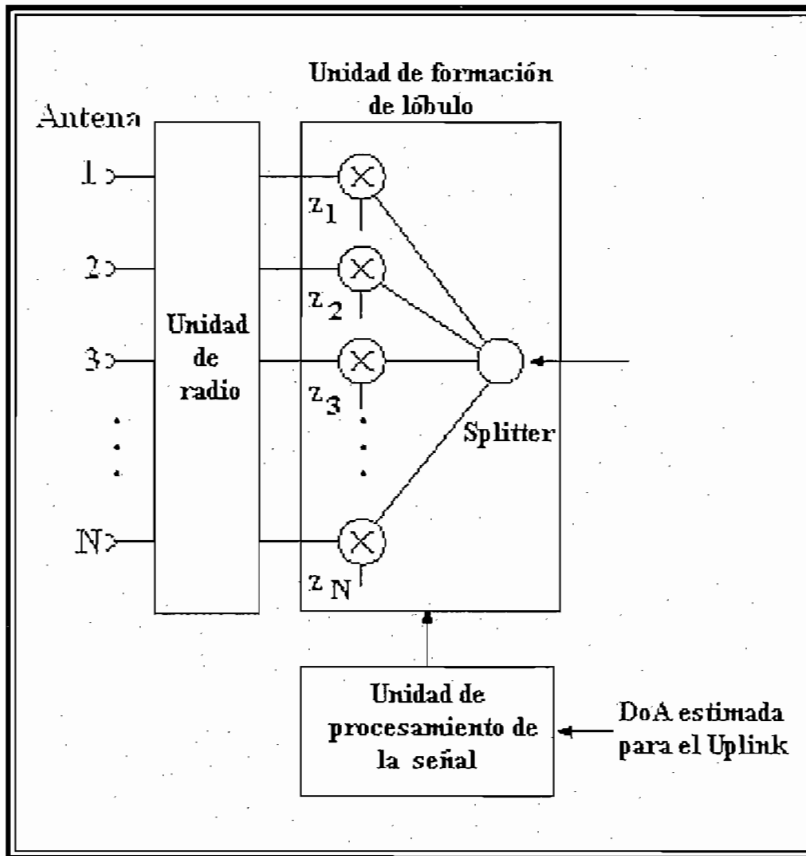


Fig. 3.9 Transmisor.

Si la doble división de frecuencia (FDD) se usa, el "uplink" y "downlink" son separados en frecuencia. En este caso los pesos óptimos no son generalmente los mismos debido a que la respuesta del canal depende de la frecuencia.

Así como la optimización de la formación del haz (es decir, AA) en "downlink" es difícil y la técnica que frecuentemente es la más sugerida es la aproximación geométrica de la estimación de la dirección de llegada (DoA).

La adopción es direccionalmente recíproca, es decir, la dirección desde donde la señal llega al enlace ascendente es la dirección en que la señal debe transmitirse para localizar al usuario en el enlace descendente.

La estrategia usada por la estación base es estimar el DoA de la dirección (o direcciones) desde la parte principal de donde se recibe la señal de usuario.

Esta dirección se usa en "downlink" escogiendo los pesos  $\mathbf{Z}_1\mathbf{Z}_N$  para que el diagrama de la radiación sea un lóbulo (o lóbulos) dirigido hacia el usuario deseado; esto similar al PA. Además, es posible posicionar ceros en la dirección hacia otros usuarios para que la interferencia sufrida por estos usuarios se minimice.

Debido a que el desvanecimiento multipletroyectoria de las diferentes señales ha sido suprimido para escoger la dirección del enlace ascendente basada en promediar el canal del enlace descendente durante un período de tiempo.

### 3.5 ARQUITECTURA GENERAL DE UN SISTEMA DE ANTENAS INTELIGENTES

Una vez determinadas las partes que constituyen el sistema de antena inteligente, así como su funcionalidad y aplicación, se puede presentar una estructura completa del sistema; así como también explicar a breves rasgos como se realiza el procesamiento de las señales en el mismo.

La arquitectura teórica del sistema de antenas inteligentes se muestra en la figura 3.10.

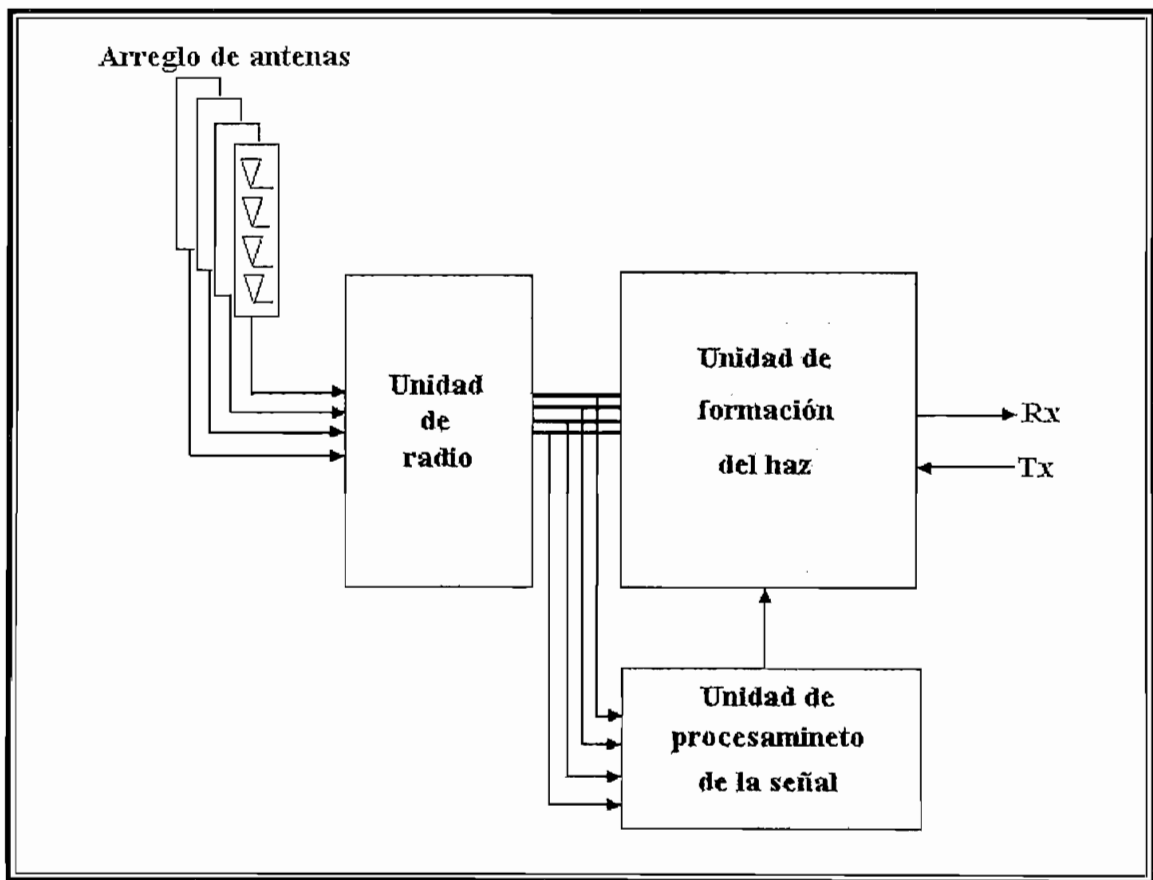
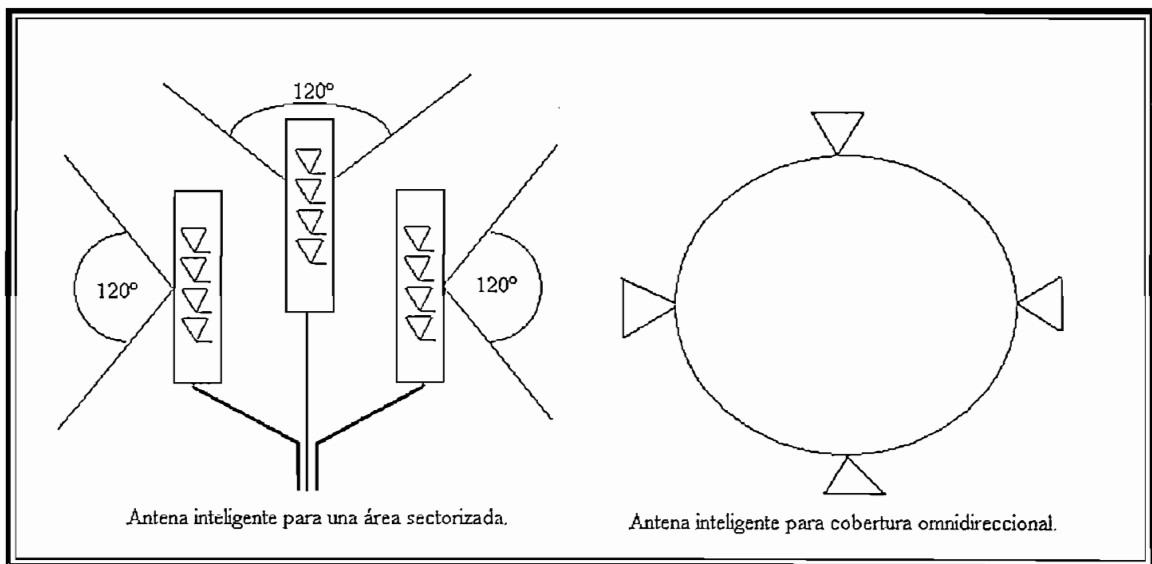


Fig. 3.10 Arquitectura del sistema de antena inteligente



Cada unidad esta constituida por diferentes dispositivos que favorecen al procesamiento de la señal; desglosando cada una de las unidades se puede ver la estructura interna de las mismas, como ya se mencionó, ésta estructura variará en función del grado de aplicación, los requerimiento y las exigencias que se le quieran dar al sistema de antenas inteligentes. Todas las estructuras mostradas a continuación son básicas; no obstante, permitirán tener una idea general del hardware del sistema de antenas inteligentes. En lo que se refiere al arreglo de antenas, varias son las geometrías que se pueden optar para dichos arreglos (como ya se mencionó anteriormente), todo dependerá de la aplicación.

Por ejemplo: si la antena inteligente está destinada para cubrir una área sectorizada, se podría elegir tres arreglos lineales de 4, 6, 8, ...etc elementos cada uno; si el caso fuese de una área con cobertura omnidireccional se podría usar un arreglo circular (ver figura 3.11).



*Fig. 3.11 Ejemplos de arreglos de antenas.*

En lo concerniente a la unidad de radio, su estructura de hardware podría estar constituida de la siguiente manera.

Teoría Básica para el Diseño de las Antenas Inteligentes

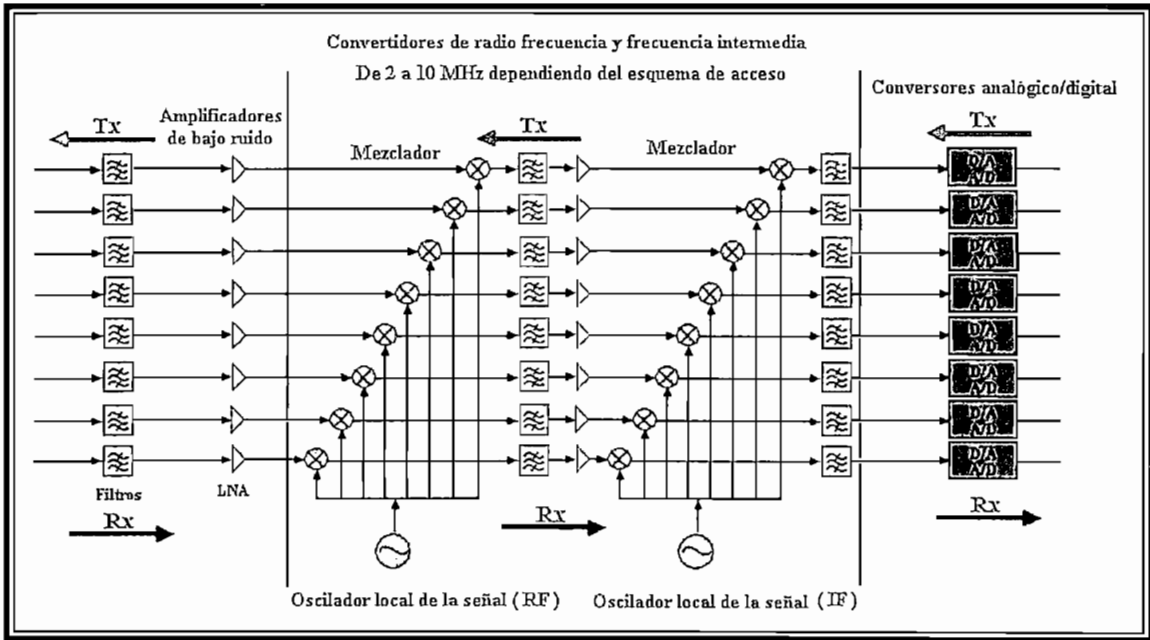


Fig. 3.12 Arquitectura de hardware de la unidad de radio del sistema de antenas inteligentes.

La unidad de procesamiento de la señal estará estructurada como lo muestra la siguiente figura.

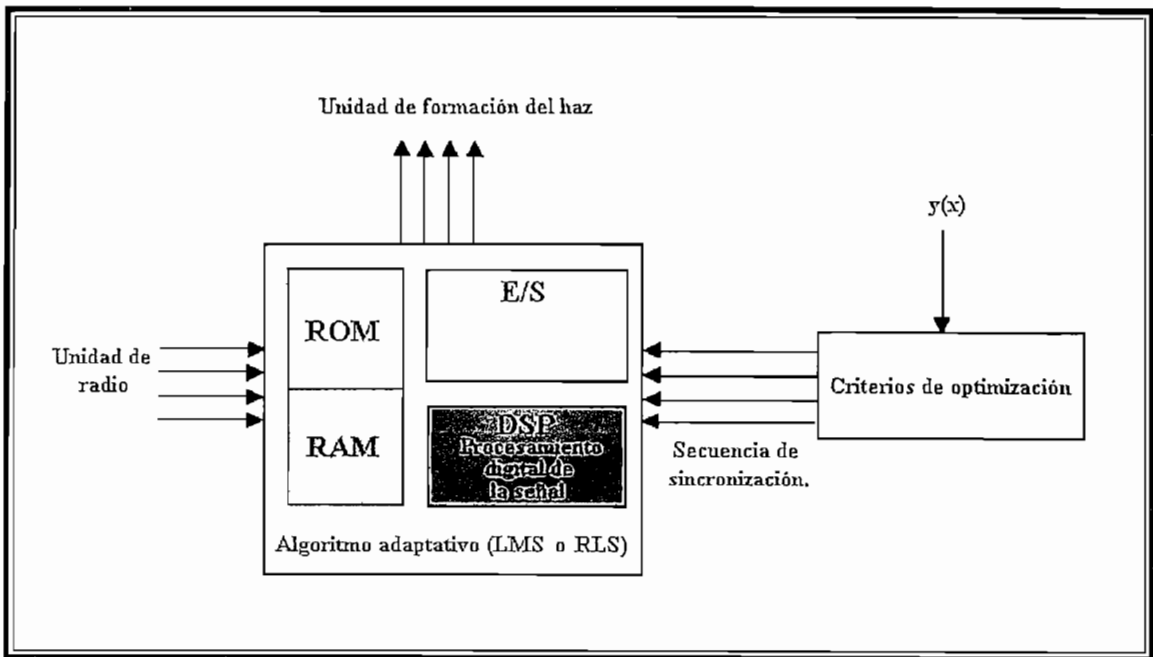


Fig. 3.13 Arquitectura de la unidad de procesamiento de la señal.

Por último el hardware de la unidad de formación del haz presenta la siguiente estructura:

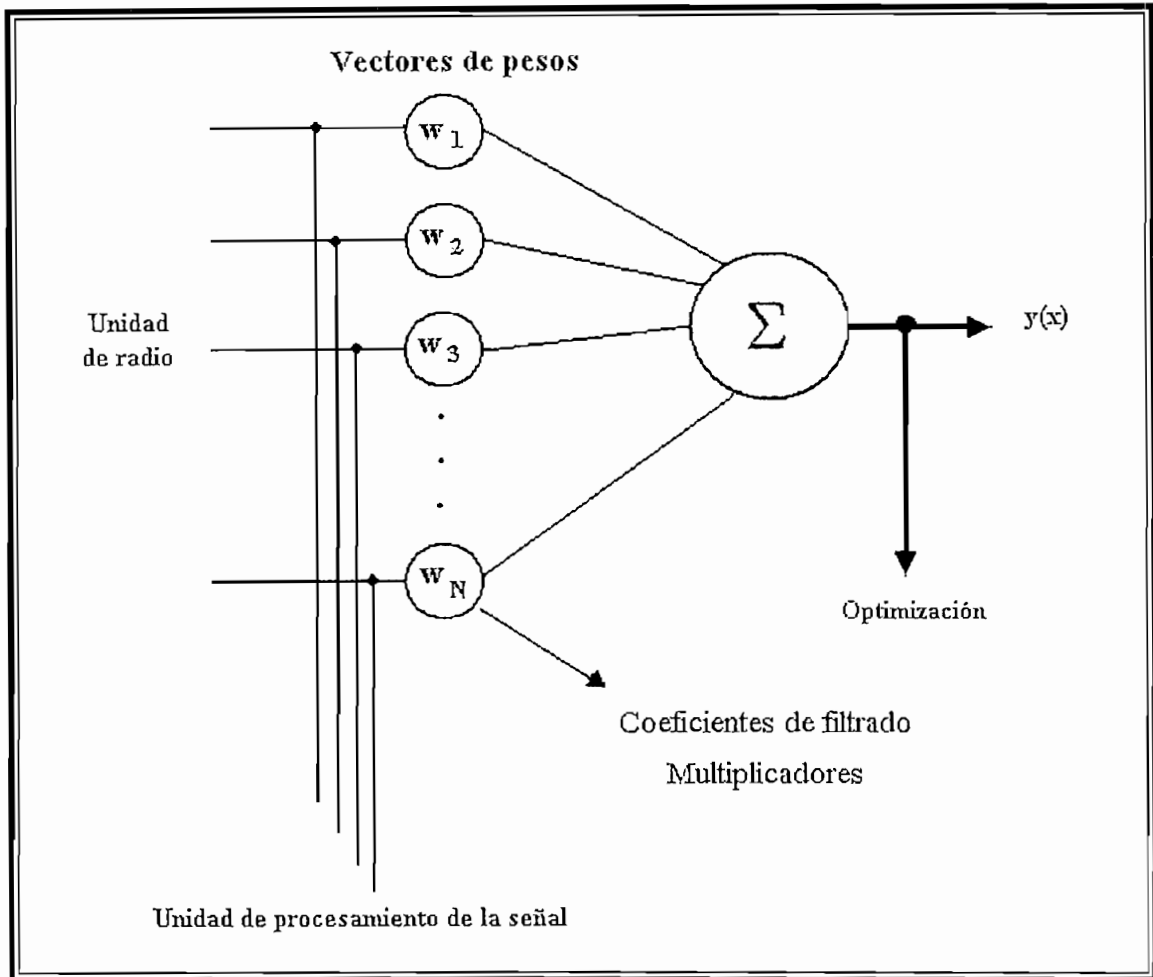


Fig. 3.14 Arquitectura de la unidad de formación de haz.

A grandes rasgos, el funcionamiento es el siguiente:

La señal que reciben las antenas es una señal de radiofrecuencia (RF) sin procesar. Esta RF se encamina inicialmente a circuitos que la manejan como una señal analógica, tal como un radio. Algunos dispositivos con antenas inteligentes aplican sus conceptos inteligentes en esta etapa analógica.

Después del procesamiento inicial, la RF se convierte en una señal digital, misma que se envía al dispositivo host como una cadena de datos.

La mayoría de los dispositivos que usan las antenas inteligentes aplican sus conceptos inteligentes en este conjunto de circuitos digitales.

En el enlace ascendente (móvil a BTS), la señal procedente del arreglo de antenas, tras ser convertida de RF a IF y demodulada, es introducida en el subsistema de algoritmo adaptativo para realizar la conformación del diagrama de radiación (con un conjunto de pesos común para todos los usuarios calculado mediante algoritmos adaptativos de referencia temporal LMS/RLS a partir de los bits piloto obtenidos con anterioridad).

Con posterioridad, dicha señal es vuelta a convertir a RF antes de ser pasada a la estación base. Esta señal presentará una considerable mejora respecto a la señal que se recibiría con una antena omnidireccional típica.

En el enlace descendente (BTS a móvil), se lleva a cabo un proceso similar, pero con un conjunto de pesos diferentes para cada usuario calculados a partir de los pesos utilizados en el enlace ascendente.

Con ello se consigue una cancelación total de interferencias en el enlace descendente, pero sólo una cancelación parcial únicamente de las interferencias de células adyacentes en el enlace ascendente.

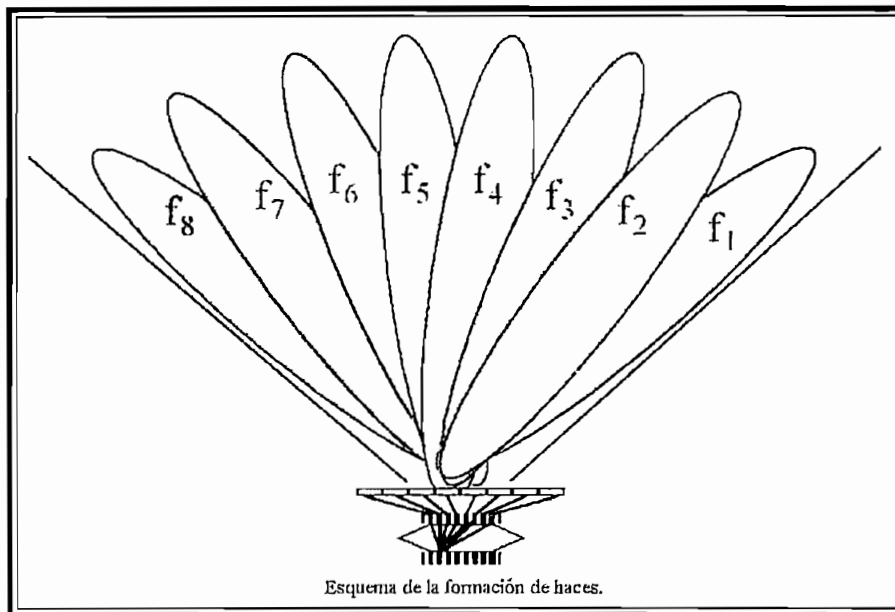
### **3.6 ESQUEMAS DE FORMACIÓN DE HACES**

Varias son las maneras que se pueden utilizar para la formación de los haces en un sistema de antenas inteligentes, la pauta de saber cual de ellos es el más adecuado, como ya se dijo, dependerá de las exigencias del sistema.

Dentro de los esquemas de formación de haces se tiene:

1. Formación de haces convencionales: Ajusta fase únicamente, requiere conocer la DoA de la señal deseada. No es adecuado cuando hay interferencia.

2. Formación de haces con nulos dirigidos: Ajusta fase y amplitud, requiere conocer la DoA de la señal deseada y de las interferencias.



*Fig. 3.15 Distribución de radiación.*

3. Formación de haces óptimos: Ajusta fase y amplitud, solo requiere conocer alguna propiedad de la señal deseada (DoA o secuencias de entrenamiento). Solución (Mínimo Error Cuadrático Medio) MMSE, LS. Maximiza la SINR.
4. Formación de haces adaptativos: Utiliza algoritmos adaptativos para calcular la solución óptima. (Arreglos de antenas adaptativos).

Como se puede observar, la mayoría de estos radican su funcionalidad en la utilización de algoritmos<sup>5</sup>, los cuales vale la pena recalcar, son la inteligencia del sistema.

---

<sup>5</sup> Varios son los algoritmos que existen para ser aplicados en la tecnología de antenas inteligentes, los mismos son presentados en el anexo B.

### 3.7 ALGORITMOS DE FUNCIONAMIENTO

A continuación se describen 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  $S_k(t)$  hacia la antena. La señal del usuario  $K$  - ésimo sufre múltiples reflexiones y llega a la estación base a través de  $L_k$  trayectos todos distintos, cada uno de los cuales tiene una amplitud y una fase distinta ( $a_{ki} \cdot e^{j\phi_{ki}} = \alpha_{ki}$ ), y llegan con un retardo ( $\zeta_{ki}$ ) y una dirección  $\Phi_{ki}$  diferentes. En las estaciones base se tienen arreglos de  $N$  antenas, las mismas que se suponen que están siendo alimentadas y equiespaciadas (por facilidad). En estas condiciones, la señal recibida en el elemento  $n$  - ésimo ( $U_n(t)$ ) del arreglo es:

$$u_n(t) = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{L_k} a_n(\Phi_{ki}) \cdot a_{ki} \cdot S_k(t - \zeta_{ki}) + n_n(t) \quad (1)$$

Donde:

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

$K=2\pi/\lambda$  es el número de onda para la frecuencia de trabajo, cuya longitud de onda es  $\lambda$ .

$d$  es la distancia entre los elementos del arreglo.

$n_n(t)$  es el 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:

$$y(t) = \vec{w}(t)^H \cdot \vec{u}(t) = \vec{w}(t)^H \cdot \left( \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{L_k} \vec{a} \cdot a_{ki} \cdot S_k(t - \zeta_{ki}) + \vec{n}(t) \right) \quad (2)$$

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

El problema consiste entonces en encontrar un vector de pesos  $\vec{W}$  capaz de sintetizar un diagrama de radiación que sea útil para apuntar a un usuario. Si el sistema dispone de  $N_R$  cadenas receptoras (es decir, es capaz de establecer hasta  $N_R$  comunicaciones simultaneas con otros tantos usuarios), habrá que calcular a la vez  $N_R$  vectores de pesos, aplicarlos a las salidas de los elementos del arreglo y obtener así las  $N_R$  salidas (una para cada receptor).

El cálculo del vector  $\vec{W}$  que mejor se adapte a las necesidades del servicio (según se quiera maximizar la SNR, aprovechar la diversidad de trayectos, etc.) puede realizarse mediante algoritmos muy diversos.

Básicamente existen tres tipos de algoritmos para el cálculo del vector de pesos, los cuales se diferencian en el modo en que seleccionan al usuario deseado:

### 3.7.1 TÉCNICAS CON REFERENCIA TEMPORAL

En este caso, el receptor generará localmente una estimación de la señal del usuario que desea captar (obtenida usualmente a partir de una secuencia de entrenamiento o de un código scrambling).

Entonces, el algoritmo encontrará el valor de  $\vec{W}$  que minimiza el error entre la señal de salida del arreglo,  $y(t)$  y la estimación,  $\vec{d}(t)$ . La solución óptima es:

$$\vec{W}_{OPT} = R^{-1} \cdot \vec{P} \quad (3)$$

Donde:

$$\mathbf{R} = \mathbf{E}[\vec{\mathbf{u}} \cdot \vec{\mathbf{u}}^H] \quad (4)$$

es a matriz de autocorrelación de la señal de entrada, y

$$\vec{\mathbf{p}} = \mathbf{E}[\vec{\mathbf{u}} \cdot d(t)^*] \quad (5)$$

es la correlación cruzada entre la señal a la entrada y la señal deseada.

No siempre es sencillo o viable obtener estas matrices de correlación, por lo que existen varias técnicas que tratan de aproximar este valor óptimo. Las soluciones clásicas en este caso son la del Mínimo Error Cuadrático Medio (MMSE) y la del Mínimo Cuadrado (LS).

La diferencia entre ambas es que la MMSE encuentra el  $\vec{\mathbf{W}}$  óptimo entre todo el conjunto de posibles realizaciones (para lo cual hay que suponer un entorno estacionario), mientras que la LS lo encuentra en un número finito de muestras ("snaps hots"), por lo que no necesita suponer estacionariedad.

La solución encontrada con estas técnicas maximiza la relación señal a ruido (SNR) media (puede ser la media de conjunto en MMSE o una media temporal en LS). De esta manera se consigue dirigir el haz hacia el usuario deseado, reduciéndose el nivel de ruido a la entrada. Además, impone nulos de radiación en las señales interferentes y de multitrayecto que no lleguen relacionadas a la señal deseada. Las señales interferentes relacionadas entre sí entran por las antenas, pero se suman en contrafase a la salida, y el multitrayecto de estas señales se recibe por haces secundarios y puede explotarse con un receptor "RAKE" convencional.



### 3.7.2 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 requiere el uso de otros complejos algoritmos para hacer dicha estimación).

La ventaja de ésta técnica frente a la anterior es que no se necesita conocer los estadísticos de la señal y convergen más de prisa, al no tener que invertir grandes matrices. No obstante, son muy sensibles a los posibles errores de apuntamiento (debido 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, ésta puede ser eliminada como una interferencia más.

Como ejemplo, se puede citar las técnicas MAXSNR (que maximizan la SNR a la salida del arreglo, si se conocen ciertos estadísticos de ruido) y la mínima varianza con restricción lineal – LCMV – (que minimiza la varianza de la señal de salida, sujeta a algunas restricciones).

### 3.7.3 TÉCNICAS CON REFERENCIA CIEGA

Este tipo de técnica es una de las más complejas, se trabaja sobre alguna característica conocida de la señal deseada como alguna modulación, algún tipo de cicloestacionariedad, etc. Por ejemplo, podemos citar la técnica de algoritmo de módulo constante (CMA<sup>6</sup>), en la que se fuerza una solución de envolvente constante (interesante cuando la señal deseada verifique esta característica, como es el caso de UMTS, que utiliza modulación QPSK).

Habitualmente, el algoritmo que se diseña para una aplicación no se sujeta exactamente en uno de estos tipos de técnicas, sino que puede utilizar algún esquema combinado para mejorar sus aplicaciones.

---

<sup>6</sup> Algoritmos de modulo constante (CMA), ver el anexo B

## **3.8 ESQUEMAS COMBINADOS PARA EL CALCULO DEL VECTOR DE PESOS**

### **3.8.1 PROCESADO HAZ-ESPACIO**

La técnica de 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 criterios establecidos.

### **3.8.2 CONFORMADOR DE BANDA ANCHA**

Emplea una serie de líneas de retardo y de filtros FIR (Respuesta al impulso finita) con los que sintetiza la respuesta de frecuencia en cada haz.

### **3.8.3 CONFORMADOR EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA**

Realiza una transformada rápida de Fourier (FFT) a la salida de cada antena, de tal manera que se calcula el vector de pesos óptimo para cada componente espectral.

Después se realiza una transformada inversa rápida de Fourier (IFFT) para recuperar la señal de banda ancha.

### **3.8.4 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 hacer un muestreo de la señal de salida con técnicas mucho más minuciosas que la del criterio de Nyquist.

### 3.8.5 MÉTODO DE LA AUTOESTRUCTURA

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

Cuando se utilizan este tipo de algoritmos, se debe tenerse en cuenta que no es muy eficiente calcular la solución completa del problema cada vez que se desee actualizar el valor del vector  $\vec{W}$  (normalmente, cada trama: 10ms en UMTS). 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, sujetar a nuevos usuarios y seguir a aquellos que se desplazan. Entre los más interesantes destacan el método del gradiente conjugado, el de Mínimos Cuadrados Recursivos – RLS – (que necesita secuencia de entrenamiento) el LS-CMA (una extensión no lineal del LS que aprovecha las características del algoritmo CMA).

Existen algunos algoritmos diseñados explícitamente para sistemas CDMA. Estos algoritmos deben ser adaptativos y multiusuario; es decir, extraer la señal de todos los usuarios simultáneamente (por lo tanto, se calculara uno distinto para cada usuario). Unos son como referencia ciega, pero los mas sofisticados utilizan como referencia temporal los mismos códigos de scrambling de cada usuario, para distinguirlos.

La aplicación de un algoritmo u otro en el diseño de una antena inteligente depende de la meta a la que se desee llegar entre la funcionalidad del método (robustez, flexibilidad, etc.) y su eficiencia computacional (sobre todo, teniendo en cuenta que se desea conseguir que funcione en tiempo real).

Esto es cierto cuando hablamos del enlace ascendente, además de esto, existen ciertas consideraciones que hay que tener en cuenta.

En efecto, en el enlace descendente es la estación base la que trasmite 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 frecuencia para el enlace ascendente y el descendente están lo bastante separadas como para que la respuesta del canal sea distinta en cada caso y por tanto, cambie la distribución espacial, temporal y espectro 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 sintetizar 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.

### **3.9 METODOLOGÍA PARA LA ELECCIÓN DEL ALGORITMO MAS ADECUADO**

En el diseño del Sistemas de Antenas Inteligentes, se toman en cuenta diferentes algoritmos de adaptación, algoritmos de estimación del ángulo de incidencia, y modelos de canal; se debe tener criterios para escoger los algoritmos. Algunos de ellos son:

Requerimiento computacional, complejidad, costo, etc. Esto, con la posibilidad de encontrar las mejores opciones que más se ajustan con los requerimientos del sistema al cual se le va a dar este tipo de servicio, en un sistema de antenas adaptativas, que ofreciera una mejora en la calidad de los enlaces de acceso a la red celular.

### 3.9.1 ALGORITMO DE FILTRACIÓN ADAPTATIVO

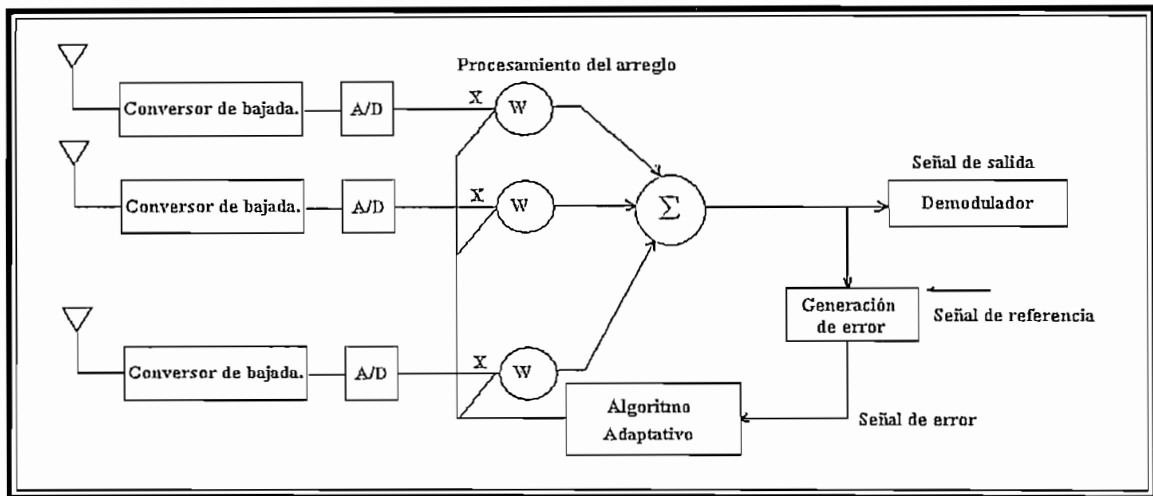


Fig. 3.16 Estructura de un arreglo adaptativo.

Para seleccionar el algoritmo adaptativo se debe tener en cuenta algunos factores que los cuales permiten descartar a los algoritmos que no cumplen con los requerimientos del sistema de antenas adaptativas. Algunos de los factores se citan a continuación.

#### 3.9.1.1 Tasa de Convergencia

Es el número de iteraciones requeridas por el algoritmo, en respuesta a una entrada estacionaria, para converger a la solución óptima.

#### 3.9.1.2 Seguimiento

Es la capacidad que debe tener un algoritmo para poder encontrar estadísticamente las variaciones que tiene el sistema.

#### 3.9.1.3 Robustez

Es habilidad del algoritmo para operar de forma correcta con un dato de entrada mal condicionado.

### 3.9.1.4 Requerimiento computacional

Este incluye:

- El número de operaciones requeridas para hacer una iteración completa del algoritmo.
- Memoria requerida.
- Flexibilidad de programación.

### 3.9.2 ALGORITMO PARA LA ESTIMACIÓN DEL ÁNGULO DE INCIDENCIA

La selección de este algoritmo se encuentra limitado debido a la complejidad computacional (número de operaciones necesarias para el cálculo de la potencia de salida del arreglo como una función del ángulo de incidencia), resolución (mínima separación angular entre usuarios SDMA) y técnicas de formación del haz en la dirección deseada.

#### 3.9.2.1 Resolución

Representa a la exactitud en la medición del ángulo de incidencia.

#### 3.9.2.2 Técnica de formación del haz en la dirección deseada

Representa al método utilizado para el direccionamiento del haz. Teniendo en cuenta los factores mencionados anteriormente, el Método de Varianza Mínima de "Capon"<sup>7</sup> es uno de los más utilizados debido a que:

- Ocupa la misma técnica de mínimos cuadrados, que utiliza el algoritmo LMS. Esto permite optimizar la lógica combinatoria, reutilizando funciones generadas para el funcionamiento del algoritmo LMS, como por ejemplo la autocorrelación de las señales de entrada del arreglo.

---

<sup>7</sup> Método de la varianza mínima, ver el anexo B.

- En el cálculo de la potencia de salida del arreglo reviste una menor complejidad computacional, debido a que los algoritmos basados en la técnica de subespacio como es el caso del algoritmo de clasificación de múltiples señales MUSIC<sup>8</sup>.
- Brinda mejor resolución que el algoritmo de suma y retardo. A pesar de la simplicidad de este último.

---

<sup>8</sup> Algoritmo MUSIC, ver anexo B

### 3.10 METODOLOGÍA DE DISEÑO

#### 3.10.1 DISEÑO DE UN ARREGLO DE ANTENA INTELIGENTE APLICADO A LA TELEFONÍA MÓVIL PARA LA BANDA DE LOS 1900 MHZ

Varias son las estructuras que se pueden tomar en cuenta para el diseño de una antena inteligente, según la teoría expuesta, existen diversas geometrías para los arreglos de antenas: lineales, circulares, cuadrados, rectangulares y cúbicos. Dentro de estos el más simple por su forma y diseño, sin duda alguna, es el arreglo lineal, el cual sirve como ejemplo claro para ilustrar el diseño de tal antena.

Pero no solo ello influye en la elección de la geometría del arreglo, también depende de la utilización que se quiera dar. Por ejemplo: si la antena inteligente la aplica como una antena de una celda sectorizada, la recomendación dada por investigadores de esta tecnología es que se utilice un arreglo lineal (siendo el caso del ejemplo que se presentara a continuación), si en cambio su aplicación será de una antena para una celda de cobertura omnidireccional, lo mejor es utilizar un arreglo circular.

La forma y los parámetros tomados para el diseño de esta antena han sido escogidos basándose en las recomendaciones dadas por la misma teoría, si bien es cierto, que el diseño propiamente del arreglo es sencillo, la dificultad radica en el procesamiento de la señal; y en la elección y aplicación del mejor algoritmo adaptativo para la conformación del haz en dichas antenas.

Los fabricantes de dichas antenas, encapsulan a los arreglos de antenas dentro de paneles, que le dan una presentación más versátil y una mayor protección contra los agentes atmosféricos, incluso dicho encapsulado sirven como entes reflectores y directores de la señal radiada; sin embargo sus principios de diseño son los mismos.



### 3.10.2 ARREGLO LINEAL UNIDIMENSIONAL

El arreglo a realizar consiste en una serie de dipolos en una configuración lineal horizontal, para ello se ha considerado los siguientes parámetros:

La frecuencia de trabajo esta en el orden de los 1900 MHz. Según las recomendaciones dadas por los fabricantes, se a señalado que se pueden realizar arreglos de 4, 6, 8, 12 y 16 elementos, pero si se toma en cuenta que mientras mayor sea el número de elementos mayor será la generación de lóbulos secundarios, la elección de un arreglo de antena con 8 elementos será la mas optima de manera que la metodología de diseño sea fácil de comprender.

La distancia de separación entre las antenas del arreglo elegido es de  $\lambda/4$ , distancia que después de varias pruebas, permitió conseguir el lóbulo con mayor directividad.

El arreglo en estudio es “endfire” y el ángulo al igual que el signo nos indica la orientación que tendría el grafico.

Frecuencia:	$f = 1900 \text{ MHz}$
Número de elementos:	$n = 8$
Distancia:	$d = \lambda/4$
Angulo:	$\alpha = -\pi/2$
Longitud de las antenas:	$l = \lambda$
Forma geométrica del arreglo:	Lineal horizontal unidimensional

### 3.10.3 CÁLCULOS MATEMÁTICOS

Los cálculos matemáticos realizados a continuación, tienen como base la teoría expuesta en él Capítulo uno, cuyo contenido de “Antenas” permitirá encontrar el diagrama de radiación del arreglo aquí planteado.

Gráficamente el arreglo de antenas quedaría establecido de la siguiente manera:

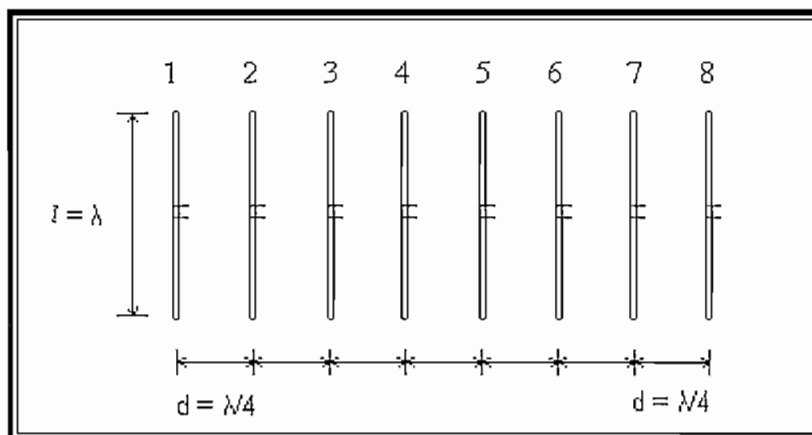


Fig. 3.17 Arreglo de antenas dipolo.

Es conocido que para obtener el diagrama de radiación de un arreglo como este, lo primero que se tiene que hacer es considerar al arreglo de antenas dipolo como un arreglo de elementos isotrópicos y obtener su diagrama de radiación, luego se debe hallar el diagrama de radiación de uno solo de los elementos del arreglo (de un dipolo). Una vez logrado esto, se superponen los dos diagramas y el área en común de los dos diagramas viene a ser el lóbulo de radiación resultante y real del arreglo lineal (ver Capítulo 1, multiplicación de diagramas de radiación).

### 3.10.3.1 Arreglo de 8 elementos isotrópicos.

Aquí, se realizarán todos los cálculos correspondientes al arreglo de 8 elementos isotrópicos para así hallar su diagrama de radiación.

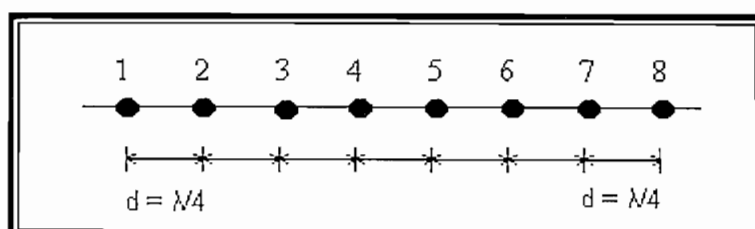


Fig. 3.18 Arreglo de ocho elementos isotrópicos.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (6)$$

$$\lambda = \frac{300}{1900 \text{ Mhz.}} \quad (7)$$

$$\lambda = 15.79 \text{ cm.} \quad (8)$$

$$E_{in} = \frac{1}{n} \frac{\text{Sen} \frac{n\psi}{2}}{\text{Sen} \frac{\psi}{2}} \quad (9)$$

A través de esta ecuación se puede obtener la forma del diagrama de radiación del arreglo de antenas.

$$\psi = \beta d \text{Cos } \theta \pm \alpha \quad (10)$$

Donde  $\psi$  es la diferencia de fase total la cual indica la dirección de la fase que va a tener el diagrama.

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (11)$$

Y  $\beta$  es una constante en función de la frecuencia siendo una expresión que sirve para calcular la fase del diagrama.

$$\psi = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\lambda}{4} \text{Cos } \theta - \frac{\pi}{2} \quad (12)$$

$$\psi = \frac{\pi}{2} \text{Cos } \theta - \frac{\pi}{2} \quad (13)$$

Reemplazando los parámetros del arreglo y  $\beta$  en la ecuación 10, se tiene la ecuación 13.

$$E_{in} = \frac{1}{8} \frac{\text{Sen}(2\pi \text{Cos } \theta - 2\pi)}{\text{Sen}\left(\frac{\pi}{4} \text{Cos } \theta - \frac{\pi}{4}\right)} \quad (14)$$

Con ello obtenemos la ecuación que permitirá conocer la forma del diagrama de radiación del arreglo de elementos isotrópicos.

### 3.10.3.2 Ángulos de máxima radiación

$$\theta_{\max} = \cos^{-1}\left(\frac{-\alpha}{\beta l}\right) \quad (15)$$

La ecuación aquí mostrada es muy importante puesto que indica la dirección de máxima radiación que tiene el lóbulo.

$$\theta_{\max} = \cos^{-1}\left(\frac{\frac{\pi}{2}}{\frac{2\pi}{\lambda} \frac{\lambda}{4}}\right) \quad (16)$$

Reemplazando los parámetros iniciales en la ecuación.

$$\theta_{\max} = \cos^{-1}\left(\frac{\frac{\pi}{2}}{\frac{\pi}{2}}\right) \quad (17)$$

El resultado de la ecuación indica que la máxima radiación del lóbulo ocurre en cero grados.

$$\theta_{\max} = 0^\circ \quad (18)$$

### 3.10.3.3 Ángulos de mínima radiación

$$\theta_{\min} = \cos^{-1}\left[\left(\frac{2\pi k}{n} - \alpha\right) \frac{1}{\beta l}\right] \quad (19)$$

La ecuación de ángulos de mínima incidencia indica en donde existe la mínima radiación de los lóbulos.

$$\theta_{\min} = \cos^{-1}\left[\left(\frac{\pi}{4}k + \frac{\pi}{2}\right) \frac{2}{\pi}\right] \quad (20)$$

Donde k es un valor arbitrario con valores de 1, 2, 3....

$$\theta_{\min} = \cos^{-1}\left[\frac{k}{2} + 1\right] \quad (21)$$

El valor de k se prueba hasta que el argumento de la ecuación sea igual a 1.

<b>K</b>	-1	-2	-3	-4
<b>θ</b>	60°	90°	120°	180°

Tabla 3.1 Ángulos de mínima radiación.

### 3.10.3.4 Ángulos secundarios de máxima radiación

$$\theta_{sec\,m\acute{a}x} = \text{Cos}^{-1} \left[ \left( \frac{(2m+1)\pi}{n} - \alpha \right) \frac{\lambda}{2\pi l} \right] \quad (22)$$

Los ángulos secundarios de máxima radiación indican la dirección de los lóbulos laterales que tiene el arreglo descrito.

$$\theta_{sec\,m\acute{a}x} = \text{Cos}^{-1} \left[ \left( \frac{(2m+1)\pi}{8} + \frac{\pi}{2} \right) \frac{2}{\pi} \right] \quad (23)$$

A  $m$  se le dan diferentes valores para así obtener los valores deseados, los mismos que pueden ser positivos o negativos.

$$\theta_{sec\,m\acute{a}x} = \text{Cos}^{-1} \left[ \frac{2m+1}{4} + 1 \right] \quad (24)$$

$m$	-1	-2	-3	-4
$\theta_{sec\,m\acute{a}x}$	41.409°	75.522°	104.47°	138.59°

Tabla 3.2 Ángulos secundarios de máxima radiación

## 3.10.4 DIAGRAMA DE RADIACIÓN

### 3.10.4.1 Diagrama de radiación del arreglo de elementos isotrópicos

Para obtener el diagrama de radiación de un arreglo como este, se pueden utilizar varios programas computacionales, los cuales permiten tener un panorama muy real de los lóbulos de radiación del arreglo. Con la ayuda del paquete computacional Matlab se ha obtenido el diagrama de radiación de la figura 3.19 el mismo que presenta un lóbulo principal y varios secundarios que no tienen mayor importancia. La máxima radiación es dada en el sentido horizontal del arreglo.

Se debe recordar que los cálculos realizados y los gráficos obtenidos son datos experimentales, los cuales se van a comprobar una vez construida la antena y realizadas las respectivas pruebas de campo.

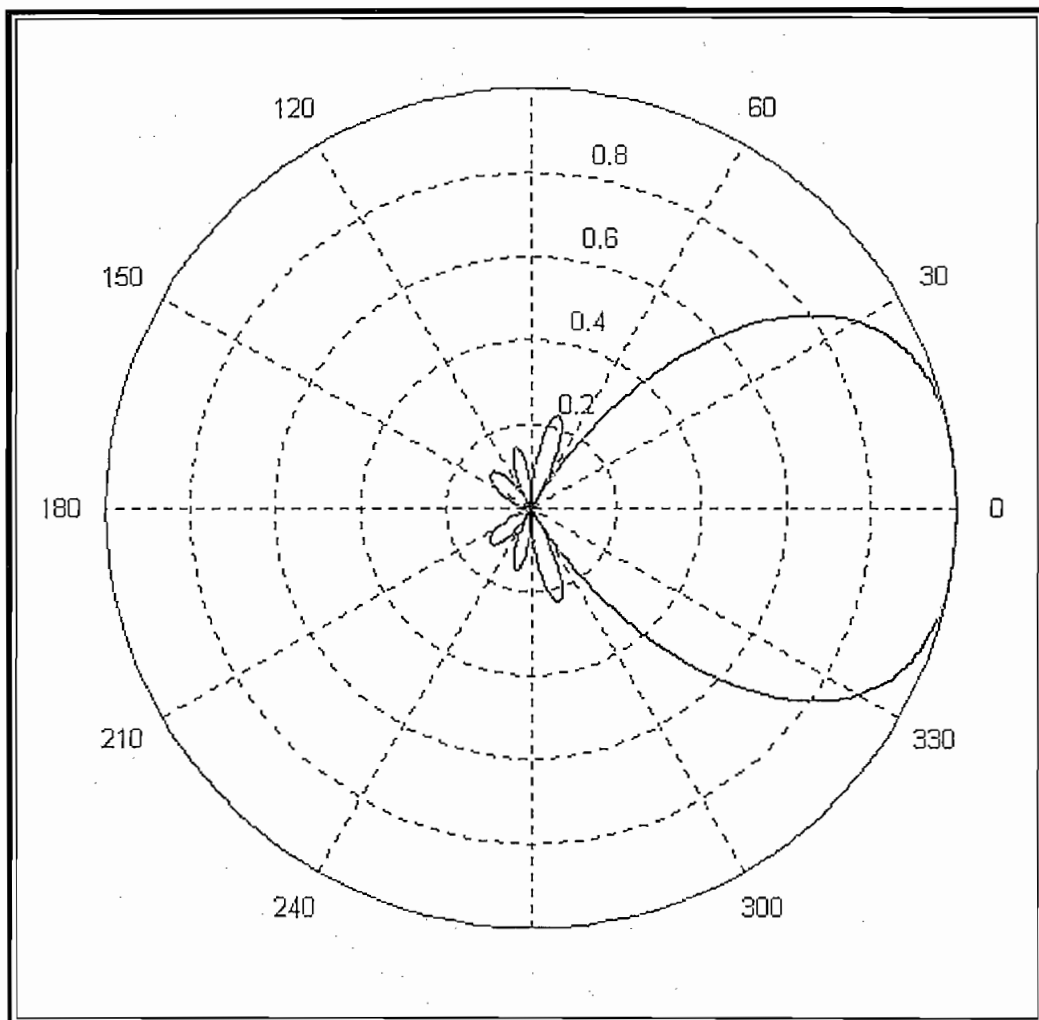
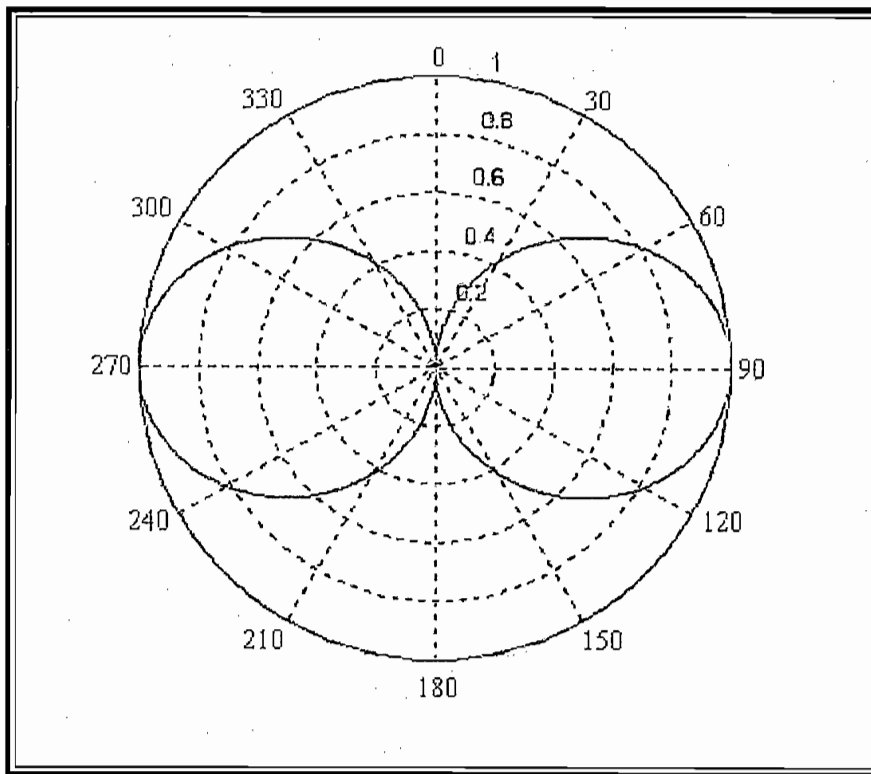


Fig. 3.19 Diagrama de radiación del arreglo de ocho elementos isotrópicos.

#### 3.10.4.2 Dipolo de onda completa.

Utilizando las ecuaciones de radiación de una antena dipolo (ver Capítulo 1), podemos determinar la ecuación del campo de radiación de dicho elemento y a través de él obtener el diagrama de radiación de una antena de esta naturaleza (figura 3.20).

$$E_{\theta} = K \left[ \frac{\cos(\pi \cos \theta) + 1}{\sin \theta} \right] \quad (25)$$



*Fig. 3.20 Lóbulo de radiación de una antena dipolo de onda completa.*

### 3.10.4.3 Diagrama de radiación del arreglo de antenas dipolo

Con la teoría de multiplicación de diagramas (ver Capítulo 1), podemos obtener teóricamente el lóbulo de radiación correspondiente al arreglo de 8 antenas dipolos. Como ya se mencionó, el diagrama resultante está dado por el área común entre los dos gráficos anteriormente mostrados.

El diagrama resultante presenta una forma ideal de radiación, con una cobertura bastante aceptable y una muy evidente directividad, características necesarias no solo dentro del contexto de telefonía celular, sino también en todos los ambientes de radiación, en especial en un ambiente de antena inteligente.

Teoría Básica para el Diseño de las Antenas Inteligentes

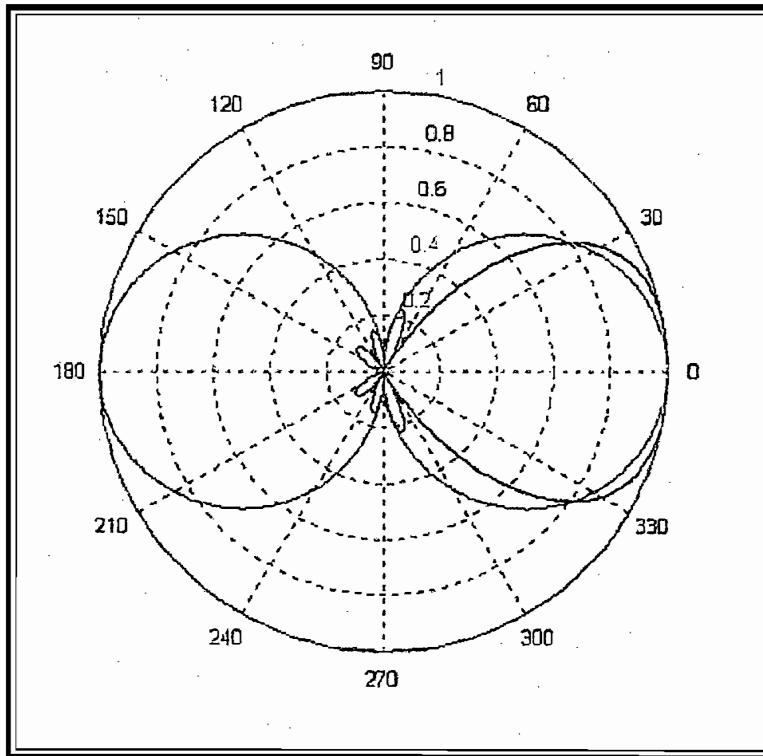


Fig. 3.21 Multiplicación de diagramas.

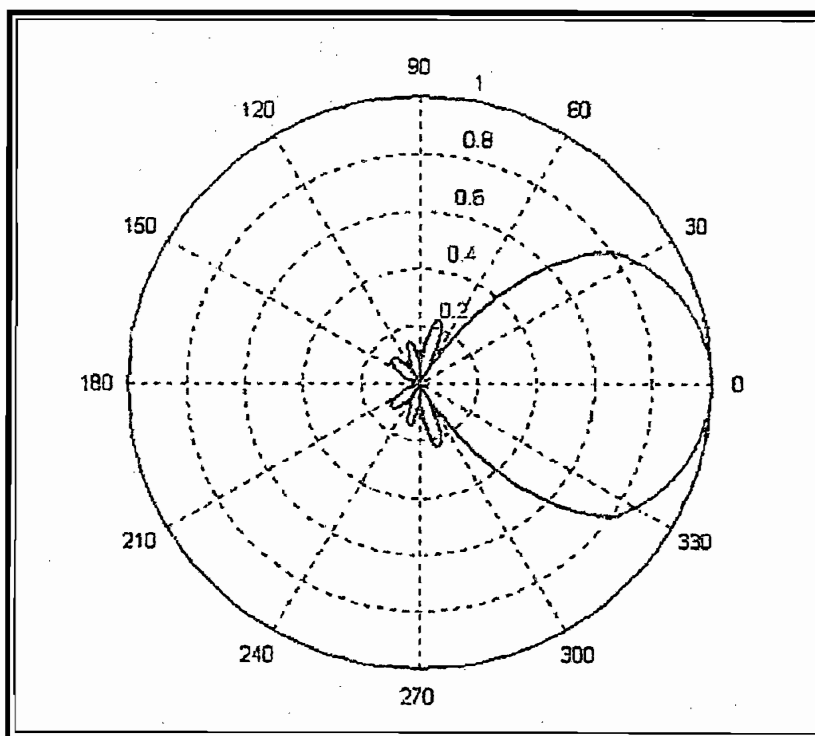


Fig. 3.22 Diagrama de radiación del arreglo de antenas.



### **3.10.5 INTELIGENCIA DE LA ANTENA**

Hasta el momento, el diseño de la antena inteligente se ha limitado únicamente al diseño del arreglo de antenas (8 elementos). En este punto, la antena o el arreglo de antenas no tiene nada de inteligencia; a lo largo de todo el estudio de antenas inteligentes, se ha dicho que la inteligencia de las mismas radica en el procesamiento de la señal y en los algoritmos adaptativos utilizados, más no el arreglo propiamente. Entonces para obtener de una antena los lóbulos de radiación con haces dirigidos, necesitamos no solo del arreglo de antenas sino de un sistema de antena inteligente que desarrolle todo este proceso.

En base a todo lo estudiado hasta este punto, a continuación se presenta una estructura completa y general de cómo estaría constituido un sistema de antena inteligente.

Como se mencionó en la teoría, este sistema de antena inteligente, estará constituido por cuatro unidades básicas y principales:

#### **3.10.5.1 Unidad de antena**

Que consiste en un conjunto de elementos radiantes o un arreglo de antenas y duplexores (para el ejemplo: el arreglo de antenas podría estar constituido, como es el caso, de 8 elementos con doble polarización  $\pm 45^\circ$  y una cobertura de  $120^\circ$  aproximadamente; sin embargo y debido a que se trata de una antena para una área sectorizada, la estación base deberá tener tres de estas antenas).

#### **3.10.5.2 Unidad de radio**

Las componentes que integran esta unidad son: amplificadores, conversores de frecuencia, filtros, amplificadores de potencia y convertidores A/D y D/A, amplificadores de bajo ruido en recepción, redes combinadoras en transmisión y divisoras en recepción.

### **3.10.5.3 Unidad de procesamiento de la señal**

Procesos digitales asociados a la conformación del diagrama de radiación de la antena, tanto en transmisión como en recepción.

Aquí es donde se introducen los algoritmos adaptativos de conformación del haz de referencia temporal (LMS, RLS). Se hace un control, optimización de los recursos (potencia, SIR) y se trabaja con el vector de pesos de cada haz.

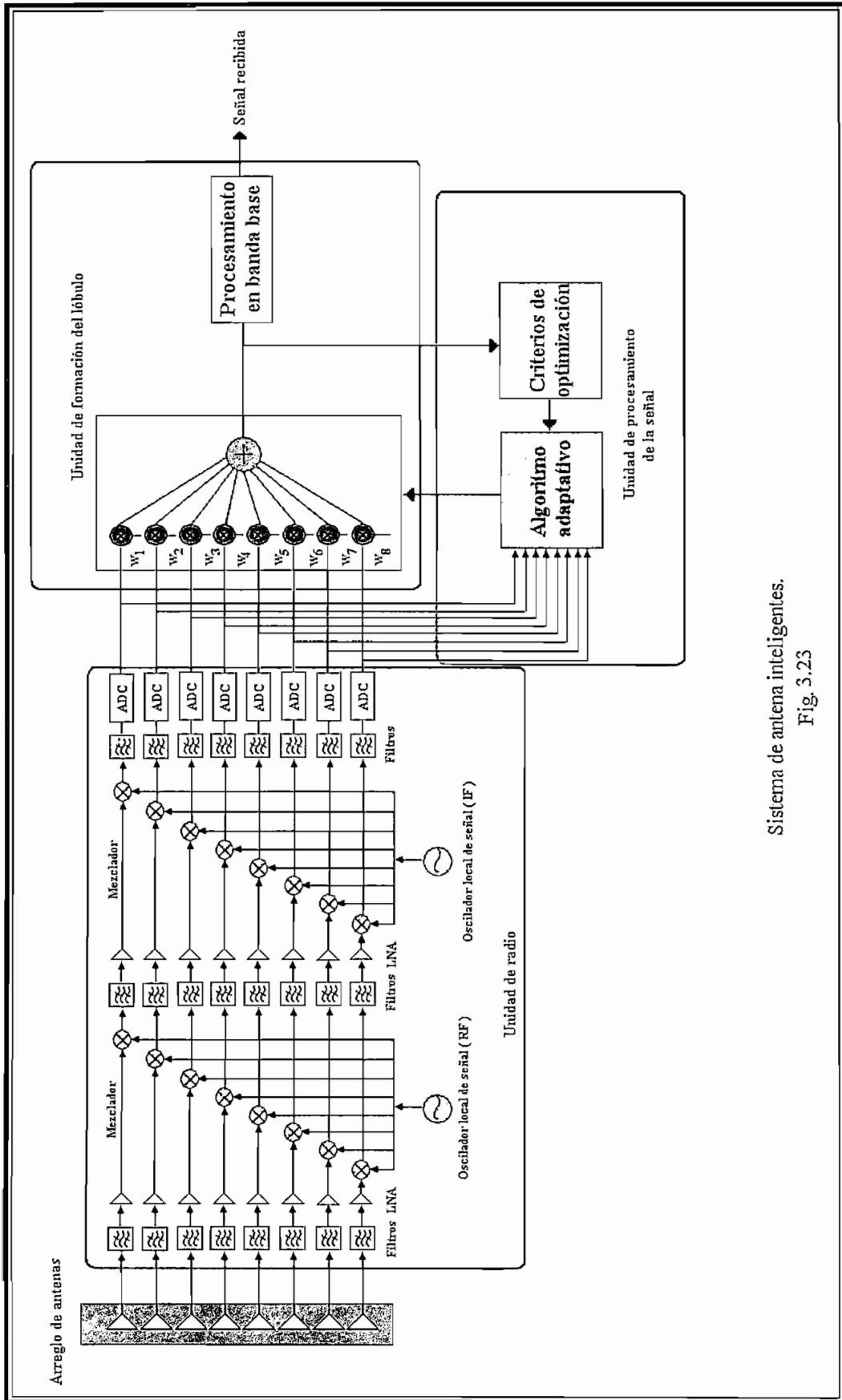
### **3.10.5.4 Unidad de formación del lóbulo**

Esta unidad estará constituida por moduladores y demoduladores, receptor del canal ecualizador/RAKE, filtro de espacio-temporal, procesos de separación de canales, codificación y decodificación asociados a los procesos de transmisión y recepción digitales.

Todas estas partes mencionadas constituyen un sistema de antena inteligente y su estructura es similar tanto en recepción como en transmisión de las señales.

En la figura 3.23 se muestra la estructura de un sistema de antena inteligente.

Ahora si se puede decir que la antena es inteligente, puesto que se añadió al diseño el procesamiento de la señal. El diagrama de radiación de la antena inteligente tendrá ahora varios lóbulos dirigidos hacia los usuarios (figura 3.24), la forma que estos lóbulos presentarán son de haces estrechos en las direcciones de los usuarios o de la señal deseada con mayor alcance y menor interferencia.



Sistema de antena inteligentes.  
Fig. 3.23

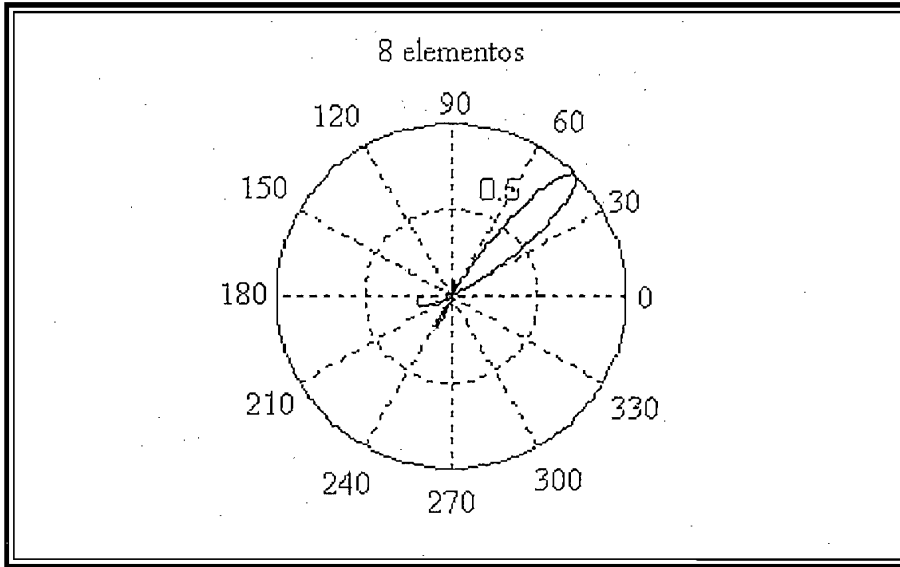


Fig. 3.24 Patrón de radiación del arreglo lineal de antenas.

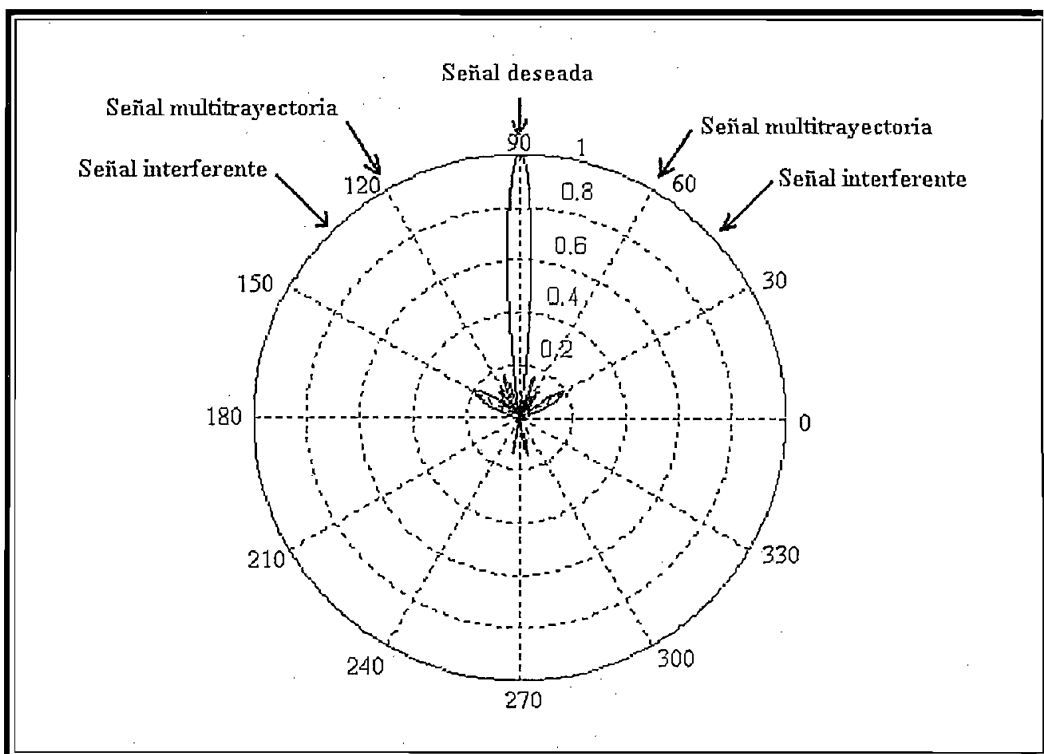


Fig. 3.25 Factor del arreglo para un arreglo lineal de ocho elementos.

\* Más ejemplos de patrones de radiación de arreglos de antenas, ver anexo B.

Los algoritmos a utilizar (sean estos adaptativos o de DoA) y su complejidad dependerán en gran manera del nivel de inteligencia que se le quiera dar al sistema (por ejemplo: con haz conmutado o haz de seguimiento, pues estos requieren menor número de procesos computacionales y algoritmos no tan complejos), de las exigencia requeridas (potencia, reuso, SIR), del modo cómo se lo quiera implementar (HSR, SFIR o SDMA) y en función del grado de aprovechamiento. La figura 3.26 muestra la forma, en teoría, que tendría el diagrama de radiación de una antena inteligente en funcionamiento de acuerdo a los parámetros de diseño antes expuestos.

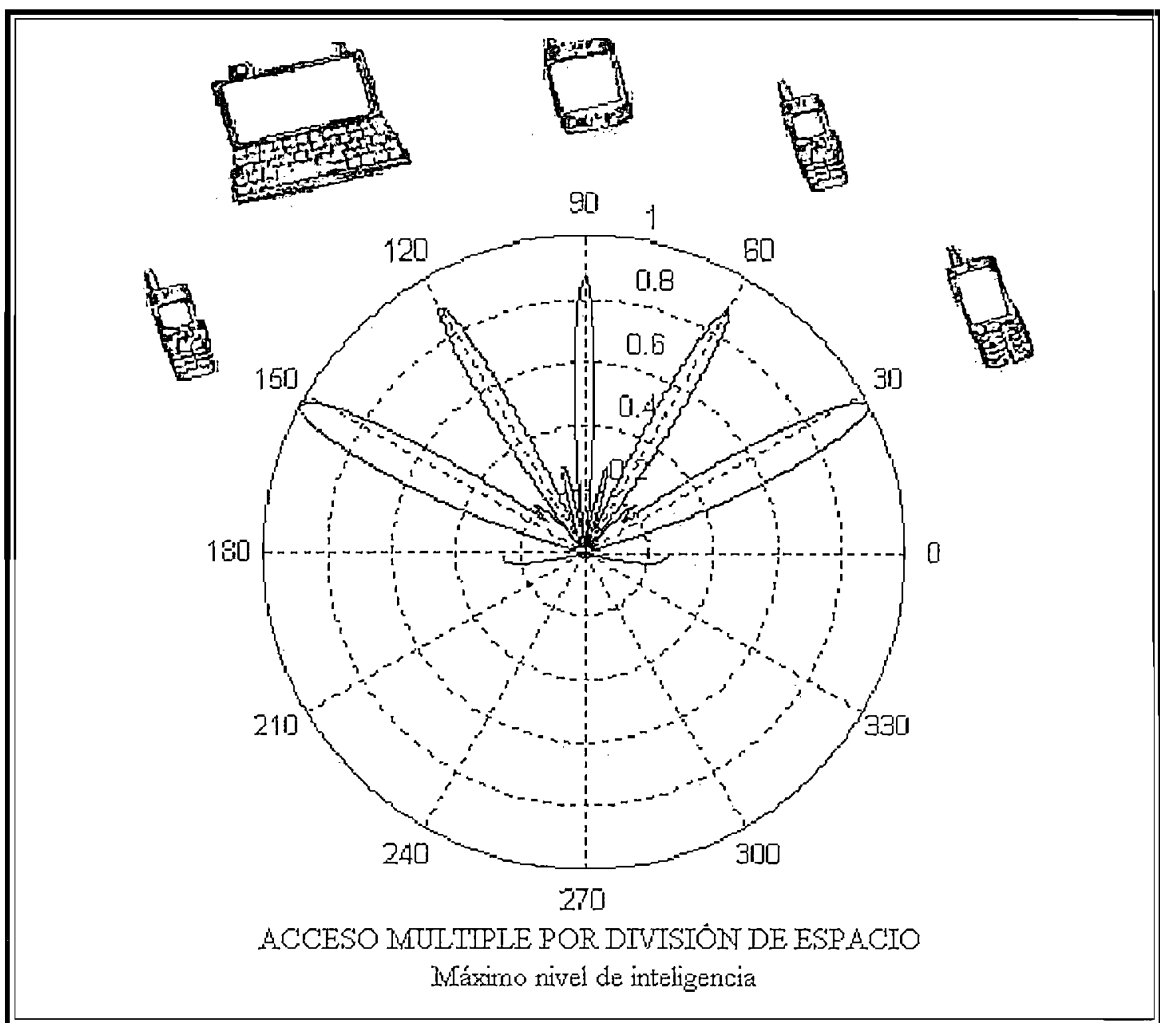


Fig. 3.26 Diagrama de radiación de la antena en funcionamiento.

Considerando, que la antena en estudio es parte de un sistema de antenas con cobertura sectorizada, la estructura total del sistema de antenas quedará determinada como se muestra en la siguiente figura.

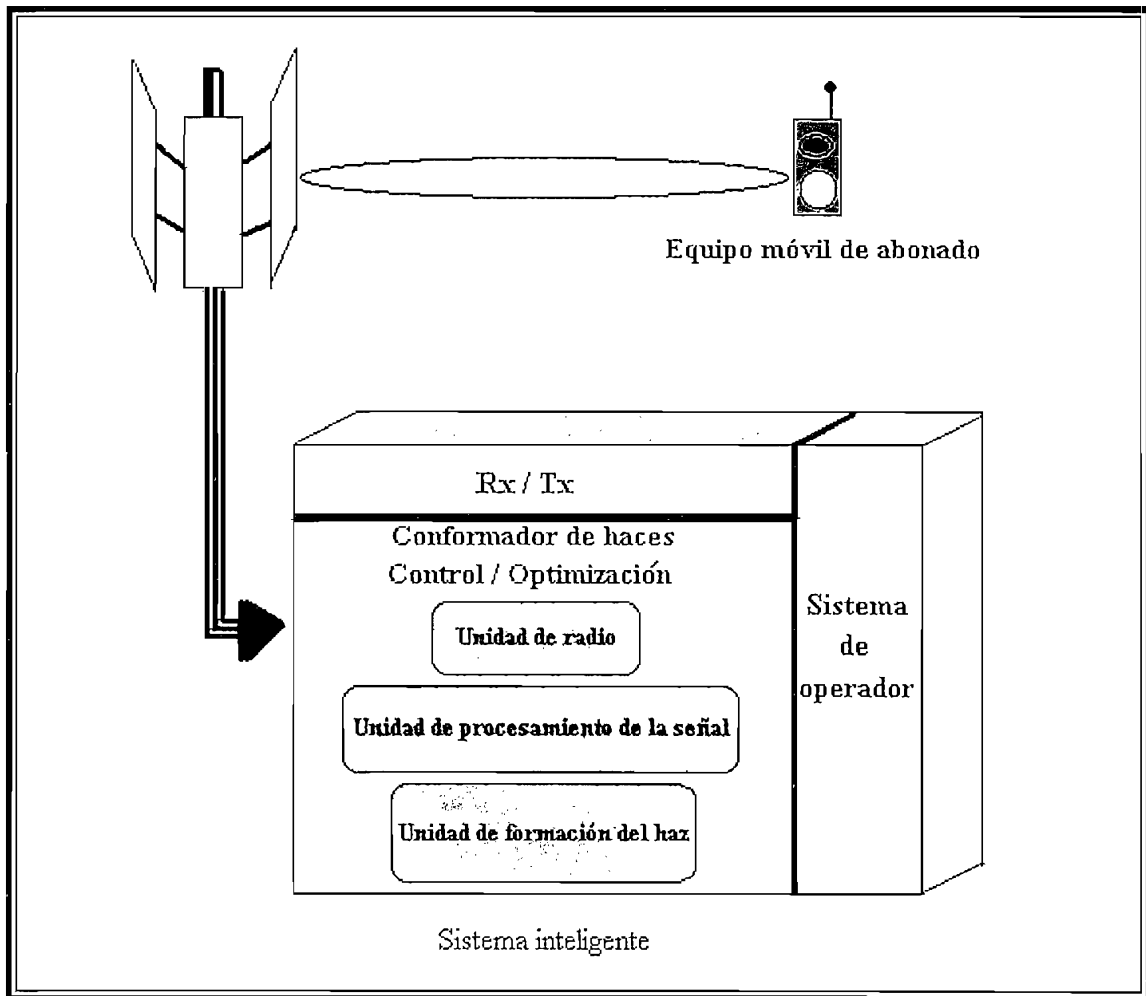


Fig. 3.27 Estructura de la estación base en función de la antena diseñada

## 3.11 COSTOS

### 3.11.1 PERSPECTIVA CUALITATIVA

A la hora de desplegar una red o nuevas estaciones base, existen dos tipos de costos que hay que tomar en cuenta:

- Costos de los componentes de la estación base (BTS) en sí (hardware + software)
- Costos de despliegue: Adquisición de emplazamiento, costos de edificio, torre e instalación, etc.

El primero incluye, a groso modo, el costo de las fuentes de alimentación, las antenas y el cableado correspondiente, los componentes de radiofrecuencia, los amplificadores de potencia, el hardware y software de procesamiento. El costo de los componentes del sistema de antenas inteligentes en sí se estima en alrededor del 70% del costo de los componentes de una estación base convencional, con lo que el costo total de componentes necesario para que funcione dicho sistema (sistema plug & play) es 1.7 veces el costo de componentes de una BTS convencional.

Sin embargo, debido a la mayor cobertura proporcionada por las antenas inteligentes y a la consiguiente reducción del número de celdas necesarias para alcanzar un determinado nivel de servicio, el costo de despliegue de una red basada en antenas inteligentes es mucho menor que el de una red convencional. Así, aunque el costo de componentes necesarios para implantar este sistema es superior al de los sistemas convencionales, puesto que requiere equipos más complejos, el costo total del sistema se reduce en más de un 50% (figura 3.28), debido a que al reducir el número de celdas hay menores costos fijos (adquisición de emplazamiento, alimentación del sistema, despliegue,...) y de mantenimiento.

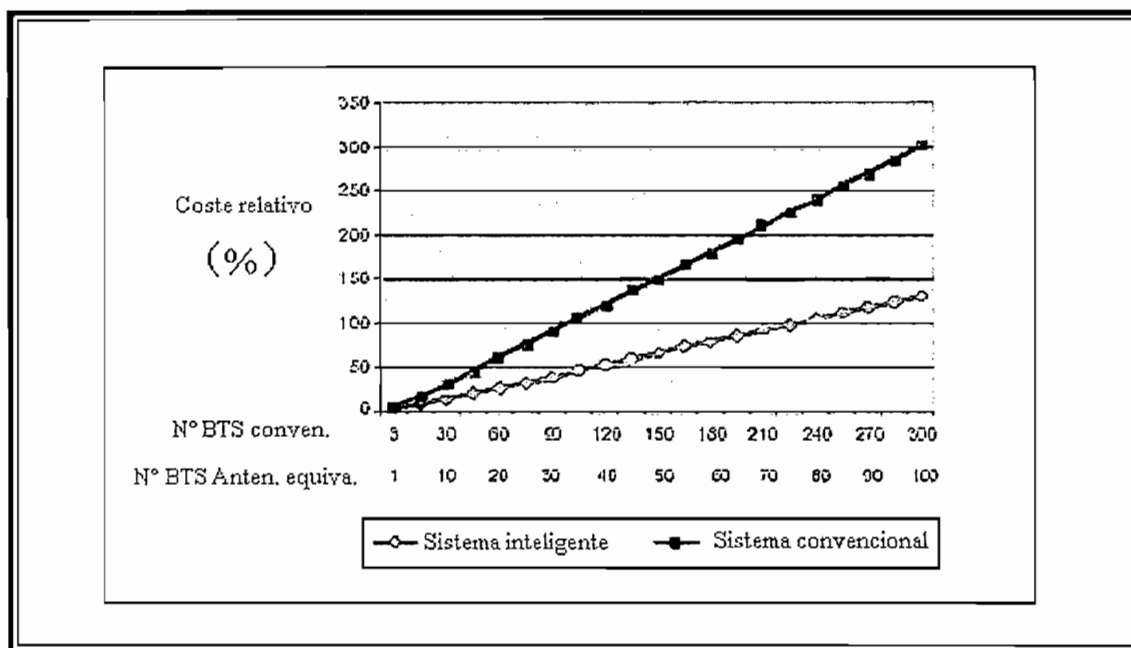
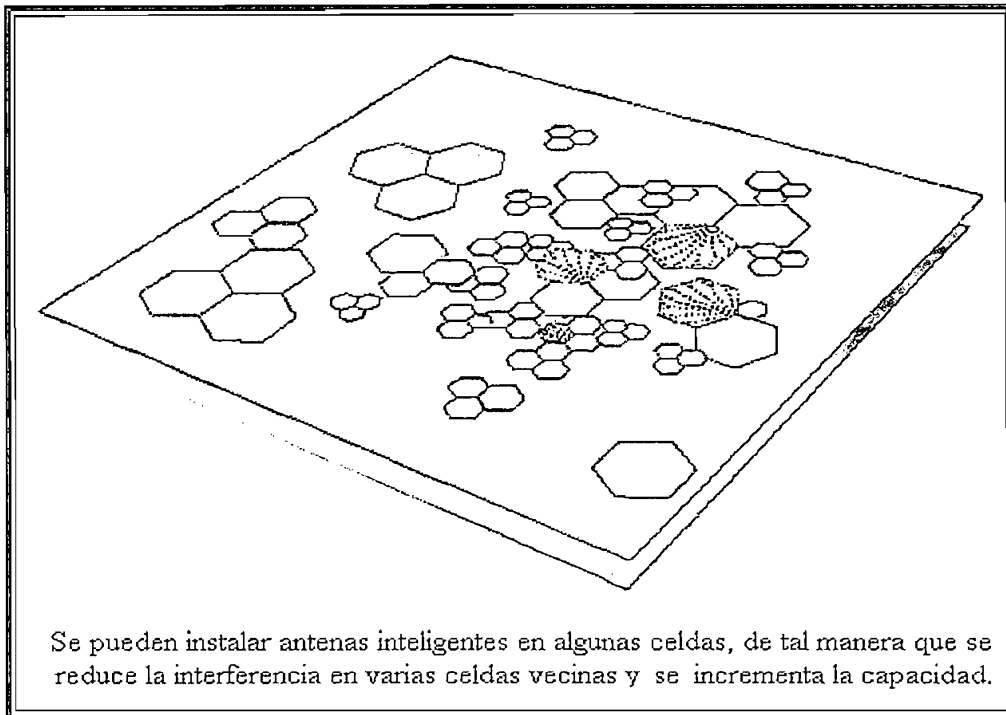


Fig. 3.28 Costos del despliegue de la red.

No obstante, el costo de implementar una solución de antena adaptativa depende de la complejidad de la solución, la facilidad de implementación deseada, del nivel de calidad de red perseguido y del incremento de capacidad deseado. Las compañías pioneras en esta tecnología sugieren que es factible una migración rentable y realizada paso a paso de una solución de antena convencional a otra basada en antenas inteligentes. Incluso se ha informado que podían incrementarse la calidad general de las redes con sólo instalar unas pocas estaciones base con antenas adaptativas (figura 3.29).

Se prevé que la mayoría de los operadores abordarán la migración siguiendo un procedimiento de paso a paso, puesto que obrando así el cambio es mucho más manejable y efectivo en cuanto a costos. La mayor parte de las redes celulares actuales se componen de una mezcla de macroceldas y microceldas.





*Fig. 3.29 Estrategia de migración.*

### 3.11.2 PERSPECTIVA CUANTITATIVA

Ya en números y de acuerdo a investigaciones realizadas, es conocido que, la implementación de las estaciones base inteligentes costarían aproximadamente el 70% del costo de las estaciones base convencionales, otras investigaciones, contemplan un ahorro del 30 al 50% en costo de las nuevas estaciones base.

A continuación se muestran una tabla con los costos reales tanto de los componentes de las BTS como los de despliegue de las redes que demanda las estaciones base actuales (en términos generales), y en función de estos datos se podrán dar valor aproximados del costo de una estación base inteligente y por ende de las antenas inteligentes.

<b>COSTOS DE UNA ESTACIÓN BASE CONVENCIONAL</b>			
<b>Razón</b>	<b>Costos unitarios (dólares)</b>	<b>Unidades</b>	<b>Costos totales (dólares)</b>
<b>Transmisor</b>	25.000	1	25.000
<b>Receptor</b>	25.000	1	25.000
<b>Antenas convencionales</b>	3.500	12	42.000
<b>Estructura (caseta)</b>	15.000	1	15.000
<b>Cables y conectores</b>	3.000	-----	3.000
<b>Mano de obra</b>	1.500	-----	1.500
<b>Costos totales</b>			<b>111.500</b>

*Tabla 3.3 Costos de una estación base.*

En la implementación de los sistemas de antena inteligente estos costos se reducirán en un 30 % (por generalizar) es decir, si una estación base convencional cuesta aproximadamente 111.500 dólares, el costo de implementación de una estación base inteligente será, también, aproximadamente de 78.000 dólares (costo total 185.500 dólares); si ha esto sumamos el hecho de que la tecnología de antenas inteligentes puede ser implementada en las mismas estructuras de las antenas convencionales, el porcentaje de ahorro puede aumentar mucho más y por ende el costo de implementación de las antenas inteligentes se reduce (todos estos costos han sido obtenidos en función de los especificados para una estación base convencional con datos generales, no puntualizando ninguna tecnología de acceso).

Para ilustrar un poco mas esta posible realidad, se puede tomar como ejemplo el costo de una estación base para TDMA que cuesta aproximadamente 80.000

dólares, con la utilización de la tecnología inteligente la misma puede costar entre 120.000 y 136.000 dólares, con la correspondiente reducción de BTS (3 o 4 veces menos) .

Para una estación base de CDMA, el costo aproximado esta establecido en 300.000 dólares, con la aplicación de los sistemas inteligente en este tipo de estaciones; sus costos quedarían establecidos en un rango entre 450.000 y 510.000 dólares, aproximadamente. Como se puede ver, las estaciones base con antena inteligentes son mas costosas, pero la ventaja económica radica en la reducción del número de estaciones base, lo que significa un ahorro del 50% del costo de una red y si a esto sumamos el incremento de la capacidad, se puede concluir que dichas redes así constituidas serán mucho más rentables que las redes actuales.

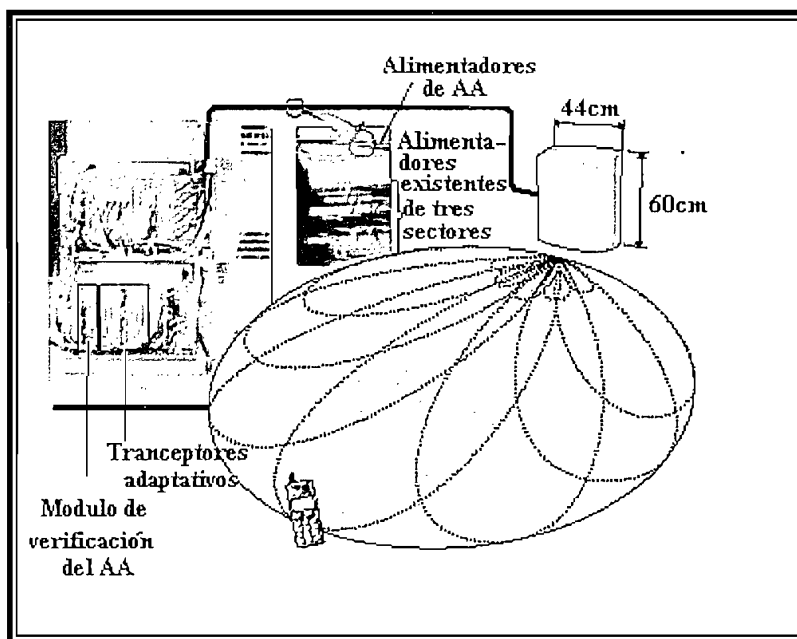


Fig. 3.30 Equipo simulador de una antena inteligente.

# CAPITULO 4

## Aplicaciones

## CAPÍTULO 4

### APLICACIONES Y FUTURAS TENDENCIAS

En el campo de las comunicaciones inalámbricas se ha experimentado un crecimiento de forma vertiginosa, lo que ha acelerado los avances tecnológicos con los que hoy en día se cuentan.

El aprovechamiento del espectro radioeléctrico, es la principal preocupación de los investigadores, que más de un dolor de cabeza han tenido, para obtener el máximo rendimiento del espectro.

Es así, que dentro de algunas investigaciones crece la idea de utilizar algunas técnicas de acceso combinadas con las antenas inteligentes, la unión de algunas de ellas ha servido para solucionar el problema del uso del espectro.

Varias son las maneras de incrementar la capacidad en una red celular, entre ellas el salto de frecuencia, el aumento de potencia, el uso de microceldas y la introducción de antenas inteligentes en las estaciones bases. Las antenas inteligentes han sido de gran interés durante los últimos años y varios fabricantes y operadores han visto como solución investigar y realizar algunos ensayos prácticos para poder obtener su máximo potencial.

Las principales conclusiones obtenidas de los estudios indican que las antenas inteligentes vendrían a ser el eslabón faltante dentro de las comunicaciones inalámbricas, puesto que junto a otras tecnologías permitirá solucionar diversos problemas (inseguridad, capacidad limitada, infraestructura, etc.).

Diversos sistemas como son: de internet, de seguridad, de estaciones base inteligentes y principalmente los sistemas de la telefonía móvil, vendrán a ser beneficiadas con la introducción de las antenas inteligentes en los mercados mundiales.

Por esta razón, las antenas inteligentes serán el complemento de múltiples tecnologías presentes y futuras, todo dependerá de las aplicaciones que la imaginación del hombre pueda darles.

#### **4.1 ANTENAS INTELIGENTES Y SDMA**

El uso de arreglos de antenas inteligentes permite el acceso a SDMA por discriminación en espacio.

Usualmente, las técnicas de antenas inteligentes tienen como principal objetivo el aumento de la capacidad de los sistemas (eficiencia espectral) y deben ser aprovechados junto con convenientes estrategias de red para obtener una mejora de la sensibilidad en recepción – HSR – (el aumento de capacidad se obtendrá a partir de un aumento en la cobertura), el filtrado espacial para rechazo de interferencias – SFIR – (se gana en capacidad mediante un plan de frecuencias ajustado) o el acceso múltiple por división espacial – SDMA – (varios usuarios pueden compartir portadora y hendiduras temporales dentro de la misma célula).

En la práctica, el uso de cualquiera de las estrategias afecta de alguna manera al algoritmo de antenas inteligentes utilizado. La tendencia actual es la de separar explícitamente la ganancia obtenida en el nivel de enlace (medida en probabilidad de error frente a niveles de señal/interferencia) de la ganancia obtenida gracias a la aplicación de estrategias de red como control de potencia, transmisión discontinua o saltos de frecuencia (medida en términos de eficiencia espectral).

Las ganancias finales en eficiencia espectral se obtienen mediante convenientes mapeados que permiten reducir, de paso, la complejidad en la simulación para este tipo de sistemas.

El aumento de estándares en comunicaciones móviles hace inevitable el desarrollo de esquemas de conformación que se puedan adaptar vía software a diferentes técnicas de modulación y de acceso.

## **4.2 ANTENAS INTELIGENTES Y LOS SISTEMAS WISPER**

Otro sistema innovador y popular, Wisper<sup>1</sup>, es un revolucionario sistema que rompe todos los patrones físicos. Utiliza tecnología S-CDMA, antenas inteligentes, anulación de interferencia y frecuencias privadas.

Los beneficios del Wisper son: Instalación inmediata, portabilidad, estabilidad, versatilidad, banda ancha, manejo centralizado y calidad de servicios de voz, video, etc.

Las antenas inteligentes que utiliza Wisper tienen un moderno funcionamiento: buscan la vía más rápida para transmitir la señal entre casas y edificios, la señal rebota entre estos medios y una vez que encuentra el camino para transmitirla, se lo aprende usando medios matemáticos para transmitir la señal con mayor rapidez la próxima vez.

## **4.3 APLICACIONES DE ANTENAS INTELIGENTES EN LOS UMTS.**

El UMTS es una tecnológica futura, pero a pesar de ello, sé podría tener una idea del efecto que las antenas inteligentes harían sobre estos sistemas e incluso se puede describir una posible implementación de dicho sistema. En primera instancia hay que recordar que, de las tres posibles configuraciones del sistema que pueden ser aplicadas en la telefonía móvil (HSR – Receptor de alta sensibilidad –, SFIR – Rechazo a la interferencia por filtrado espacial – y SDMA – Acceso múltiple por división espacial –), la menos recomendable en un sistema CDMA es precisamente la configuración SDMA.

---

*1Más información sobre la tecnología Wisper, ver el anexo C.*

En efecto, dentro de una red UMTS el número de usuarios, utilizando las mismas frecuencias y al mismo tiempo, será muy alto, de tal manera que los mismos 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 SFRI, es claro que la más beneficiosa es esta última, dado que ella realmente puede proporcionar un aumento en la capacidad del sistema por la mejora en la C/I (sumando a ello las mejoras en calidad, seguridad, reducción de la interferencia, optimización de la potencia, etc, características del uso de antenas inteligentes).

La configuración SFRI puede implementarse con cualquiera de los tres esquemas de antenas (haz conmutable, haz de seguimiento o haz adaptativo). No obstante, las presentaciones conseguidas con los esquemas de haz conmutado y haz de seguimiento son muy inferiores a las que se lograrían utilizando arreglos adaptativos. Es más, dado que los UMTS radican su funcionamiento en el uso de los receptores RAKE para así aprovechar la diversidad de multitrayectoria, son más interesantes las soluciones basadas en haces adaptativos, debido a que sería posible recibir las componentes de multitrayectoria a través de los lóbulos secundarios del haz sintetizado para cada usuario.

En el caso de haces conmutados o de seguimiento, esto es más complejo, ya que sería necesario generar un haz distinto para extraer cada componente multitrayecto de cada usuario y enviarla al receptor RAKE correspondiente (básicamente, esta es la estrategia utilizada en los llamados receptores RAKE, los mismos que también pueden implementarse con haces adaptativos, aprovechando así la diversidad ofrecida por los multitrayectos incorrelados con la señal deseada).

La elección del mejor algoritmo que gobierne la conformación de los haces depende mucho de las características que se le quiera dar al sistema, tratando



siempre de hallar un equilibrio entre las mejoras que se pretendan obtener y la complejidad añadida. Debe tomarse en cuenta que un requisito imprescindible en el diseño del sistema es su funcionamiento en tiempo real, por lo que no son recomendables algoritmos que requieran de alta carga computacional en los procesadores. En función de este requerimiento la solución más óptima recae en la utilización de algoritmos adaptativos, ya que una vez inicializados, solo requieren cálculos de menor importancia para ir actualizando la conformación del haz.

Al ser UMTS un sistema CDMA hace uso de códigos de scrambling, los cuales pueden muy bien utilizarse como secuencias de entrenamiento en algoritmos con referencia temporal. Teniendo en cuenta que la modulación empleada en los canales dedicados es QPSK<sup>2</sup>, el algoritmo que se utilice puede mejorarse si se basa de alguna manera en la técnica CMA (Algoritmo de módulo constante). Por ejemplo, para CDMA se tienen varios algoritmos, dentro de los cuales el más avanzado es un algoritmo de detección de multiusuario basado en LS y CMA y que emplea los códigos de scrambling como referencia (LS-DRMTCMA, "Least Squares De-spread Re-spread Multitarget Constant Modulus Algorithm").

Además, en el modo FDD de UMTS, si se desea hacer conformación del haz también en el enlace descendente, será necesario utilizar como se ha dicho, algoritmos de detección de la DoA de los usuarios.

En este caso, ya que se han calculado las DoAs, podrían utilizarse estas como apoyo a los algoritmos adaptativos del enlace ascendente. En cambio, en el modo TDD, puede utilizarse para conformación del haz en el enlace descendente los mismos pesos que se hayan utilizado en el ascendente.

Varias son las simulaciones realizadas con sistemas de antenas inteligentes en entornos UMTS; se puede citar por ejemplo:

La simulación realizada en un entorno con usuarios de alta movilidad y utilizando ciertos modelos de canal caracterizados tanto en el dominio temporal como en el angular.

---

<sup>2</sup> Modulación QPSK, ver el anexo C.

También se han simulado el uso tanto de antenas de lóbulos conmutados (4 antenas de 30° por sector) como antenas adaptativas (de 10 y 12 elementos, utilizando el algoritmo LS).

En ambos casos se demuestra una mejora evidente tanto en la C/I como en la SNRI, sobre todo cuando el número de usuarios en la red es elevado.

#### **4.3.1 PROCEDIMIENTOS AFECTADOS**

Algunos de los procedimientos de las capas inferiores de UMTS pueden verse modificados en parte, debido a la utilización de estaciones base con antenas inteligentes. Se pueden mencionar algunos de los procedimientos que se verían afectados por la utilización de antenas inteligentes:

##### **4.3.1.1 Sincronización y búsqueda de celdas**

La sincronización y la búsqueda de celdas, en principio, no deberían verse especialmente modificados, ya que se realizan a través de los canales de difusión, acceso aleatorio,..etc., que son los que se seguirán transmitiendo a través de antenas convencionales.

Lo mismo podría decirse del procedimiento de reelección de celdas, ya que también se realiza cuando el móvil se encuentra en modo de espera.

##### **4.3.1.2 Control de potencia**

El uso de antenas inteligentes debería mejorar la prestación del control de potencia, ya que se debería conseguir una reducción en la potencia transmitida por ambas partes (operadora y usuario). No obstante, el algoritmo en si no debería verse afectado en exceso, ya que se basa en medidas que se hacen sobre la potencia recibida.

#### **4.3.1.3 Establecimiento de llamadas**

El establecimiento de llamadas comenzaría como es habitual, cuando el móvil hace uso del canal de acceso aleatorio para solicitar el establecimiento de una comunicación.

En este momento, el Nodo B podría utilizar estas señales que recibe para estimar la DoA de este usuario, de tal modo que podría generar un diagrama de radiación apuntando hacia él. Este diagrama debidamente modificado en cada trama, será utilizado por el canal dedicado durante toda la llamada.

#### **4.3.1.4 Diversidad**

Habría que estudiar en detalle la compatibilidad de los distintos procedimientos de diversidad con un sistema de antena inteligente.

Probablemente, el procedimiento de diversidad de transmisión y el empleo de diversidad de recepción serán menos decisivos.

#### **4.3.1.5 Localización**

La localización de terminales podría mejorar si se emplea la información de la dirección de apuntamiento de las antenas.

Esta información no esta siempre disponible (si no se hace cálculo de la DoA, habría que acudir directamente a los pesos aplicados a las salidas del arreglo para obtener la dirección de apuntamiento).

Además, esta información podría dar lugar a conclusiones incorrectas en el caso de que no exista línea de vista entre el móvil y la base, pues en este caso la comunicación puede darse mediante rayos reflejados y la antena apunta a las direcciones en las que llegan estos rayos.

#### 4.3.1.6 Llamadas

Como se ha mencionado, durante una llamada de voz sé esta ocupando un canal dedicado bidireccional, el cual puede ser transmitido y recibido mediante una antena inteligente. Es aquí donde los algoritmos de conformación del haz y de detección de las DoAs deben ejecutarse con total precisión para que la llamada prospere.

#### 4.3.1.7 Handover

Probablemente el handover, sea el procedimiento mas afectado por el uso de antenas inteligentes. En efecto, supongamos que un móvil esta siendo enfocado por el haz directivo de una estación base (es decir, esta en mitad de una llamada) y, en un momento dado, necesita cambiar de celdas. Si la nueva estación base también esta dotada de una antena inteligente, en primer lugar y a partir de los mensajes que se intercambien con el móvil, tendrá que evaluar su DoA. Una vez conocida ésta, podrá generar el diagrama de radiación adecuado para apuntar al móvil.

En el caso de que se implemente soft handover en la red, el procedimiento será más sencillo; durante la llamada el móvil se encuentra enfocado por las antenas de dos o mas estaciones base simultáneamente, de modo que el cambio de una celda a otra es inmediato.

### 4.4 ANTENAS INTELIGENTES Y LAS REDES Wi-Fi

Wi-Fi es el más popular de los estándares LAN inalámbricos. Más que ofrecer plena movilidad de las redes móviles, estas tecnologías de redes inalámbricas permiten internet sin hilos cuando el usuario está temporalmente en una posición fija y permite velocidades de hasta 11MB por segundo.

Uno de los problemas más complejos y característicos de las redes inalámbricas suele ser que cada usuario la experimenta de manera diferente a pesar de usar el mismo proveedor y dispositivo. Mientras algunos de los usuarios alcanzan

velocidades muy altas, otros usuarios, a corta distancia y utilizando las mismas redes, no llegan a alcanzar ni la mitad de la velocidad. Una solución al problema es la utilización de las antenas inteligentes que se adaptan al tráfico existente en la red para ofrecer mejor servicio y confiabilidad. Las antenas inteligentes en las redes Wi-Fi cuadruplican la calidad del servicio y el desempeño de las redes en general, pueden incrementar la distancia de conexión, evitar los puntos muertos y ofrecer velocidades de transmisión más rápidas consumiendo menor energía.

Las "antenas inteligentes" y Wi-Fi son otras tecnologías que permiten un acceso inalámbrico a Internet más barato.

#### **4.5 SISTEMA DE ESTACIÓN BASE INTELIGENTE (SEBI)**

SEBI es un sistema tecnológicamente muy innovador, sus primeros pasos han recaído en Europa y en España, teniendo un importante efecto en la comunidad científica internacional. El proyecto, comenzó en el año 2001, en él participan las empresas Sistemas Radiantes F. Moyano, S.A. y Dyctel, S.A. (ambas pertenecientes a Dragados Sistemas), conjuntamente en colaboración con los departamentos de Sistemas, Señales y Radiofrecuencia (SSR) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) y de la Universidad Carlos III (UCIIM).

Socialmente tiene los beneficios de la disminución notable del impacto ambiental, unido a la racionalización del consumo energético, que propicia una menor exposición de la población a las emisiones radioeléctricas, incluso creando nulos o campos de radiación mínimos donde se desee (escuelas, colegios, parques, universidades, hospitales, etc.).

El proyecto SEBI (Sistema de Estación Base Inteligente) consiste en el diseño de una estación base de telefonía móvil que, basándose en nuevas tecnologías de antenas inteligentes de tipo adaptativo, multiplexación y software de radio, ofrece a los operadores la posibilidad de compartir infraestructuras, multiplicando la capacidad de las redes, optimizando la calidad de servicio (QoS), ahorrando energía y mejorando notablemente el impacto ambiental.

Mientras que las estaciones base convencionales radian energía siempre y de forma omnidireccional, con SEBI, al hacer uso de antenas inteligentes adaptativas, la señal se envía directamente a cada usuario, creando "rayos" individualizados y que sólo existen cuando se requiere el servicio, consiguiéndose de esta manera, un considerable ahorro energético y por ende, minimizándose la exposición a radiaciones por parte de la población.

El software de radio permite la utilización compartida de la estación por diferentes estándares de telefonía, como GSM, DCS, AMPS, PCS y UMTS, un aspecto que traerá consigo un progresivo descenso del número de estaciones base necesarias con la correspondiente mejora de los impactos ambientales y visuales causados por éstas. La multiplexación permite la utilización compartida de la estación por diferentes operadores, por este motivo, el SEBI permitirá la disminución, de forma notable, de la inversión requerida para el despliegue de las estaciones.

Sectorialmente, y en particular para los operadores e infraestructuras de red, el proyecto ofrece la posibilidad de compartir y disminuir el número de estaciones base requeridas – esto ya mencionado – para ofrecer un determinado nivel de servicio, así como aumentar la capacidad de las redes, lo que nos lleva a considerables ahorros económicos en las inversiones necesarias.

En definitiva, es un nuevo concepto de red, que dota a los operadores de gran flexibilidad y posibilidades de explotación.

#### **4.5.1 MARCO CIENTÍFICO-TÉCNICO DEL PROYECTO SEBI**

El Proyecto SEBI se enmarca en un complejo escenario que tiene como protagonistas por un lado, las radiaciones electromagnéticas y la calidad medioambiental, y por otro la relación eficacia/costo para los operadores de red, a ello se suma la crisis económica mundial, la incertidumbre ante el UMTS y sus contenidos, y las fuertes inversiones realizadas en red y licencias, que provocan una necesidad de abaratar costos a través de la compartición de infraestructuras. Sin embargo a pesar de esto, SEBI ofrece una respuesta integradora de soluciones convergentes para éstos problemas.

Así, desde las Estaciones SEBI se ejerce un estricto control sobre los haces de radiación emitidos, creando “rayos” individualizados por usuario y que sólo existen cuando se requiere el servicio. Esto marca una gran diferencia respecto a la actual situación, en la que las estaciones convencionales están continuamente emitiendo energía electromagnética de forma omnidireccional e indiscriminada, se use o no.

Además, al “dirigir” la energía hacia el usuario hacemos un uso mucho más eficiente de la energía, permitiendo mayores alcances y cobertura, lo que proporciona tanto una mayor capacidad de transmisión así como una reducción significativa en el número de estaciones base necesarias para alcanzar una determinada calidad del sistema y en el servicio.

Ello, unido al uso de técnicas de multiplexación, que permitirá la compartición de estaciones base por parte de distintos operadores y al hecho de que se puedan usar las mismas antenas inteligentes para diversos estándares (por ejemplo: GSM y UMTS), hará mucho más eficientes a las redes resultantes, así como disminuirá notablemente la inversión requerida para el despliegue de las mismas.

## **4.6 LAS ANTENAS INTELIGENTES EN LAS WLAN Y LOS SISTEMAS MIMO**

### **4.6.1 LA SUPERACIÓN DE LAS LIMITACIONES DE ANCHO DE BANDA**

A medida que se dispara la popularidad de Wi-Fi, la necesidad para un ancho de banda de alta calidad y transferencia está surgiendo como una de las limitaciones clave del crecimiento. Muchos investigadores (Intel, Ericsson, Lucent, etc.) están buscando la manera de superar las limitaciones de ancho de banda con antenas inteligentes, lo que puede mejorar la calidad de la señal y las distancias operacionales de las señales inalámbricas.

La tasa de adopción de dispositivos inalámbricos en los negocios (Wi-Fi, PDA y, próximamente identificación por radiofrecuencia, o RFID) y en los hogares (PC, dispositivos “Bluetooth”, entretenimiento en el hogar, etc.) está creando una

demanda muy elevada por el ancho de banda. Son necesarias innovaciones nuevas para atender esta demanda. Al mismo tiempo, los mismos estándares inalámbricos están evolucionando para brindar un ancho de banda más grande.

Las especificaciones en evolución, tal como 802.11n y 802.16<sup>3</sup>, abren nuevas áreas dentro de las cuáles muchas empresas ha desarrollado investigaciones muy extensas del uso de antenas inteligentes. Dependiendo de su diseño específico las antenas inteligentes, pueden incrementar el ancho de banda o el alcance de los dispositivos inalámbricos.

Las difusiones de radio y televisión que se conocen utilizan un sistema de comunicaciones tradicional: una antena transmite una señal y otra (segunda) antena la recibe. Ya que esta configuración usa una antena en cada extremo, se le denomina entrada simple, salida simple (SISO, por sus siglas en inglés).

Muchos de los sistemas inalámbricos actuales usan el mismo diseño básico. Una antena en el punto de acceso transmite, y otra, en un equipo portátil u otro dispositivo, recibe los datos. Cuando una antena transmite, la otra recibe y viceversa.

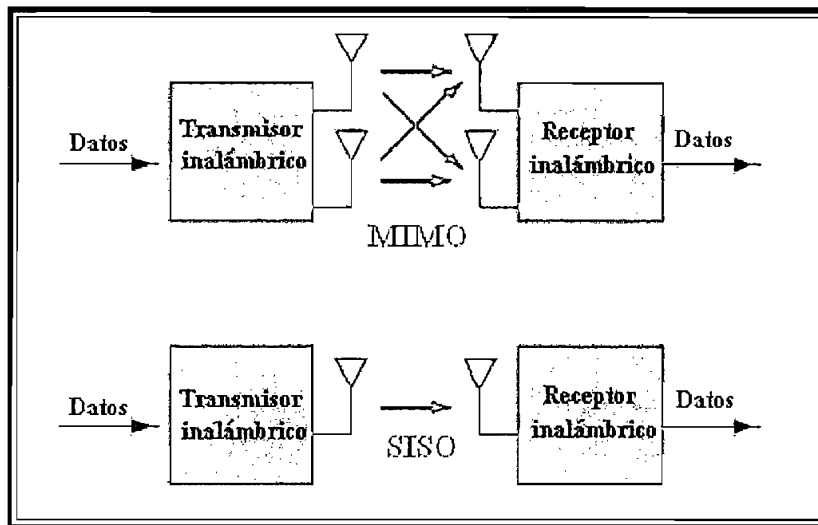
Las nuevas tecnologías están examinando cada vez más los diseños en los cuales la transmisión y la recepción usen antenas múltiples en ambos extremos de la comunicación. Este método se denomina entrada múltiple, salida múltiple (MIMO, por sus siglas en inglés).

Para manejar múltiples señales, estos sistemas MIMO requieren de más inteligencia que una simple configuración SISO. En algunos casos, la lógica de procesamiento de señal es sumamente compleja. Por esa razón, estas antenas múltiples se conocen como antenas inteligentes (figura 4.1).

---

<sup>3</sup> *Tecnologías inalámbricas 802.11, ver el anexo C.*





*Fig. 4.1 Sistema SISO y MIMO.*

Para entender la manera como las antenas inteligentes mejoran la transferencia, es necesario examinar las distintas maneras como las comunicaciones inalámbricas pueden aprovechar las antenas múltiples.

El principio básico de las antenas inteligentes, como ya es conocido, es que cada antena recibe una señal separada y definida. Dependiendo como está configurado el sistema inalámbrico, el receptor puede usar una señal para mejorar la calidad de otra señal, o podría combinar los datos de señales múltiples para ampliar el ancho de banda.

#### **4.6.2 AMPLIACIÓN DEL ALCANCE MEJORANDO LA CALIDAD DE LA SEÑAL**

Las tecnologías que comparan la calidad de las señales de dos antenas, y eligen la más intensa, pueden mejorar la calidad de la señal sustancialmente. Si se examina un escenario común en el cual se encuentra a un usuario utilizando una conexión Wi-Fi en un sitio público muy concurrido.

Cuando el punto de acceso Wi-Fi transmite datos, la señal puede amortiguarse si algún objeto (tal como una persona caminando por ahí) aparece entre el punto de

acceso y el dispositivo receptor. Lo que da por resultado que una señal intensa se debilite súbitamente.

De la misma manera si alguien estaba de pie entre los dos dispositivos al comenzar la transmisión, la señal se mejora en cuanto la persona se hace a un lado. Una señal débil se intensifica súbitamente, si un dispositivo con dos antenas hubiera recibido ambas señales, el dispositivo seleccionaría la mejor señal si es que la que estaba en uso comenzara a amortiguar; lo cual recae en la ya conocida técnica de diversidad conmutada.

Este método tan simple vigila directamente a las dos antenas y conmuta entre ambas a medida que las señales se intensifican o se amortiguan una en relación con la otra. La amortiguación de la señal es el factor de canalización de la distancia de transmisión para señales inalámbricas. Mientras más intensa es la señal, mayor será la distancia que puede viajar. Por lo tanto, la diversidad conmutada puede beneficiar a los usuarios incrementando la distancia por la cual pueden disfrutar de una conectividad inalámbrica fiable.

Además de la amortiguación, el ruido puede dañar las señales. Esto es especialmente cierto de las frecuencias Wi-Fi, ya que muchos dispositivos inalámbricos (lo que incluye teléfonos móviles y hasta hornos de microondas) comparten el espectro de frecuencias no sujeto a licencia. Las antenas inteligentes pueden contribuir a la reducción del ruido mediante la combinación de señales de ambas antenas.

Cuando se combinan esas señales, las señales transmitidas se refuerzan entre sí, mientras que el ruido – que consiste de señales aleatorias de bajo volumen – se mantiene a un nivel de intensidad constante. Como las señales tienen más intensidad relativa al ruido, es más fácil distinguirlas del mismo.

El concepto de la combinación de señales puede mejorarse aún más usando técnicas que comparan matemáticamente la calidad de la señal en tiempo real y las combinan de acuerdo a ponderaciones asignadas a la calidad de la señal. En la mezcla analógica, las señales de RF se sincronizan y luego se les pondera de acuerdo con la intensidad de la señal y los niveles de ruido. Después, las señales

se combinan para producir una RF óptima en términos de la proporción de intensidad de señal a ruido. Esta señal optimizada se envía a los circuitos digitales para su digitalización.

La mezcla analógica es una técnica directa y efectiva. Una técnica similar, pero más avanzada, usa la mezcla digital y es efectiva en especial para los radios que utilizan multiplexación de división ortogonal de frecuencias (OFDM)<sup>4</sup>.

Cuando se usa OFDM, la transmisión se efectúa usando muchas frecuencias. Así se permite que la transmisión de la señal de radio se divida en múltiples señales secundarias pequeñas que se transmiten simultáneamente al receptor usando frecuencias diferentes.

Las señales secundarias de cada antena se encaminan por el conjunto de circuitos digitales, donde son ponderados y combinados para producir una señal óptima. Ya que las señales secundarias llegan por varias frecuencias diferentes simultáneamente, el proceso de ponderación es complejo y exige capacidades de procesamiento muy avanzadas.

A cambio de eso, genera una señal prácticamente óptima.

Los ensayos de mejoramiento de señales llevados a cabo por varios investigadores muestran que la mezcla digital produce la señal de calidad más alta, seguida por mezcla analógica, y finalmente, la diversidad conmutada.

Cuando se opera cerca de los niveles óptimos, los mejores resultados amplían las distancias un máximo de 1.4 veces por cada incremento de 2 veces en el número de antenas en ambos extremos de la transmisión.

Todas estas técnicas pueden usarse en el transmisor, donde las decisiones de conmutación o ponderación que se usan para la mezcla se derivan del receptor co-ubicado (si asumimos un vínculo simétrico) o de la realimentación que se obtiene de otro dispositivo.

---

<sup>4</sup> OFDM, ver el anexo C.

Otra opción que involucra tanto al transmisor como al receptor es codificación espacio-tiempo (o espacio-frecuencia), en donde las señales se transforman y se delegan a ciertas antenas, frecuencias o símbolos en el tiempo. Este es un mecanismo para reducir los efectos de la atenuación de señal por multitrayectoria, que podría brindar una ganancia más elevada que la conmutación diversificada, dependiendo de la implementación del entorno.

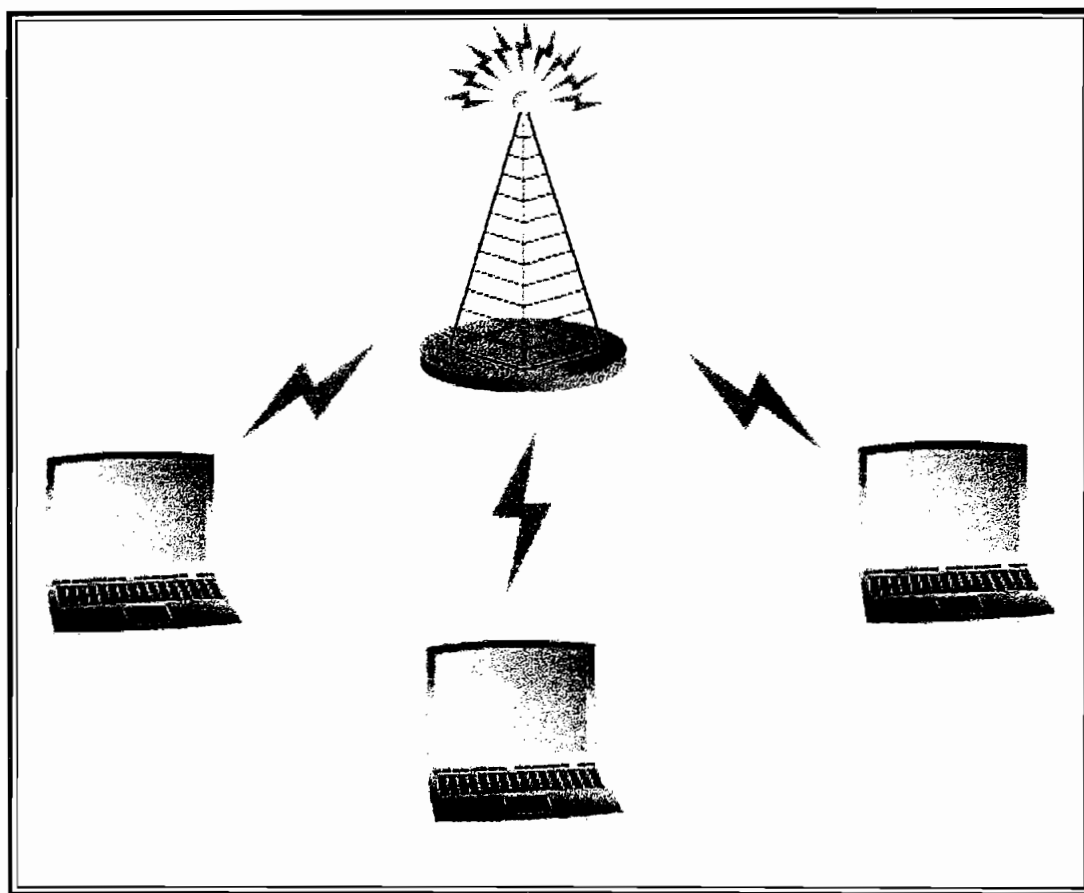
#### **4.6.3 LAS ANTENAS INTELIGENTES AUMENTAN LA TRANSFERENCIA**

Las técnicas antes mencionadas incrementan el alcance de la señal mediante el mejoramiento de la calidad de la señal. Ninguna de éstas incrementa la transferencia. Sin embargo, las antenas inteligentes pueden emplearse para incrementar la transferencia de manera sustancial.

La forma más sencilla de incrementar el ancho de banda acumulado de la red consiste en equipar el punto de acceso con múltiples antenas, cada una de las cuales atienden puntos finales específicos (figura 4.2). De esta manera cada punto final se beneficia, ya sea a través de su conexión propia al punto de acceso, o al menos en una reducción del número de dispositivos que se pelean por la conexión.

Usando el método de acceso múltiple de división espacial (SDMA), se cuenta con una ventaja particularmente atractiva: solamente los puntos de acceso necesitan múltiples antenas. Por esta razón, el costo de agregar ancho de banda afecta la red en un sólo punto – el punto de acceso –.

Como es conocido, SDMA es un método efectivo de incrementar la transferencia a bajo costo, incrementando el número de dispositivos que se comunican simultáneamente con un punto de acceso. Se obtiene una utilidad neta que tiene una relación prácticamente lineal con el número de antenas en el punto de acceso. Si se duplica el número de antenas, la transferencia acumulada se duplica prácticamente.



*Fig. 4.2 Despliegue de SDMA, mostrando el punto de acceso como una sola antena para cada punto final.*

Los sistemas MIMO – aquellos en los que el punto de acceso y el punto final utilizan múltiples antenas – pueden mejorar la transferencia en un vínculo de punto a punto. En las configuraciones MIMO, las cadenas de datos se difunden simultáneamente a través de múltiples antenas. Posteriormente, el dispositivo receptor combina las señales recibidas para reconstruir las múltiples cadenas de datos transmitidas.

Los ensayos realizados por las empresas pioneras de esta tecnología, muestran que las escalas de transferencia por este método se aproximan linealmente al número de antenas en ambos extremos de la transmisión. Si se duplica el número de antenas en ambos extremos, la transferencia resultante se duplica.

Ya que MIMO requiere conteos de antena simétricos para mejorar la transferencia y si un punto cuenta con cuatro antenas y el otro tiene tres, el mejoramiento total es de tres veces – la antena extra no agrega transferencia (a pesar de que si puede usarse para mejorar la calidad de la señal) –.

#### **4.7 LAS ANTENAS INTELIGENTES COMO TECNOLOGÍA PARA INTERNET INALÁMBRICO**

De la observación de que la penetración del móvil está empezando a superar a la penetración del fijo en algunos PC, y considerando que las innovaciones tecnológicas en la transmisión por móvil (2,5 G en adelante) permiten que las redes de móviles se conviertan en plataformas para acceder a Internet, se deduce que estas redes de móviles pueden llegar a ser la principal plataforma de voz y de Internet en los PC, al menos en las zonas con escasa infraestructura terrestre fija.

No obstante, es importante definir hasta qué punto se pueden ofrecer los contenidos de Internet desde una plataforma móvil. La industria de las telecomunicaciones móviles está evolucionando desde ser principalmente un servicio telefónico de voz (con características de datos limitadas como SMS), a ofrecer una combinación de voz y datos multimedia. Las tecnologías de las redes y el software mejorados están ampliando la gama de servicios y aplicaciones disponibles, particularmente aumentando la velocidad a la que funcionan los servicios en estas redes. Esto ha llevado a la aparición del nuevo y atractivo concepto de Internet a través de móvil.

Tal como están las cosas, los servicios de datos – y concretamente los contenidos de Internet – que se ofrecen en un teléfono móvil, no pueden compararse todavía con los que se ofrecen en un ordenador. La razón más obvia es que hay considerables diferencias entre los terminales fijos y los móviles en cuanto a tamaño de pantalla, potencia de tratamiento y memoria. El "cuello de botella de Internet a través de móvil" por consiguiente está más en la interfaz que en la red.

Sin embargo, la industria de los móviles se está desarrollando rápidamente. Innovaciones como los teléfonos aptos para Java están contribuyendo a estrechar la brecha entre Internet a través de teléfono fijo e Internet a través de móvil. Pero antes de que esto ocurra, habrá probablemente un aumento de la gama de tipos de terminales celulares, como los teléfonos inteligentes aptos como microbuscadores y los PDA (asistentes digitales personales), a medida que los nuevos servicios y la aparición de nuevos segmentos de usuarios estimulen el desarrollo de los productos. Pero, este nuevo servicio de internet a través del móvil presenta también la insipiente necesidad de antenas que optimicen los recursos de las redes, tanto de los operadores móviles cuanto de los servidores de internet. Por esta razón, las antenas inteligentes nuevamente resultan ser la más atractiva solución para la mejora de estos sistemas. Muchas empresas han ido en búsqueda de esta solución tratando de encontrar la forma en que puedan coexistir: las antenas inteligentes, las redes móviles y las redes de internet en una misma tecnología, complementándose la una con las otras, haciendo de este modo un uso eficaz de las redes.

Debido a ello, Novel, una empresa que enmarca sus estudios en las comunicaciones móviles, a propuesto un nuevo protocolo de múltiple acceso para acceder a la red de internet inalámbrica con antenas. A breves rasgos el funcionamiento de este protocolo está basado en lo siguiente:

Las antenas inteligentes son empleadas como punto de acceso central (CAP) para el acceso a las redes de Internet inalámbrico. Se utiliza un protocolo de acceso múltiple para la conformación del haz adaptativo y una estación base central (polling-base o PB-ABFMA). En PB-ABFMA, el CAP pide al terminal móvil correspondiente (MT) una secuencia de prueba para transmitir, justo antes de transmitir el paquete de datos, la referencia temporal del conformador de haz (TRB) puede ser realizado por las antenas inteligentes. El CAP fija las transmisiones de los paquetes basadas en mecanismo de elección del haz y TDMA dinámico. El CAP y MTs transmiten alternadamente. Una mínima fracción de tiempo se usa para establecer la conectividad cuando un MT esta inactivo, por consiguiente, el retardo de acceso es reducido. Este método de acceso simple y eficaz garantizará el rápido acceso de nuevos terminales móviles que llegan al

canal. Basado en el tráfico "demanda-contestación" el cual es el tráfico más significativo en internet.

#### **4.8 ANTENAS INTELIGENTES EN SISTEMAS DE VIDEO VIGILANCIA**

Sistemas de vigilancia muy innovadores han sido implementados en varios países del mundo, cámaras de video colocadas en diversos sitios estratégicos (plazas, avenidas, lugares públicos en general) son armas que han permitido a la policía fortalecer su lucha contra la delincuencia. No obstante, muchos de esos sistemas se ven limitados por hilos, a través de los cuales la información de video y datos es cursada con dificultad (muy similar al sistema ojos de águila implementado en varios países de América Latina).

Hoy en día, nuevas formas de explotación de estos sistemas están abriéndose paso; sistemas inalámbricos de video vigilancia se están lanzando al mercado. Dichos sistemas en un principio han sido implementados de la siguiente manera:

La estación base del sistema es colocada en un camión, en el cual se tienen todos los equipos necesarios para que el sistema funcione en cualquier lugar que se requiera. El camión cuenta con un PC en donde se realiza el procesamiento de las señales recibidas; se encuentran también incorporadas al camión dos cámaras de video que son desplegadas de adentro del camión a través de pedestales telescópicos, en uno de los pedestales de las cámaras se tiene incorporado el sistema de antenas (6 antenas, colocadas en una configuración circular) que funcionan como un punto de acceso central de la información proveniente de cámaras móviles.

Por otra parte, y ya mencionado, se tiene varias cámaras que pueden moverse libremente (móviles) y ser llevadas lejos de la estación base (camión), cada una con su respectiva antena o suscriptor. Entonces, el sistema completo quedaría estructurado de la siguiente manera: una estación base (camión) con sistema de cámaras y arreglos de antenas, y varios suscriptores (cámaras y antenas) que



pueden moverse libremente y colocarse a distintas distancia de la estación base (similar a un sistema celular, con la única diferencia de que los terminales móviles, son cámaras que envían la información de video a las estaciones base), conformando un sistema cerrado de video vigilancia.

En la actualidad, este sistema ha sido implementado con antenas que utilizan transmisión vía microonda, lo cual a sido un limitante en el desempeño del sistema, debido a que se requiere una perfecta línea de vista entre el suscriptor (antena móvil) y cualquiera de las antenas del arreglo circular de la estación base. Si acaso, la línea de vista esta obstruida, o el suscriptor a caído en una línea de vista con un punto muerto del arreglo (es decir, entre las separaciones de las antenas), el sistema no funciona o si lo hace es pues, con un rendimiento muy bajo.

El próximo paso, en la mejora de este sistema, es la utilización de antenas inteligentes, como punto de acceso central en la estación base o camión, de tal manera que los lóbulos producidos por ella, busque a los suscriptores, optimizando el nivel de potencia utilizado para cada suscriptor, mejorando el enlace, la transferencia de información (datos y video), minimizando la interferencia y los nulos de la señal.

#### **4.9 FUNCIONAMIENTO DE LA ANTENA INTELIGENTE EN UN SISTEMA ÁREA LOCAL INALÁMBRICA**

Este tipo de aplicación es utilizado para la capa física del estándar IEEE 802.11a para la banda de los 5 GHz. Una red LAN inalámbrica, utiliza en el punto de acceso de un computador un arreglo de antenas inteligentes para un solo usuario como acceso al canal SDMA.

Lo que se trata es de tener las aplicaciones de una oficina, de un hogar totalmente inalámbrico, el hecho es de poder controlar a través del computador algunas funciones necesarias dentro de estos ambientes.

El utilizar antenas inteligentes ayuda a que la señal que irradia sea directiva y de esta manera interferir lo menos posible a aplicaciones cercanas.

## **4.10 TECNOLOGÍA DE ANTENAS INTELIGENTES EN REDES HETEROGÉNEAS**

Como ya se ha mencionado el uso de las antenas inteligentes son consideradas en las comunicaciones inalámbricas como un potencial eliminador de la interferencia.

La idea principal es utilizar este tipo de antenas en redes heterogéneas cada una de ellas con sus propios esquemas de eliminación de interferencia, pero con la ayuda de esta antena se puede minimizar este efecto.

En la actualidad con el asombroso avance de la tecnología, las aplicaciones demandan algoritmos complejos especialmente para el área de las comunicaciones móviles, aunque también demandan que estos tipos de algoritmos sean flexibles tanto para el transmisor como para el receptor, la idea de poder modificar ciertos parámetros como son la ganancia, potencia de la antena y el aumento de usuarios en una celda. Es por eso que una técnica para cancelar la interferencia es la de aplicar el concepto de la antena inteligente.

Las comunicaciones en redes heterogéneas han hecho el uso inminente de las antenas inteligentes no sólo en los UMTS (Sistemas de Telecomunicaciones Móviles Universales), sino también que se apliquen con otros sistemas de tercera generación en comunicaciones móviles, para mejorar la calidad de servicio y la necesidad de atender a un mayor número de usuarios

### **4.10.1 GESTIÓN DE REDES HETEROGÉNEA CON INTERFERENCIA**

En los últimos años ha existido un gran avance en las telecomunicaciones y ha producido nuevas aplicaciones para las redes móviles. Con adelantos en tecnología, una variedad de dispositivos de comunicación como Ethernet, CDPD<sup>5</sup>, los módems celulares, etc.; se han puesto disponibles a los precios económicos.

---

<sup>5</sup> Ethernet, CDPD, ver el anexo C.

Es muy común en la actualidad tener acceso a varias redes a través de un computador portátil.

Todas estas tecnologías ofrecen características de diferentes redes y llevan a heterogeneidad en arquitecturas de la red.

Para poder conocer y trabajar con redes heterogéneas es importante conocer a cada una de ellas, los principales conceptos deben ser una meta para realizar la conexión entre ellas.

Los siguientes tres factores se deben considerarse para adaptar la tecnología en redes heterogéneas:

- Servicios: Tiempo real en los servicios interactivos para los datos, video y voz, independencia del servidor.
- Conectividad: Eficiente implementación de multiprotocolos interconectados.
- Los Nuevos métodos de aplicación: Mejorar los servicios que usan procesos del espacio-tiempo.

Para incorporar la tecnología de redes heterogéneas las cuales son discutidas en un plan comercial global, deben las operadoras y empresas que prestan servicios inalámbricos llegar a un acuerdo para llevar a cabo la interconexión de sus servicios y poder interconectar entre diferentes tecnologías aplicadas, pero todas ellas utilizando antenas inteligentes.

Las empresas deben llegar a un pre-acuerdo y finalmente la aprobación de las pruebas preliminares acerca del uso de esta tecnología.

Los factores a continuación son un plan estratégico y sirve como un modelo para la tecnología de redes.

---

*Aplicaciones y Futuras Tendencias*

- La estabilidad a largo plazo.
- Corto plazo para la implementación.
- La viabilidad técnica.

Las áreas son divididas dentro y fuera de un campus, una red LAN y arquitecturas de acceso inalámbrico, en cada una de estas tecnologías las antenas inteligentes ofrecerá un rechazo a la interferencia, ahora bien el uso de una tecnología u otra depende de las aplicaciones que se desea tener pero debe tomarse en cuenta el sitio en donde se va a colocar la antena inteligente y las necesidades del usuario.

Las antenas inteligentes es una tecnología muy atractiva, pero complejo y su interacción con la interfaz aire y la propagación se vuelve complicada.

El éxito obtenido del uso de las antenas inteligentes en UMTS involucra varias consideraciones y entre ellas el hecho de que son tecnologías modernas que podrán enlazarse a cualquier sistema.

#### **4.10.2 TENDENCIAS ACTUALES**

El requisito más importante para las arquitecturas flexibles avanzadas es emplear algoritmos adaptativos robustos para asegurar el buen funcionamiento de la antena inteligente. El crecimiento de los sistemas de comunicaciones ha dado lugar a una variedad de algoritmos.

Lo difícil es crear algoritmos que sean flexibles para aplicarlos cuando el usuario se mueva entre varias topologías de la red por el grado de dificultad matemática que estos tienen. Esto hace necesario la intervención del sistema de dirección de la red para darse cuenta de la migración del usuario de un lugar a otro. El movimiento del usuario activará un mecanismo que se transmite en la red para proporcionar un algoritmo conveniente de acceso que va a servir para la localización del usuario y con estas circunstancias, es necesario que la red este conciente de la posición del usuario para poder brindarle el mejor servicio.

En sistemas de TDMA, las arquitecturas de la antena adaptativas operan con la dirección de las señales requeridas de los datos recibidos que permiten el acceso múltiple a la división espacial (SDMA), esto implicando que los usuarios están separados dentro de una celda por proceso predominantemente espacial que comparte la frecuencia común.

# CAPITULO 5

## Conclusiones

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSIONES

En el desarrollo de las telecomunicaciones, los sistemas de telefonía móvil han encontrado inconvenientes en la prestación de servicios debido al subdimensionamiento de las redes, provocando problemas de: capacidad, cobertura e interferencia.

En el área de la telefonía móvil, las nuevas generaciones inalámbricas han traído consigo mejores oportunidades y beneficios para los operadores y usuarios del sistema. Las tecnologías actuales no satisfacen las necesidades de los usuarios, que se ven afectados por problemas en la transmisión. La utilización de sistemas modernos permitirá superar problemas y mejorar el servicio.

Una de las alternativas actuales son los "Sistemas de Antenas Inteligentes", que propone la superación de las barreras de la actual telefonía móvil y un máximo desarrollo de servicio. Es una tecnología que aumenta el alcance y la capacidad de las estaciones base, dando como resultados: nuevos servicios, mayor seguridad, beneficios económicos y tecnológicos en los sistemas de comunicaciones móviles.

Las antenas inteligentes, en lugar de emitir omnidireccionalmente la señal, usan un conjunto de antenas que determinan el origen de la señal de cada terminal móvil conectado a la red, dirigiendo la transmisión hacia él de forma directa, lo cual cubriría las deficiencias existentes. Conjuntamente con las tecnologías actuales, las antenas inteligentes mejoran los servicios comercializados por las operadoras, satisfaciendo la demanda del usuario.

---

*Conclusiones*

La antena inteligente por sí sola no presenta inteligencia alguna, su inteligencia se basa en la utilización de algoritmos adaptativos. Los algoritmos adaptativos, favorecen a la conformación de haces, optimización de recursos, control, procesamiento de señales y continuo aprendizaje (lazo de repetición del proceso) de los sistemas.

El estudio de antenas básicas ha sido muy importante para el desarrollo de este proyecto, su análisis a permitido entender la construcción y la funcionalidad de las antenas de telefonía móvil y de antenas inteligentes.

Desde el punto de vista de eficiencia, las antenas inteligentes son una solución tecnológica adecuada para la optimización de la potencia de radiación. Con la utilización de procesadores de alta capacidad, se posibilita la formación de haces directos, estrechos y enfocados al usuarios.

Las antenas inteligentes permiten un aumento de capacidad en los sistemas actuales de telefonía móvil. Su aplicación conjunta con SDMA y algoritmos adaptativos prevé la posibilidad que los sistemas con TDMA y CDMA multipliquen sus capacidades por 3 y 5 veces respectivamente, mencionado en el capítulo 2.

A pesar del incremento en el número de usuarios, la interferencia entre células adyacentes no constituiría un problema, debido al enfoque y directividad de los haces radiados por el sistema.

Uno de los fabricantes, ArrayCom, tiene un producto llamado IntelliCell que ya ha sido instalado en casi 100.000 estaciones en Japón, China y Taiwán y que puede añadirse a una estación base tradicional. IntelliCell, proveedor de antenas inteligentes, afirma que añadir esta tecnología a una estación de base GSM multiplica concretamente la capacidad por un factor de tres a siete.

Los sistemas de antenas inteligentes con SDMA aplicados en sistemas que funcionan con CDMA, mejoran su capacidad.

SDMA permite una distribución angular en los canales CDMA, CDMA tiene  $n$  portadoras de banda ancha cada una capaz de soportar  $m$  canales; con la



---

*Conclusiones*

utilización de antenas inteligentes y SDMA se tienen  $n$  portadoras de banda ancha capaz de soportar  $m*k$  canales. Cada uno de los  $m$  canales son constituidos por  $k$  canales, los cuales tendrán igual "slot" de tiempo, frecuencia y código.

Con la utilización de las antenas inteligentes, el terminal móvil requiere menor potencia de transmisión, lo que mejora la vida útil de la batería del móvil. Es importante recalcar que esta tecnología no demanda cambio del terminal móvil.

Enfocándonos a la calidad de los sistemas de telefonía móvil, la tecnología de antenas inteligentes mejoran las transmisiones de voz, datos y video. Reduciendo los efectos de multitrayectoria e interferencias de señales, el intercambio de tráfico entre usuario y radio base se vuelve fluido. De igual manera la utilización de algoritmos de "beamforming", receptores sensibles y técnicas de acceso al canal, permiten que la funcionalidad de los sistemas alcancen un óptimo desarrollo.

La utilización de antenas inteligentes hace que los sistemas de telefonía móvil sean menos propensos a espionaje e interferencias.

La antena inteligente en funcionamiento reduce la contaminación ambiental y visual que generan las antenas convencionales, evitando la radiación en centros de estudios, hospitales, etc., además de reducir el número de estaciones base.

Los algoritmos utilizados en la tecnología de antenas inteligentes son flexibles, pueden ser programados de manera que las antenas enfoquen sus señales en determinadas zonas; evitando radiar las señales en lugares donde la información pueda ser violentada.

Las operadoras deberían implementar paso a paso el sistema inteligente en las actuales redes y a medida de sus capacidades, para no provocar una desestabilización económica y tecnológica de su empresa.

---

*Conclusiones*

Las antenas inteligentes y sus aplicaciones tendrán aceptación en el mercado mundial de las telecomunicaciones, principalmente en la telefonía móvil y en redes inalámbricas, pudiendo ser utilizadas en transmisiones satelitales, en campos aeronáuticos, marítimos, sistemas digitales de televisión y en seguridad militar.

Con la idea de obtener mejores beneficios de la antena inteligente, se crea una nueva tecnología para trabajar en conjunto y obtener sistemas con servicios de alta calidad, es así que surge la idea de UMTS; es un sistema que integra varias tecnologías dispuestas a ofrecer servicios de multimedia y mayor velocidad en la transmisión de datos. Es un sistema de tercera generación cuyas características relevantes se explican brevemente en el Anexo A.

En el futuro se podrá mejorar las señales de voz, datos y video con la utilización de antenas inteligentes en las estaciones base y en los terminales móviles, trayendo consigo una optimización de potencia en el terminal móvil, con mejoras de calidad en las señales y mayor seguridad de la información.

La tecnología de antenas inteligentes es compatible con todas las técnicas de acceso actuales, pero no con todas ellas funcionan adecuadamente.

A nivel de operadora, la inversión inicial para implementar el sistema de antena inteligente es alta, por ello la mayoría de operadoras no vislumbran utilizar esta tecnología a pesar de conocer sus beneficios.

La utilización de algoritmos complicados en el desarrollo e implementación de la tecnología de antenas inteligentes, demanda largos procesos matemáticos, complicados de entender, incluso para los conocedores del tema. Por ello miran con desconfianza la utilización de las antenas, a pesar de sus beneficios.

Ericsson, Lucen y Nokia tienen sus propias versiones de la tecnología de antenas inteligentes; curiosamente (dado que viven de vender estaciones base de

---

*Conclusiones*

telefonía digital) no parecen muy interesadas en promover una tecnología que reduciría enormemente el número de antenas necesario para cubrir una zona.

Estamos seguros que los sistemas de las antenas inteligentes son una solución adecuada en las comunicaciones móviles y en muchas otras áreas tecnológicas. A corto plazo las telecomunicaciones tendrán una fortaleza en la utilización de esta nueva tecnología, su total desarrollo e implementación mejorarán el desempeño de las actuales redes de telefonía móvil, cumpliendo los objetivos con que fueron ideadas.

Referencias

Bibliográficas

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### LIBROS

- [1] BRAULT, R.,  
Las antenas. Capítulo 2: Las antenas. Madrid, Editorial Paraninfo, S.A.,  
1987, pp. 21 - 72.
- [2] BELOTSEKOVSKI,  
Fundamentos de antenas. Capítulo primero: Nociones generales.  
Barcelona, Marcombo, S.A., 1983, pp. 1 - 26.
- [3] CONNOR, F.R.,  
Temas de telecomunicaciones. Capítulos 1, 2, 3 y 4 :Introducción,  
antenas elementales, antenas horizontales y verticales, agrupación de  
antenas. Barcelona, Labor, S.A., 1972, pp. 1 - 51.
- [4] CARDAMA, Angel,  
Antenas, México, Alfaomega, Ediciones UPC, 2000, pp. 30 – 221.
- [5] WAYNE, Tomasi,  
Sistemas de comunicaciones electrónicas, México, Prentice Hall  
Hispanoamericana S.A., 1996, 2º Edición, pp. 377 - 410
- [6] LIBERTI, J. C. y Rappaport, T. S.,  
Smart Antennas for Wireless Communications, New Jersey, Prentice  
Hall PTR, Upper Saddle River, 1998.  
Smart antennas for wireless communications, IS-95 and Third  
generation CDMA applications. Prentice Hall, New Jersey, 1999.

## ARTÍCULOS TÉCNICOS

- [1] ELLINGSON, Steve,  
Smart antenna technologies, IEEE Workshop on New & Emerging Technologies, Rutgers University, 2001.
- [2] LEHNE, Per H. y PETTERSEN, Magne,  
An Overview of Smart Antenna Technology for Mobile Communications Systems, Telenor Research and Development. IEEE Communications Surveys, 1999, vol. 2 No. 4.
- [3] SALAS, B. y PIZARROSO, M.,  
Antenas inteligentes como solución a problemas de calidad y capacidad en redes celulares y de acceso sin hilos, VIII Jornadas Telecom I+D, septiembre de 1998.
- [4] CHRYSSOMALLIS, M.,  
Smart antennas, IEEE Antennas and Propagation Magazine, Junio 2000, vol. 42 No. 3.
- [5] DIETRICH, C.B., STUTZMAN, W. L., KIM, B. y DIETZE, K.,  
Smart antennas in wireless communications, Base station diversity and handset beam forming. IEEE Antennas and Propagation Magazine, Octubre 2002, vol. 42, No. 5.
- [6] RAMOS, J. y MARTÍNEZ, M.,  
Aumento de la capacidad de sistemas celulares mediante la utilización de modulación en espectro ensanchado y antenas inteligentes. VIII Jornadas Telecom. I+D, Septiembre de 1998.

[7] PONNEKATI, S.,

An overview of smart antenna technology for heterogeneous networks,  
IEEE Communications Surveys, Octubre, Noviembre y Diciembre 1999,  
vol. 2, No. 4.

## **PAGINAS WEB**

[1] [www.antennea.org](http://www.antennea.org)

[2] [www.monografias.com](http://www.monografias.com)

[3] [www.eiffel.com.ar](http://www.eiffel.com.ar)

[4] [www.era.co.uk.com](http://www.era.co.uk.com)

[5] [www.project-sunbeam.org.com](http://www.project-sunbeam.org.com)

[6] [www. Upv.es.co](http://www.Upv.es.co)

[7] [www. Libertitonia.escomposlinux.org.com](http://www.Libertitonia.escomposlinux.org.com)

[8] [www.cienciafisica.com](http://www.cienciafisica.com)

[9] [www.gr.ssr.upm.es/rdpr/transparencias/transp\\_tema4.pdf](http://www.gr.ssr.upm.es/rdpr/transparencias/transp_tema4.pdf)

[10] [www.edicionsupc.es/ftppublic/pdfmostra/TL00104M.pdf](http://www.edicionsupc.es/ftppublic/pdfmostra/TL00104M.pdf)

[11] [www.intel.com](http://www.intel.com)

[12] [www.jrc.es](http://www.jrc.es).

[13] [www.cq-radio.com/articles/parlem.htm](http://www.cq-radio.com/articles/parlem.htm)

---

*Referencias Bibliográficas*

- [14] [www.radiacao.com.br/traducao celular.html](http://www.radiacao.com.br/traducao celular.html)
- [15] [www.upc.es/3er-cicle/cas/doctorat/programes/58.htm](http://www.upc.es/3er-cicle/cas/doctorat/programes/58.htm)
- [16] [www.iec.org/online/tutorials/smart\\_ant/comment.html](http://www.iec.org/online/tutorials/smart_ant/comment.html)
- [17] [www.pucelawireless.net/traduccion es/guiaondas\\_marshall.html](http://www.pucelawireless.net/traduccion es/guiaondas_marshall.html)
- [18] [www.cintel.org.co/media/Claudi\\_Barrera.pdf](http://www.cintel.org.co/media/Claudi_Barrera.pdf)
- [19] [http://portalgsm.com/documentacion\\_extendida/99\\_0\\_17\\_0\\_C/](http://portalgsm.com/documentacion_extendida/99_0_17_0_C/)
- [20] <http://espanol.geocities.com/elradioaficionado/antenas/antenas05.htm>
- [21] <http://web.frm.utn.edu.ar/comunicaciones/antenas.html#1>
- [22] <http://usuarios.lycos.es/natasab/dev/online.php?code=0&id=6>
- [23] [http://ar.geocities.com/lu3\\_bae/basica.htm](http://ar.geocities.com/lu3_bae/basica.htm)
- [24] <http://www.tid.es/presencia/publicaciones/comsid/esp/21/03.pdf>
- [25] [http://www.iec.org/online/tutorials/smart\\_ant/](http://www.iec.org/online/tutorials/smart_ant/)



ALPHAS

24

# **ANEXO A**

## ANEXO A

### A.1 UMTS

#### CONCEPTO DE UMTS

UMTS corresponde a las siglas en inglés “Universal Mobile Telecommunications System”, es decir, Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles, y es el primer estándar mundial para la comunicación desde dispositivos móviles, que representa una evolución respecto a los actuales sistemas. También se le denomina Sistema de Comunicaciones de tercera generación (3G), respecto a GSM que representa la segunda generación (2G) y GPRS la segunda y media (2.5G).

UMTS aventaja a los sistemas móviles de segunda generación (2G) en su potencial para soportar altas velocidades de transmisión de datos, que permitirán prestar servicios multimedia interactivos y nuevas aplicaciones como servicios de videoconferencias. El terminal UMTS se convertirá en un potente dispositivo de comunicaciones con capacidades avanzadas, de imagen y sonido. De esta manera, un usuario UMTS podrá, por ejemplo, moverse por una ciudad que desconoce consultando un mapa en su terminal. Desde su terminal podrá localizar, sin necesidad de teclear la dirección donde se encuentra, los sitios de interés que desee, desde un hospital o una farmacia, a un cajero o un restaurante. Si lo que busca es un cine podría obtener información sobre las sesiones de proyección, la película que se emite (conseguir incluso un pase promocional de la misma), reservar y pagar las entradas para ese espectáculo, eligiendo butaca en una representación gráfica de la sala.

Las siglas UMTS hacen referencia a un conjunto de tecnologías integradas para la creación de comunicaciones multimedia inalámbricas de alta calidad. Como ya se dijo, es el estándar de la tercera generación de telefonía móvil que persigue acabar con la incompatibilidad de los que coexisten en la actualidad, con la

saturación de la red GSM y aumentar la velocidad de transmisión de datos para hacer realidad la telefonía multimedia.

Aunque el servicio final que ofrecerán las operadoras - velocidad, cobertura, precio...- sigue rodeado de incógnitas, UMTS llega cargado de grandes ventajas frente a las redes móviles ahora disponibles:

- La transmisión de datos puede alcanzar velocidades de 2Mbps, aunque en un principio no excederá los 384 Kbps, que variarán en función de la cobertura, ocupación de la red, servidor de acceso, etc. En cualquier caso, promete superar la de la conexión de ADSL doméstica (256 Kbps).
- Esa velocidad es suficiente para un acceso a Internet de calidad y para dotar al móvil de gran capacidad multimedia: videoconferencias, descarga de vídeos, juegos, etc.
- El terminal UMTS estará siempre conectado, por lo que se podrá facturar por volumen de datos en lugar de por tiempo; lo que significa que se cobrará por el servicio, no por la conexión.
- Es un sistema global, diseñado para funcionar en todo el mundo, que emplea redes terrestres, inalámbricas y enlaces por satélite, lo que le otorga gran movilidad. El cambio de red (roaming) es instantáneo, sin cortes en la comunicación.

## **EVOLUCIÓN A UMTS**

A la red actual GSM se le irán añadiendo nuevas funcionalidades. Nuevas tecnologías como HSCSD, GPRS y EDGE

### **HSCSD (High Speed Circuit Switched Data)**

Se basa en circuitos conmutados de alta velocidad, proporciona una velocidad de 58 kbit/s. Permite acceder a varios servicios simultáneamente. Es parecida a la actual ISDN (Red Digital de Servicios Integrados).

### **GPRS (General Packet Radio Service)**

Puede llegar a velocidades de 115 kbit/s. Al contrario que HSCSD que para su implantación requiere únicamente de actualización software, GPRS necesita de un hardware específico para el enrutamiento a través de una red de datos.

### **EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution)**

Nos acerca a las capacidades que otorga 3G en la comunicación. En combinación con GPRS puede alcanzar velocidades de 384 kbit/s

De este modo, GSM será capaz de soportar comunicaciones de datos a velocidades mayores gracias a tecnologías como HSCSD, GPRS y EDGE. HSCSD (High Speed Circuit Switched Data), basado en circuitos conmutados de alta velocidad, utiliza una técnica de codificación mejorada que proporciona un flujo de datos de 57,6 kbps (4 por codificación del canal a 14,4 kbps) e integra múltiples canales independientes en uno sólo. Así, se logra aumentar la capacidad del terminal móvil para acceder simultáneamente a varios servicios, de manera similar a como sucede con ISDN (Red Digital De Servicios Integrados). Con esta tecnología, muy fácil de implantar en las redes actuales, ya que sólo requiere una actualización software, el número de intervalos de tiempo utilizado en cada instante por una comunicación de datos puede ser variable, dependiendo de la saturación de la célula en la que se encuentre conectado el móvil.

### **NUEVAS POSIBILIDADES**

Hasta el momento las empresas de desarrollo y creadoras de contenidos están volcadas en el desarrollo de aplicaciones WAP (Puntos de acceso inalámbricos) ya que se prevé su expansión en un corto periodo de tiempo. Además que la aparición inminente del GPRS ayudará a relanzar mucho más el acceso a aplicaciones móviles a través de Internet.

WAP acerca a los usuarios a la utilización de servicios de internet, el posicionamiento en esta tecnología ayudará al éxito en el desarrollo de proyectos UMTS. Por lo tanto no hay que ver únicamente a WAP como una tecnología

pasarela a UMTS sino que además es una introducción de todas las partes (usuarios, operadoras, empresas, etc..) a servicios móviles en redes.

Nuevos negocios se podrán implementar para esta tecnología, que van desde los propios fabricantes de dispositivos hardware, que desarrollarán los nuevos teléfonos y dispositivos capaces de aprovechar el nuevo método de comunicación a los propios desarrolladores que se les abrirán nuevas posibilidades que hasta ahora son impensables de creación de contenidos, aplicaciones, etc...

## **APLICACIONES DEL UMTS Y FUTURAS TENDENCIAS**

A modo de resumen, se enumera a continuación algunas de las novedades que la tecnología UMTS aportará a nuestras vidas en sus facetas personal y profesional.

### **Mayor velocidad y mejores servicios**

La tercera generación de móviles, denominada 3G, evoluciona para integrar todos los servicios ofrecidos por las distintas tecnologías y redes actuales, como GSM, TACS, DECT, ISDN e Internet, utilizando cualquier tipo de terminal, sea un teléfono fijo, inalámbrico o celular, tanto en un ámbito profesional como doméstico, ofreciendo una mayor calidad de los servicios y soportando la personalización por el usuario y los servicios multimedia móviles en tiempo real. Los servicios 3G combinan el acceso móvil de alta velocidad con los servicios basados en el protocolo IP. Pero esto no sólo conlleva una conexión rápida con la World Wide Web, sino que implica además nuevas formas de comunicarse, de acceder a la información, de hacer negocios, de aprender y de disfrutar del tiempo libre, dejando a un lado las conexiones lentas, los grandes terminales y los puntos de acceso fijos. Con la 3G se pueden realizar múltiples conexiones simultáneamente desde un mismo terminal móvil. Así, por ejemplo, un usuario podría conectarse a una base de datos remota para obtener información sin necesidad de interrumpir una sesión de videoconferencia.

Para que los usuarios utilicen los servicios 3G hará falta nuevos teléfonos y otros dispositivos capaces de proporcionar los servicios que se deseen, desde los de telefonía móvil hasta los de multimedia (voz, datos y vídeo). Además, en las redes

móviles es necesario introducir nuevos sistemas de transmisión por radio, cambiar parte de las plataformas de conmutación y de transmisión, e incorporar los nodos de servicio que hagan posibles las prestaciones 3G; algo que ya está empezando a suceder en las redes actuales con la introducción de tecnologías intermedias como WAP o GPRS.

Si el paso de los sistemas de primera generación (analógicos) a los de segunda consistió, básicamente, en el cambio de terminal, el paso de la segunda a la tercera generación significará, además del cambio de terminal, el cambio de modelo de negocio. En este nuevo modelo las aplicaciones personalizadas, localizadas y multimedia serán las protagonistas, tanto para los ciudadanos residenciales como para los empresariales, viendo los operadores como se incrementa el tráfico en sus redes y se crean nuevas oportunidades de negocio.

Existen, además, razones evidentes que explican la necesidad de introducir la 3G. Por una parte se encuentra la capacidad de las redes móviles actuales que sólo permiten albergar un número determinado y limitado de usuarios, con un patrón de consumo similar al actual, y que en cuanto se sobrepasa la congestión de la red se manifiesta de manera insoportable para los usuarios. Por otra parte, se encuentra el incremento de tráfico motivado por la sustitución del tráfico fijo por el móvil, en cuanto el costo de las llamadas se reduzca y los hábitos de los usuarios se modifiquen, necesitándose entonces más espectro. Y, por último, la aparición de nuevos servicios, muchos de ellos personalizados, donde la convergencia con Internet y el aumento de aplicaciones multimedia supondrán un aumento significativo de tráfico; tanto es así que los analistas estiman que supondrá en torno a un 30% de tráfico adicional en tan sólo dos o tres años.

### **Acceso a Internet a alta velocidad**

Posibilidad de utilizar Internet con la interfaz a la que hoy estamos acostumbrados en ordenadores de sobremesa y con velocidades sustancialmente mayores que harán de esta herramienta un servicio realmente eficaz. UMTS promete ofrecer velocidades inicialmente de hasta 384 kilobits por segundo, seis veces más rápido que GPRS, condicionados por el tráfico que haya en Internet o de la capacidad del servidor al que se acceda. El ancho de banda se asigna de forma dinámica

(será distinto para una llamada de voz que para la descarga de un vídeo, por ejemplo), con lo que se optimiza su uso.

### **Servicios de comunicación**

Correo electrónico con posibilidad de incluir imágenes, gráficos, hojas de cálculo e incluso imágenes de vídeo en tiempo real, chats, foros y servicios de mensajería unificada.

### **Servicios financieros**

Realización de todo tipo de trámites bancarios y compra de valores, con gran riqueza de información gráfica que facilite su utilización.

### **Servicios de ocio**

Quizás una de las aplicaciones de mayor éxito de esta tecnología ya que permitirán disfrutar de imágenes de vídeo, juegos interactivos compartidos en red con otros jugadores, música de alta calidad o también, enviar y recibir imágenes digitales de gran calidad captadas desde el propio terminal móvil.

### **Realización de trámites administrativos**

Peticiones, declaraciones, consultas y en general todo tipo de trámites que hoy nos obligan a desplazarnos a oficinas públicas.

### **Servicios de salud y emergencia**

Basados en la localización automática de la persona o vehículo y posibilidad de monitorización remota.



## **Acceso a los sistemas corporativos y aplicaciones**

Sin limitaciones, con la misma riqueza de información y a una velocidad superior a la que actualmente podemos disfrutar desde las propias oficinas de la empresa.

## **Servicios de máquina a máquina**

Como lectura automática de contadores a distancia, averías de vehículos y autochequeo de equipos.

## **Servicios de domótica**

Como la utilización a distancia de equipos electrodomésticos y alarmas.

## **Usuarios**

Con el UMTS se multiplicará esa capacidad multimedia y será posible transmitir contenidos y servicios por una red más rápida y segura. Ya no sólo se tomarán fotos o se grabarán vídeos con el móvil, sino que se podrán enviar instantáneamente a cualquier parte del mundo. Se podrá transmitir una boda en directo a través del móvil, darse un paseo virtual por una casa en venta o ver el gol de la jornada en la tumbona de la playa.

UMTS es un nuevo canal de comunicación que fusiona Internet y telefonía móvil y ofrece cobertura mundial. Si la red GSM está pensada para las llamadas de voz y el GPRS aportó la transmisión de datos sobre ese mismo sistema (aunque fuese de una manera lenta e incómoda), UMTS aumentará las operaciones que se pueden efectuar desde el móvil, que además se podrán simular. Será posible hablar mientras se descarga el correo electrónico. Sus novedades, que afectan a infraestructuras, frecuencias, proveedores y terminales, repercutirán en muchos ámbitos.

## **Comunicación**

Los actuales servicios de voz, desvío de llamadas, mensajes cortos (SMS) o llamada en espera, se potenciarán con la mensajería instantánea, el chat y la incorporación del vídeo para videotelefonía y videoconferencia.

## **Contenidos/multimedia**

El terminal UMTS tendrá acceso a servicios multimedia como “streaming” de vídeo y audio (ver un vídeo o escuchar una radio sin tener que esperar a que los contenidos se descarguen totalmente al terminal), y a contenidos interactivos de información y ocio enriquecidos con imágenes, música, juegos, vídeos, etc.

## **Seguridad**

La nueva red y las nuevas tarjetas (SIM) permitirán la identificación segura para acceder a una intranet corporativa. Los empleados podrán acceder a la red de su empresa desde el móvil mediante una conexión a alta velocidad.

## **Movilidad**

El terminal UMTS está siempre conectado a la red, por lo que la transmisión de voz, vídeo o datos llegará sin saltos aunque el usuario esté desplazándose en el coche, de la misma manera que si estuviese conectado a una red local.

## **Internet/comercio electrónico**

La velocidad, 200 veces mayor que la de la red GSM actual, convertirá en realidad la navegación por Internet y el uso del correo electrónico desde el móvil, al margen de las limitaciones de la pantalla. Además del nuevo e ingente caudal de contenidos y consulta de datos que ofrece Internet, la seguridad de la red garantizará la identidad del cliente, abriendo las puertas al comercio electrónico y a las transacciones bancarias o bursátiles.

## **A.2 TÉCNICAS DE ACCESO**

### **TDMA (Acceso Múltiple por División del Tiempo)**

Esta tecnología permite que varios usuarios puedan acceder a un canal sencillo de radio frecuencia, sin causar interferencia y dividiendo a cada canal en pequeñas porciones de tiempo.

El canal de radio frecuencia se divide en intervalos de tiempo y estos son asignados periódicamente al mismo usuario; cada uno de estos intervalos es subdividido en otros dos: uno para el enlace ascendente y otro para el enlace descendente. Todos los intervalos de tiempo están bordeados por intervalos de protección.

La tecnología TDMA es digital, lo que trae ciertas ventajas sobre la transmisión analógica:

- Economiza ancho de banda
- Permite una fácil integración con dispositivos PCS (Personal Communication Service) Dispositivos personales de comunicación.
- Mantiene una calidad superior en transmisiones de voz a través de grandes distancias.
- Se dificulta la decodificación para las personas que quieran interferir.
- Se puede utilizar transmisores de más bajo poder (Reducción del tamaño de las baterías).

### **CDMA (Acceso Múltiple por División de Código)**

Con la tecnología CDMA, múltiples usuarios puedan ser soportados dentro de una misma radiofrecuencia, sin importar el canal, a lo cual se le añade el hecho de que cada usuario tiene un código digital único que lo distingue de los demás dentro del espectro de radio frecuencia. Estos códigos son compartidos entre el

equipo móvil y la estación base y son llamados "secuencias de código pseudo aleatorias".

### **BENEFICIOS DE CDMA**

- La capacidad se incrementa en 8 a 10 con respecto a los sistemas analógicos.
- El uso de la misma frecuencia en cada sector de cada celda.
- Mejora la calidad del sonido con respecto a los sistemas analógicos.
- Amplia cobertura, necesitando menos celdas que otros sistemas.
- Ancho de banda por demanda (de acuerdo a la necesidad y uso), como una conversación, otros usuarios tendrán más disponibilidad de enviar datos o faxes, etc.
- Por ser un sistema codificado de manera digital, es utilizada en aplicaciones militares.
- El sistema es capaz de detectar pausas y silencios en las conferencias y no los transmite como parte de la llamada, solo realiza las transmisiones que sean necesarias tanto de datos como de voz, etc.

### **GSM (Global System for Mobile Communications) Sistema Global para comunicaciones móviles**

Esta tecnología es un estándar prácticamente en toda Europa y algunas regiones de Asia, en nuestro país también existe una operadora con dicha tecnología.

Las características más resaltantes de este sistema son su capacidad de cobertura en hasta 170 países con el mismo número telefónico (roaming internacional) y la utilización de una tarjeta SIM (Subscriber Identity Module) donde se almacenan todos los datos del usuario (saldo, número de teléfono, etc.), también utiliza una tecnología similar a la TDMA de división de tiempo y accesos múltiples, con un tratamiento adicional para la frecuencia.

Adicionalmente con GSM existe la posibilidad de roaming satelital, el cual permite la expansión del servicio a áreas donde la cobertura terrestre sería imposible.

Con GSM, existe un punto muy importante que no se ha revisado en las tecnologías antes mencionadas y es que al realizar una llamada se sigue todo un proceso de autenticación del usuario, y es ahí donde entra en uso de la tarjeta SIM, para identificarlo en la red y ubicarlo "mundialmente".

### **FDMA (Acceso Múltiple por División de la Frecuencia)**

Esta técnica consiste en dividir el espectro disponible en varios canales de frecuencia de manera que cada usuario utiliza a la vez dos canales para su comunicación uno para el enlace ascendente (con el que transmite información hacia la red) y el otro para el enlace descendente (con el que recibe información desde la red).

Esta asignación de canales es exclusiva, de manera que los canales no pueden ser utilizados simultáneamente por más de un usuario y cada uno de estos canales está bordeado por pequeñas bandas de frecuencia que evitan solapamientos.

### **SDMA (Acceso Múltiple por División de Espacio)**

En SDMA se utiliza la reutilización de la frecuencia de transmisión en ciertos puntos de la geografía. Si la distancia que existe entre dos estaciones base que usan la misma frecuencia es suficientemente larga, la interferencia puede ser tolerable. Mientras más corta sea esta distancia mayor será la capacidad del sistema.

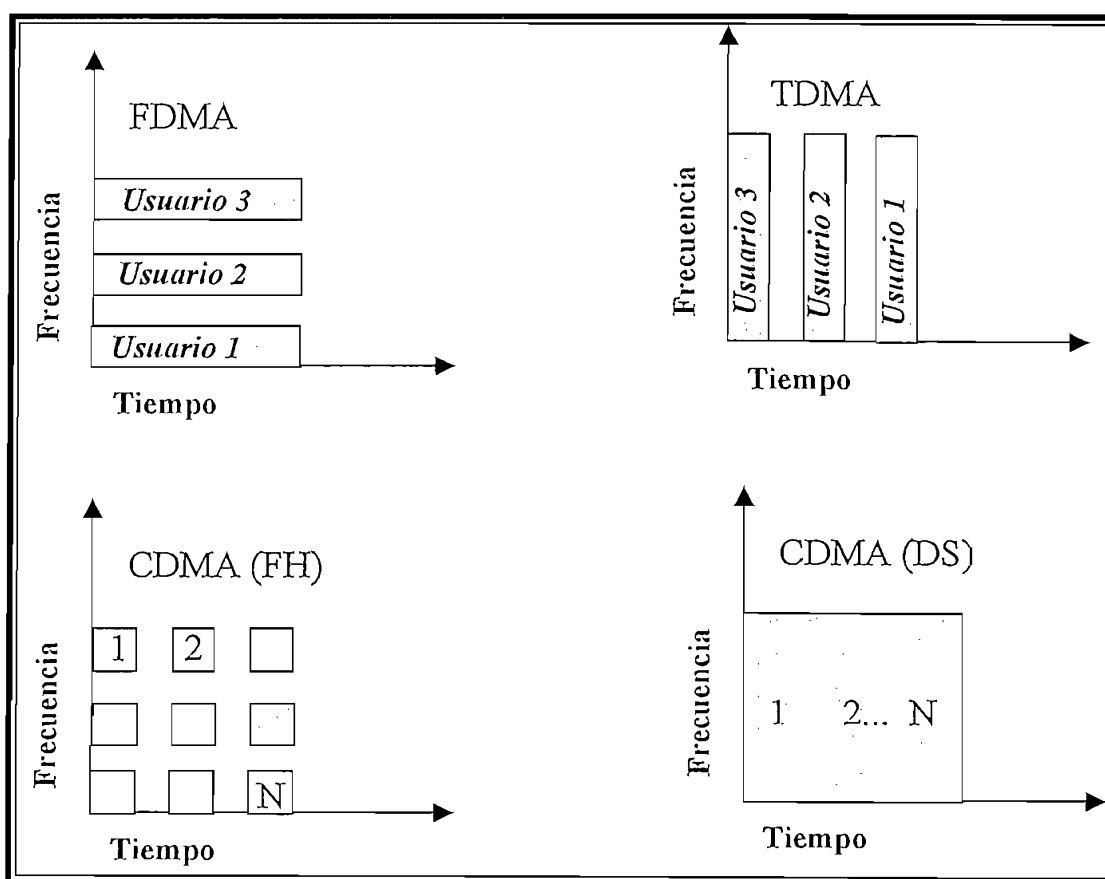
Un sector provee un área de cobertura fija. Antenas inteligentes pueden generar un haz radioeléctrico en un sector angosto en la dirección deseada, lo cual incrementa más la capacidad del sistema.

Muchos sistemas móviles de segunda generación usan SDMA junto con otras de las técnicas antes mencionadas para incrementar y mejorar la capacidad del sistema.

Todas estas tecnologías, pueden utilizar las antenas inteligentes con lo mejorarían, a más de las ventajas técnicas que cada una de ellas presenta.

Con el uso de las antenas inteligentes, un aspecto primordial de mejora es la seguridad, a más de la que cada una cuenta, es muy importante porque suelen ser usadas actualmente para fines de seguridad territorial sin importar con la técnica de acceso.

### GRÁFICOS DE TÉCNICAS DE ACCESO AL CANAL



## **A.3 GENERACIONES DE LA TELEFONÍA INALÁMBRICA**

### **LA PRIMERA GENERACIÓN**

La primera generación de la telefonía móvil hizo su aparición en 1979, se caracterizó por ser estrictamente para voz y analógica. La calidad de los enlaces de voz era muy baja; baja velocidad, la transferencia entre celdas era muy imprecisa, con baja capacidad basadas en FDMA, (Acceso Múltiple por División de Frecuencia) y la seguridad no existía. La tecnología predominante de esta generación es AMPS.

### **LA SEGUNDA GENERACIÓN**

La segunda generación no llega sino hasta 1990 y a diferencia de la primera se caracterizó por ser digital. El sistema de segunda generación utiliza protocolos de codificación más sofisticados y son los sistemas de telefonía celular usados en la actualidad. Las tecnologías predominantes son: GSM (Global System for Mobile Communications); IS-136 (conocido también como TIA/EIA-136 o ANSI-136) y CDMA (Acceso Múltiple por División de Código) y PDC (Personal Digital Communications), éste último utilizado en Japón.

Los protocolos empleados en los sistemas de segunda generación soportan velocidades de información mas altas para voz pero no para datos. Se pueden ofrecer servicios auxiliares tales como datos, fax y SMS (Short Message Service).

La mayoría de los protocolos de segunda generación ofrecen diferentes niveles de encriptación. Estos sistemas de segunda generación son a los que comúnmente se los conoce como PCS (Personal Communications Services).

### **LA GENERACIÓN 2.5G**

Muchos de los proveedores de servicios de telecomunicaciones (carriers) se moverán a las redes 2.5G antes de entrar masivamente a tercera generación.

La tecnología 2.5G es más rápida y más económica para actualizar a tercera generación.

La generación 2.5G ofrece características extendidas para ofrecer capacidades adicionales, entre los sistemas de esta generación se encuentran GPRS (General Packet Radio System), HSCSD (High Speed Circuit Switched Data), EDGE (Enhanced Data Rates for Global Evolution), IS-136B, IS-95B, entre otros.

## **LA TERCERA GENERACIÓN**

La tercera generación se caracteriza por la convergencia de la voz y datos con aplicaciones multimedia, acceso inalámbrico a Internet, y altas transmisiones de datos. Los protocolos empleados en los sistemas de tercera generación soportan más altas velocidades de información.

Los sistemas de tercera generación alcanzan velocidades de hasta 384 Kbps permitiendo una movilidad total a usuarios viajando a 120 kilómetros por hora en ambientes exteriores y una velocidad máxima de 2 Mbps permitiendo una movilidad limitada a usuarios caminando a menos de 10 kilómetros por hora en ambientes estacionarios de corto alcance o en interiores. Entre las tecnologías que comprenden la tercera generación se encuentran UMTS (Universal Mobile Telephone Service), CDMA 2000, IMT-2000, ARIB[3GPP], UWC-136, entre otras.

## **LA CUARTA GENERACIÓN**

La cuarta generación es un proyecto a largo plazo que será 50 veces más rápida en velocidad que la tercer generación. Se planean hacer pruebas de esta tecnología hasta el 2005 y se espera que se empiecen a comercializar la mayoría de los servicios hasta el 2010. Una cualidad especial de esta tecnología será la transportabilidad de servicios y la identificación única de usuarios.



## A.4 EWF

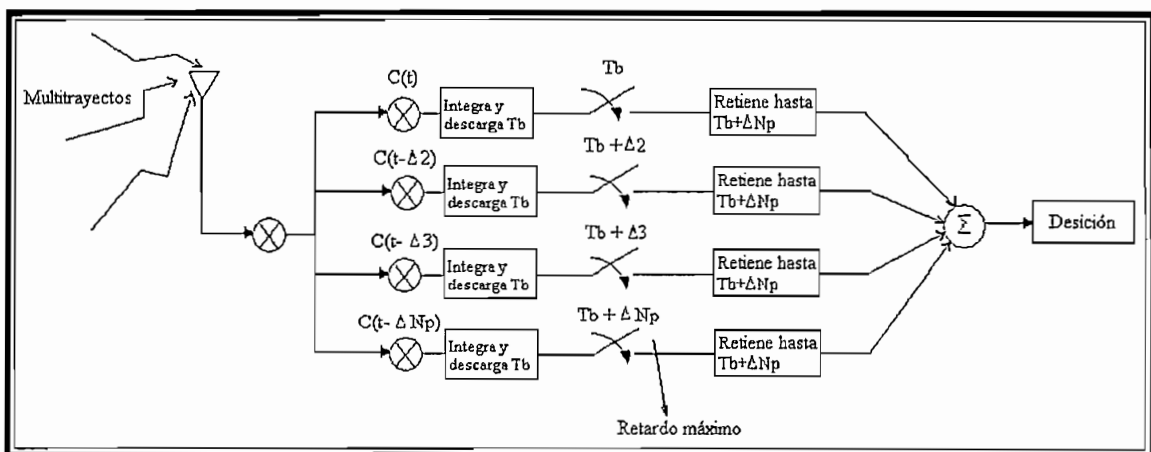
La guerra electrónica es esencial para Norteamérica, para mantener su superioridad militar. La guerra electrónica proporciona acceso al espacio de batalla, degradando la capacidad de ataque de sus enemigos, y más importante salvar las vidas. Asegura las operaciones del ejército, en el aire, en el mar, y en la tierra.

La Guerra Electrónica (EW) es una fuerza de trabajo bipartita compuesta por los miembros del congreso de la U.S.A trabajando en coordinación con las fuerzas armadas, policía pública e industrias defensoras.

## A.5 ECUALIZADOR RAKE

El detector RAKE es el correlador óptimo para minimizar la distorsión generada por las propagaciones multitrayectoria. Es eficiente siempre que las propagaciones multitrayectoria no excedan el tiempo de símbolo.

Sincroniza todos los "paths" o caminos del canal. Aprovecha la diversidad del medio para detectar cada uno de los símbolos.



## A.6 TECNOLOGÍA PLUG & PLAY

Plug & play (conocida también por su abreviatura PnP) es la tecnología mediante la cual un dispositivo informático puede conectarse a un ordenador mientras está funcionando y que se reconozca y sea usable inmediatamente. Para que eso sea posible, el sistema operativo con el que funciona el ordenador debe tener soporte para dicho dispositivo.

Ventajas para el usuario:

- Configuración automática de tarjetas adicionales y periféricos
- Mayor facilidad de expansión para los PCs
- Mínima frustración del usuario
- Costos de mantenimiento reducidos
- Sencilla incorporación de las últimas tarjetas para PC

La tecnología Plug & Play (PnP) permite a los usuarios añadir nuevas posibilidades insertando tarjetas adicionales, sin preocuparse de complicados problemas de configuración del sistema.

## A.7 HANDOVER

Nos permite cambiar a otra estación base, cuando la señal actual de nuestra estación base no cumple un nivel mínimo de calidad, o bien, otra estación ofrece una señal de mayor calidad.

Para saber a que estaciones base nos podemos pasar en caso de necesidad, el terminal GSM evalúa las posibles alternativas a la estación base actual, al menos una vez por segundo.

## **TIPOS DE HANDOVER**

- De canales en la misma celda
- De celdas (BTS) dentro de la misma BSC
- De celdas de BSCs diferentes pero que dependen del mismo MSC
- De celdas que dependen de diferentes MSC

## **A.8 TDD Y FDD**

### **TÉCNICA FDD: FREQUENCY DIVISION DUPLEX.**

- Cada móvil tiene asignada una sub-banda en el enlace ascendente y una sub-banda en el enlace descendente. Desvanecimientos no selectivos.
- La estación base requiere un transceptor (Tx-Rx de RF) para cada usuario.
- Sistemas FDD: Sistemas celulares de primera generación: AMPS, TACS,..

### **TÉCNICA TDD: TIME DIVISION DUPLEX**

- Los slots de enlaces ascendente y descendente comparten la misma trama, y por tanto la misma banda frecuencia.

# **ANEXO B**

## **ANEXO B**

### **B.1 ALGORITMO DE ESTIMACIÓN DE LA DIRECCIÓN DE LLEGADA (DOA).**

#### **ESTIMACIÓN DE DIRECCIÓN DE ARRIBO.**

La base teórica a partir de la cual se construyen técnicas para estimación de dirección de arribo es la estimación espectral, por esta razón se trata a breve rasgos la estimación espectral para luego extender su uso a la estimación espacial, y de esta manera justificar teóricamente la veracidad y las consideraciones que se deben tener en cuenta para garantizar la validez del paralelo que existe entre ellas.

#### **ESTIMACIÓN ESPECTRAL HACIA LA ESTIMACIÓN ESPACIAL, BASE TEÓRICA.**

El análisis espectral es cualquier método de procesamiento de señales que caracteriza el contenido de frecuencia de una señal medida. Cuando se desea estimar el contenido espectral de señales discretas en el tiempo de duración infinita, lo más común es utilizar procedimientos que hacen uso de la DTFT (Discrete Time Fourier Transform). Si las señales discretas son finitas, se usa la DFT. Esta manera de abordar el problema de la estimación espectral es eficiente en lo computacional y produce resultados razonables en una amplia gama de señales.

Pero a pesar de sus ventajas, existen varias limitaciones en rendimiento ligadas a la DFT. Su mayor limitación es la resolución en frecuencia, una segunda limitación de la DFT se debe a que para evaluarla es totalmente necesario e inevitable aplicar una ventana a la señal en tiempo, esta ventana en el tiempo, en principio

rectangular, se manifiesta en el dominio espectral como un desperdicio de energía hacia los lóbulos laterales, distorsionando otros contenidos espectrales que puedan estar presentes en la señal.

Estas limitaciones de la DFT son particularmente nocivas cuando se tienen disponibles secuencias de datos cortas.

Para intentar reducir las limitaciones inherentes a la DFT, se han propuesto muchos procedimientos alternativos de estimación espectral en las últimas décadas.

El método paramétrico. Se deriva del "Modelo de la matriz de covarianza", Este modelo está dado por la ecuación, donde se debe cumplir que  $m > l$ .

Donde  $m$  es el máximo retardo que se aplica a la señal  $y[n]$  para formar la matriz  $y[n]$  y  $l$  es el número de armónicas presentes en la misma señal.

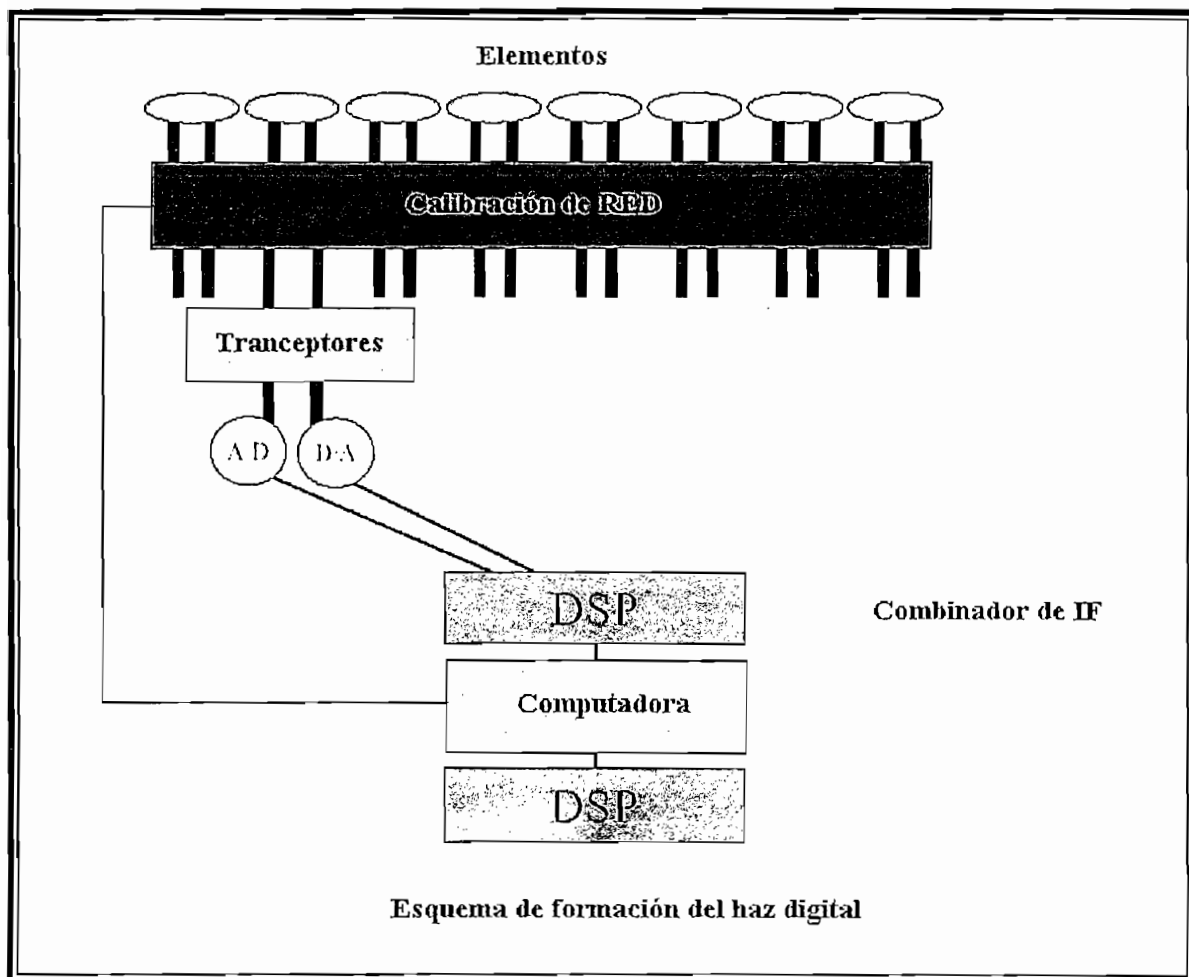
$$y[n] = \begin{bmatrix} y[n] \\ y[n-l] \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ y[n-(m-l)] \end{bmatrix}$$

En MUSIC se desea que  $m$  sea tan grande como se pueda, pero hay que tener cuidado porque no debe acercarse a  $N$  para que el estimado de la matriz de permanezca confiable.

Mediante simulación se llega a demostrar que también en el algoritmo de MUSIC se cumple que un aumento de  $m$  hace ganar en resolución, pero hace perder en confiabilidad estadística. No obstante, la resolución de MUSIC sobrepasa con creces la de los métodos no paramétricos.

*Texto tomado de Prototipo para Estimación de Dirección de Arribo Implementado en Audiofrecuencia de Barrera G. Claudia P., Carrillo C. Paula A., y González L. Álvaro J.*

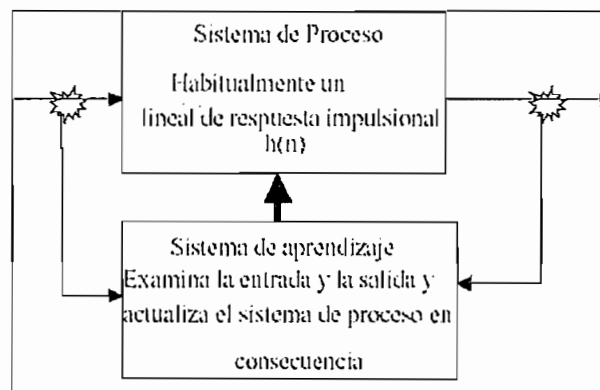
## B.2 ESQUEMA DE LA FORMACIÓN DEL HAZ DIGITAL.



## B.3 ALGORITMOS ADAPTATIVOS

### INTRODUCCION.

En la mayor parte de escenarios en los que se requiere tratamiento de la señal los diseños óptimos dan lugar a una degradación de las prestaciones cuando las condiciones del escenario cambian con el tiempo. El avance en mejores diseños y su extremada dependencia con el espectro o la correlación de las señales a tratar, obliga a prevenirse de la degradación de la calidad si las señales a procesar cambian sus propiedades. De este modo, cuando un sistema de tratamiento de señal es capaz de adaptarse automáticamente al entorno de señal, se dice que este es adaptativo. La arquitectura genérica de un sistema adaptativo será una etapa de proceso (habitualmente un sistema lineal) al que se le superpone una estructura de aprendizaje. La estructura de aprendizaje observa las condiciones e introduce las modificaciones pertinentes en el sistema de proceso.



Arquitectura general de un sistema adaptativo. Se muestra el sistema de proceso y el correspondiente sistema de aprendizaje que, observando entrada y salida, actualiza el sistema que realiza el procesamiento de señal.

El concepto de sistema adaptativo es de uso extendido y de más antigüedad en tratamiento de señal de lo que pudiera parecer. Tal vez, uno de los sistemas adaptativos más antiguos sea el denominado control automático de ganancia de un amplificador. El sistema del proceso es básicamente el amplificador que multiplica la entrada por una determinada ganancia  $g(n)$ :



$$d(n) = g(n)x(n)$$

En este caso la ganancia del sistema del amplificador va a cambiar con el tiempo, se puede ver claramente que el concepto adaptativo no es reciente en sí ha existido, con otro nombre pero el concepto es el mismo.

Es importante destacar que un sistema adaptativo o dotado de aprendizaje, puede aprender que el mejor diseño que puede conseguir es un sistema invariante por lo que no es del todo correcto asociar a los sistemas lineales adaptativos la idea de que siempre se trata de sistemas variantes.

Todos los algoritmos adaptativos necesitan de una señal de referencia, una señal piloto que esta dado por la antena principal.

## B.4 ALGORITMO LMS Y RLS

### ALGORITMO LMS

El algoritmo LMS usa una variable aleatoria en la actualización de los pesos. Este carácter aleatorio impide que el aprendizaje finalice. Incluso cuando el algoritmo alcanzase el mínimo, se puede decir que permanece nervioso, despierto o deseoso de aprender más, moviéndose alrededor del óptimo por si acaso éste cambiase

Un sistema bajo LMS, va a mostrar una fluctuación a su salida, que el usuario de ésta percibirá como ruido y que es debida a que el filtro no presenta un ajuste perfecto a los coeficientes óptimos, dado el carácter aleatorio del instrumento de aprendizaje. Ahora bien, el valor instantáneo hará variar el paso de adaptación y por lo tanto se escoge el promedio.

La cuestión es que este ruido de desajuste, en el caso de ecualización para comunicaciones, hará disminuir la SNR a la salida del ecualizador y podría afectar seriamente a la tasa de error del sistema. De hecho este ruido de desajuste provocara que la potencia del error sea siempre, en media, superior al mínimo.

En términos de inteligencia artificial y considerando a los coeficientes como neuronas, al principio estas colaboran y están en proceso de esperar cambios para retomar el proceso estas evolucionan, alrededor de su valor, de manera independiente, eso si, pendientes de los cambios que pudieran producirse en el escenario para comenzar de nuevo su período de aprendizaje o colaborativo. Se puede decir, que en el proceso de mejora del conocimiento, la búsqueda de nueva información es independiente; mientras que, la asimilación de este es un proceso colaborativo.

El ruido de desajuste será de  $\alpha\%$ . En forma numérica, un alfa de 0.1 equivale a tener un exceso de error o ruido de desajuste del 10%. Existe por tanto un compromiso entre velocidad de adaptación y nivel de desajuste. Esto completa el diseño del LMS.

Con esto se ha indicado la forma correcta de proceder ante cualquier otra regla de aprendizaje, se analiza la velocidad de convergencia, en una colección limitada de iteraciones.

Por último, en fase de seguimiento se ha de determinar el ruido de desajuste, o lo que es lo mismo su velocidad de seguimiento o capacidad de reacción a cambios. Nótese que altas velocidades de convergencia, o aprendizaje rápido, llevan asociados desajustes elevados.

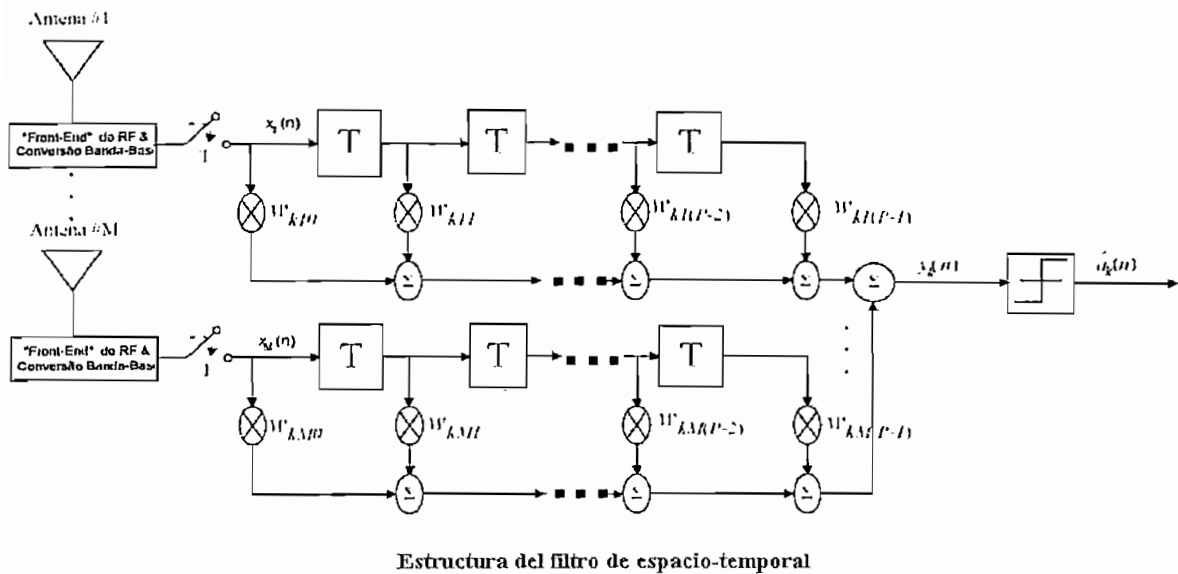
Se puede interpretar que con pasos de adaptación altos se aprende mucho pero el sistema 'medita' poco sobre lo aprendido y esa es la razón de su variación en seguimiento.

### **ALGORITMO RLS**

El algoritmo RLS es sin duda el mejor algoritmo adaptativo para la minimización del MSE, es un algoritmo que recurre a la estimación muestra a muestra. Sus prestaciones no dependen de la dispersión de autovalores. La convergencia es del orden de la longitud del filtro, es decir, para un filtro de  $Q$  coeficientes tarda  $Q$  iteraciones o vectores de datos. Por ello, y siempre que su mayor complejidad lo permita, no tiene rival en la minimización del MSE o en el diseño de filtro de Wiener. De todos modos, su éxito relativo es debido a que, dentro del área de teoría de control, Kalman proporcionó una forma más elegante y formal de presentarlo. No solo esto, sino que, además el filtro de Kalman proporciona más versatilidad a su empleo y por tanto el ámbito de su aplicación es mayor.

El LMS bajo ruido blanco resulta un algoritmo perfecto. Esta es la razón por la que muchos autores recomiendan que si se desea emplear el LMS es muy recomendable blanquear los datos con un predictor lineal. El hecho es que el predictor más el LMS juntos, y ambos adaptativos, acostumbran a tener mayor complejidad que el RLS directamente por lo que el procedimiento mencionado esta prácticamente en desuso.

## B.5 ESQUEMA DEL FILTRO DE ESPACIO-TEMPORAL



## B.6 ALGORITMOS DE MODULO CONSTANTE (CMA)

### FILTRO NO SUPERVISADO O AUTODIDACTA

Algoritmo de modulo constante o CMA: minimiza el error entre el modulo de la señal de salida y el modulo de la señal deseada, no requiere de una señal de referencia ni tampoco es necesario el conocimiento de la DoA de las señales deseadas.

## B.7 MÉTODO DE LA VARIANZA MÍNIMA

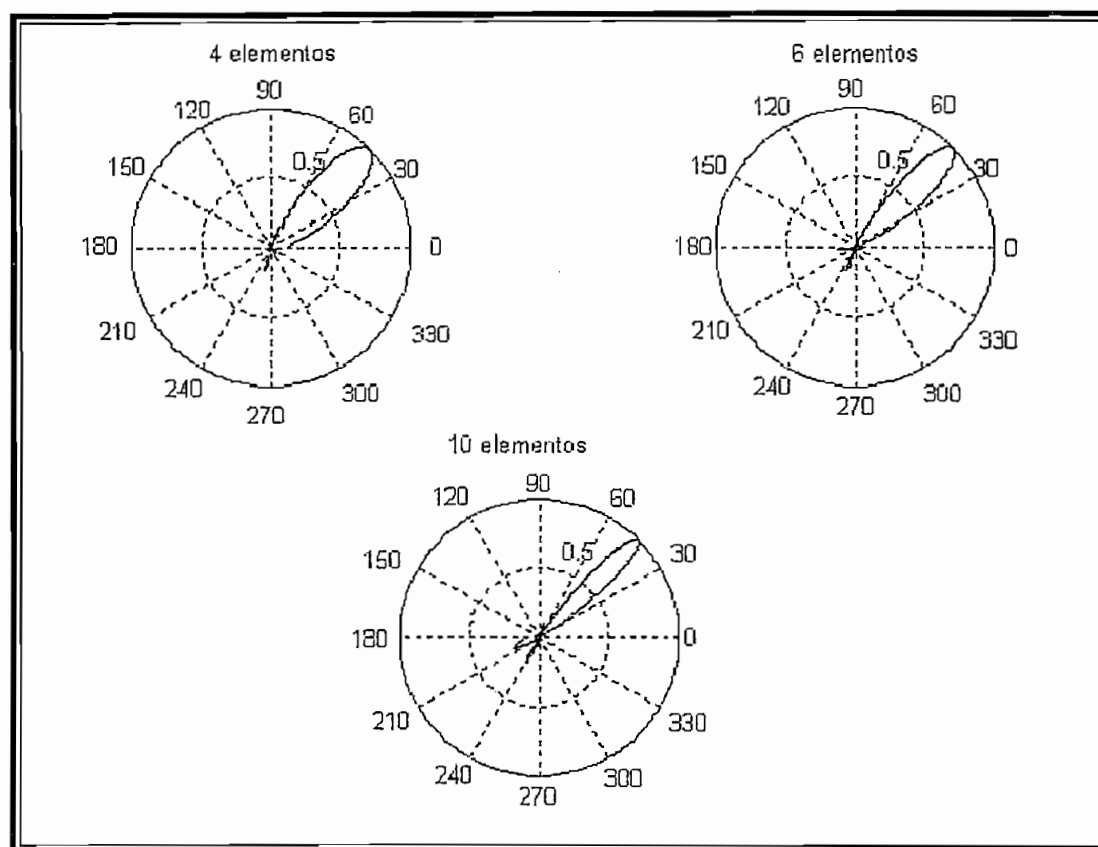
### FILTRO DE VARIANZA MÍNIMA.

No necesita señal de referencia y minimiza directamente el valor cuadrático medio de la señal de salida

## La optimización con restricciones lineales

Los algoritmos de varianza mínima no poseen señales de referencia, pero necesitan del conocimiento de la dirección de llegada DoA de las señales deseadas.

## B.8 PATRÓN DE RADIACIÓN



Patrón de radiación de una arreglo lineal de antenas con elementos omnidireccionales separados media longitud de onda.

El grado inteligencia que estos arreglos pueden obtener será dado en función de los algoritmos que se utilicen.

# ANEXO C

## **ANEXO C**

### **C.1 TECNOLOGÍA WISPER.**

La tecnología Wisper fue creada por Liberty Technologies Corp.; con esta tecnología se ofrece un servicio que consiste en un paquete de servicios de banda ancha con capacidad de ser usado para internet o cualquier transmisión de datos basado en protocolo IP (Internet Protocol) sin necesidad de líneas telefónicas, cableados, o antenas externas.

La tecnología usada por Wisper se basa en "antenas inteligentes" que permiten al usuario tener conexión a velocidades de 128, 256 y 512 kbps.

#### **DEFINICIÓN DEL PRODUCTO**

Esta innovadora red Inalámbrica de Banda Ancha permite al usuario tener la libertad de disponer del servicio de Internet a velocidades nunca antes vistas con estabilidad en la señal, siempre conectado mientras el usuario permanezca en el área de cobertura.

Wisper es una tecnología de Internet de Banda Ancha, sin complicaciones, de instalación inmediata, no necesita conexiones, cables, ni técnicos, además de no ocupar la línea telefónica.

#### **BENEFICIOS DE WISPER**

- Internet de Banda Ancha.
- Sin complicaciones.
- Instalación Inmediata.
- No necesita conexiones, cables, ni técnicos.

- La opción de internet más rápida del mercado.
- No necesita de una línea telefónica.
- Siempre está disponible para navegar.

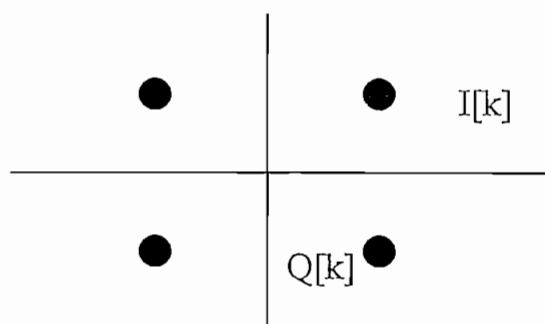
### QUÉ PROBLEMAS RESUELVE WISPER

- El reducir los procesos de instalación.
- El libre acceso de línea telefónica.
- Un internet de banda ancha y mucho más rápido.
- La facilidad de instalación.

### C.2 MODULACIÓN QPSK.

La portadora tiene 4 niveles de señal.

I[k]	Q[k]	$\varphi_k$ (rad.)
-1	-1	$-3\pi/2$
+1	-1	$-\pi/2$
+1	+1	$+\pi/2$
-1	+1	$+3\pi/2$



Modulación QPSK. 2 bits/símbolo.



## **C.3 TECNOLOGÍAS WIRELESS 802.11**

En los últimos años se ha producido un crecimiento espectacular en lo referente al desarrollo y aceptación de las comunicaciones móviles y en concreto de las redes de área local (Wireless LANs).

### **OBJETIVO**

Desde que empezó el crecimiento de las redes LAN se hizo necesario un método para expandir el alcance y la capacidad de la red sin que esto signifique un alto aumento en el costo de la red, su movilidad obligo que la topología de una red sea dinámica, es por eso que la opción a un acceso inalámbrico es una alternativa de gran aceptación en la actualidad

### **REDES INALAMBRICAS**

La norma 802.11 ha sufrido diferentes extensiones sobre la norma para obtener modificaciones y mejoras. De esta manera, tenemos las siguientes especificaciones:

### **ESPECIFICACIONES**

802.11a Estándar de comunicación en la banda de los 5 Ghz.

802.11b Estándar de comunicación en la banda de los 2.4 Ghz.

802.11c Estándar que define las características que necesitan los APs para actuar como puentes (bridges). Ya está aprobado y se implementa en algunos productos.

802.11d Estándar que permite el uso de la comunicación mediante el protocolo.

802.11 en países que tienen restricciones sobre el uso de las frecuencias que éste es capaz de utilizar. De esta forma se puede usar en cualquier parte del mundo.

802.11e Estándar sobre la introducción del QoS en la comunicación entre PAs y TRs. Actúa como árbitro de la comunicación. Esto permitirá el envío de vídeo y de voz sobre IP.

802.11f Estándar que define una práctica recomendada de uso sobre el intercambio de información entre el AP y el TR en el momento del registro a la red y la información que intercambian los APs para permitir la interoperabilidad. La adopción de esta práctica permitirá el Roaming entre diferentes redes.

802.11g Estándar que permite la comunicación en la banda de los 2.4 Ghz, ya descrito.

802.11h Estándar que sobrepasa al 802.11a al permitir la asignación dinámica de canales para permitir la coexistencia de éste con el HyperLAN.

802.11n Es un estándar de las WLAN que no pretende ser mucho más rápido que sus antecesores, sino mucho más eficiente y con un mayor rendimiento que los anteriores estándares.

802.16 es una tecnología de área metropolitana inalámbrica que puede conectar host en 802.11 y provee extensión inalámbrica para acceso de última milla de banda ancha en instalaciones de cable, cubre casi 50 Km. lineales y brinda conectividad de banda ancha inalámbrica sin que exista una línea directa de visión a la estación base la velocidad de datos puede llegar a 70 Mbps.

La tecnología inalámbrica también ofrece excelentes soluciones cuando se necesitan instalaciones de red temporales.

Éstas son algunas de las aplicaciones habituales de las redes WLAN:

- Redes temporales
- Motivos arquitectónicos (leyes urbanísticas, protección de edificios históricos, etc.)
- Aplicaciones móviles- Soluciones de red flexibles
- LAN interconectadas

A menudo, cuando las soluciones de comunicación más tradicionales no pueden aplicarse con tecnologías de cable convencionales, surge la tecnología inalámbrica para hacer realidad lo que parecía casi imposible, con una fácil implantación y una gran rentabilidad.

El estándar 802.11 define varios métodos y tecnologías de transmisión para implantaciones de LAN inalámbricas. Este estándar no sólo engloba la tecnología de radiofrecuencia sino también la de infrarrojos. Asimismo, incluye varias técnicas de transmisión como:

- Modulación por saltos de frecuencia (FHSS)
- Espectro de extensión de secuencia directa (DSSS)
- Multiplexación por división en frecuencias octogonales (OFDM)

La mayoría de los productos WLAN de 11 Mbps utilizan tecnología de RF y se sustentan en DSSS para la comunicación.

DSSS funciona transmitiendo simultáneamente por varias frecuencias diferentes. De esta forma, se incrementa la probabilidad de que los datos transmitidos lleguen a su destino. Además, los patrones de bits redundantes, llamados "chips", se incluyen en la señal. En cualquier momento, se reciben partes de la señal simultáneamente en las distintas frecuencias en el receptor. Para poder recibir y decodificar la señal completa de modo satisfactorio, la estación receptora debe conocer el patrón de descodificación correcto. Realizar el seguimiento y la descodificación de los datos durante la transmisión es extremadamente difícil.

El salto de frecuencia (FHSS), la segunda técnica importante de transmisión de espectro de extensión, es de hecho una señal de banda estrecha que cambia la frecuencia de un modo rápido y continuo.

El inconveniente del DSSS en relación con el FHSS es que más vulnerable a las interferencias de la banda estrecha.

## C.4 OFDM.

Supongamos que  $N$  es el número total de portadoras del sistema,  $f_0$  es la frecuencia de la primera de ellas, y  $T$  es el período de símbolo de cada flujo de datos. Entonces, las frecuencias de las  $N-1$  portadoras restantes vienen dadas por la relación  $f_k = f_0 + k/T$ , con  $k = 1, 2, \dots, N-1$ . Es decir, que la separación entre portadoras adyacentes es de  $1/T$ , el inverso del período de símbolo. La señal recibida en la cabecera es la suma de las  $N$  señales individuales. La separación de  $1/T$  Hz. garantiza la ortogonalidad, y la señal recibida puede ser demultiplexada usando una transformada discreta de Fourier (DFT). La estación de cabecera conoce perfectamente la información relativa a la sincronización y ubicación frecuencial de las portadoras digitales ya que es ella misma la que se la proporciona a todas las unidades de abonado a través del canal descendente.

Las portadoras individuales del sistema OFDM emplean modulación QPSK con pulsos rectangulares, es decir, que el espectro transmitido por cada una de ellas tiene forma de  $\text{sinc}(\pi fT)$ , donde  $T$  es el período de símbolo. La velocidad de transmisión básica es de 16Kbps. Después de esta codificación, la velocidad de transmisión es de 17.36Kpbs, que corresponde a una velocidad de modulación QPSK de 8.68Kbaudios. Un modulador transmitiendo información a 16Kbps utiliza una de las frecuencias que le asigna la cabecera, y la señal que recibe ésta es una señal OFDM compuesta por todas las señales QPSK individuales activas en cada momento. Si el número total de portadoras es  $N=1024$ , podremos tener 1024 abonados transmitiendo información simultáneamente a 16Kbps. El sistema es flexible y permite asignar a un abonado la capacidad que necesite en múltiplos de 16Kbps. A cada abonado se le asigna una capacidad de  $n \times 16\text{Kbps}$ , con  $n = 1, \dots, 128$ . Esto permitiría ofrecer hasta 2Mbps a 8 abonados simultáneos. Los moduladores que necesiten transmitir a un múltiplo de 16Kbps generarán una señal OFDM localmente, mientras que aquellos a los que baste con 16Kbps no necesitarán realizar ninguna transformada rápida de Fourier (FFT) y transmitirán una señal QPSK sin filtrar. El demodulador de cabecera es un demodulador simple en cuadratura seguido de una FFT de  $N$  puntos.

A pesar de que la cabecera conoce y proporciona a las unidades de abonado la información de sincronización, hay ciertas diferencias en la fase de las portadoras

utilizadas por abonados distintos que obligan a realizar ciertos ajustes durante la instalación del sistema de retorno y al empleo de un tiempo de guarda entre símbolos de, por ejemplo, un 10%. Durante la instalación, la cabecera mide los retardos relativos de las señales provenientes de diferentes unidades de abonado y les transmite por el canal descendente la información apropiada para que adelanten o retrasen sus relojes. Esta sincronización no puede ser perfecta, por lo que dentro del período de símbolo hay que incluir un tiempo de guarda. Si la velocidad de modulación es de 8.68 Kbaudios por portadora, entonces  $8680 = 1 / (T + T_{\text{guarda}})$ . Suponiendo  $T_{\text{guarda}} = T/10$ , tenemos que, finalmente,  $T = 104.5 \mu\text{s}$ , lo que supone una separación de  $1/T = 9.56 \text{ KHz}$ . entre portadoras adyacentes. El ancho de banda total empleado por el sistema es de  $N/T = 9.8 \text{ MHz}$ . El canal de retorno en un sistema HFC puede albergar sistemas OFDM con números mayores de portadoras, o varios en paralelo en distintas zonas del espectro.

### Esquemas de portadora única: OFDM

$N$  : número total de portadoras del sistema (2048 ó 8192 según normas DVB)

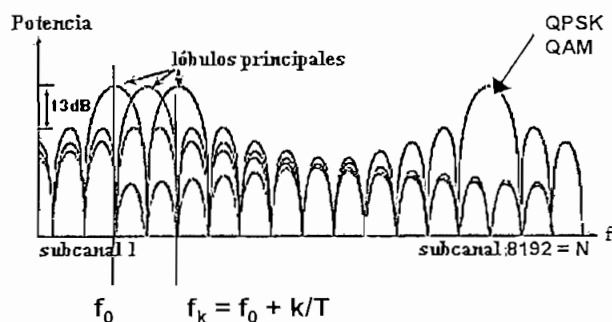
$f_0$  : frecuencia de la primera portadora

$T$  : es el período de símbolo de cada flujo de datos

$f_k = f_0 + k/T$  : frec de la portadora  $k$ ,  
con  $k = 1, 2, \dots, N-1$

$1/T$  : inverso del período de símbolo.

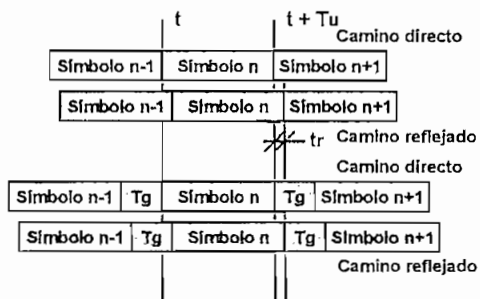
$BW = N/T$  : anchura de la banda de paso



### En la práctica...

Se emplean  $N' < N$  portadoras para que BW sea inferior a la mitad de la frecuencia de muestreo y así simplificar el filtrado de la señal y evitar aliasing durante el muestreo ( $N' = 1706$  ó  $6818$ ).

Además,  $T = T_u + T_g$ , donde  $T_g$  es un tiempo de guarda entre símbolos para evitar ISI debida a propagación multicamino.



Modulación OFDM.

## **C.5 ETHERNET**

Ethernet es una técnica de transmisión de banda base. Se basa en el acceso múltiple por escucha de portadora y detección de colisión de la información dentro del canal de comunicaciones.

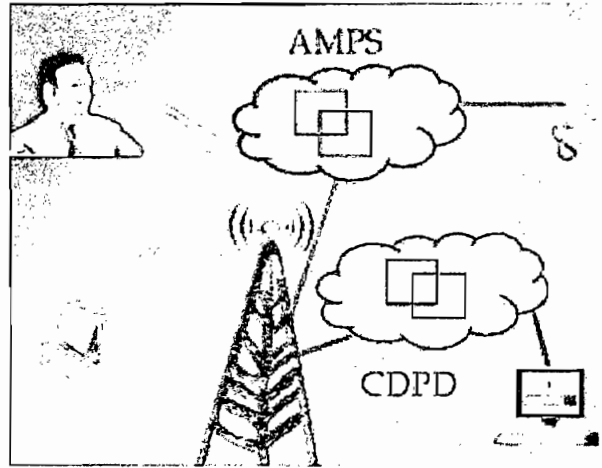
Ethernet es adecuada para aplicaciones donde un medio de comunicaciones local debe transportar esporádicamente tráfico pesado y con altas velocidades de transmisión.

## **C.6 CDPD**

### **CELLULAR DIGITAL PACKET DATA**

CDPD es un servicio de paquetes de datos abierto, definido como una red sobrepuesta autónoma, especificada por la red celular TDMA. El sistema de Ericsson CDPD, esta diseñado para la integración con una red celular existente TDMA/AMPS. Mediante el rehúso de un espectro de frecuencia celular, planeación de celdas, equipo de poder, equipo de sitio RBS, conexión de transporte y un sistema de antena, CDPD puede ser desarrollado rápida y económicamente en cualquier lugar que el servicio celular sea disponible sin la necesidad de implementar una completa y nueva red de datos móviles.

CDPD es uno de las soluciones de datos inalámbricos más económicas y de mayor eficiencia de costos disponibles en la actualidad. Ninguna otra tecnología desarrollada en la actualidad entrega una solución siempre en línea y de paquetes de switch con datos inalámbricos demandado por los usuarios de Internet Móvil.



# **ANEXO D**



## ANEXO D

### GLOSARIO DE TÉRMINOS

AA:	ADAPTIVE ARRAY (ARREGLO ADAPTATIVO)
A/D:	ANALOG TO DIGITAL (CONVERSION ANALÓGICO A DIGITAL)
AM:	AMPLITUDE MODULATED (AMPLITUD MODULADA)
AMPS:	ADVANCED MOBILE PHONE SERVICE (SERVICIO TELEFÓNICO MÓVIL AVANZADO)
ANSI:	AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE (INSTITUTO AMERICANO DE ESTÁNDARES NACIONALES)
AP:	ACCESS POINT (PUNTOS DE ACCESO)
BER:	BIT ERROR RATE (TASA DE BITS ERRADOS)
BSC:	BASE STATION CONTROLLER (CONTROL DE ESTACIÓN BASE)
BTS:	BASE TRANSCIVER STATION (ESTACIONES BASE TRANCEPTORA)
CAP:	CENTRAL ACCESS POINT (PUNTO DE ACCESO CENTRAL)
CDMA:	CODE DIVISION MULTIPLE ACCESS (ACCESO MÚLTIPLE POR DIVISIÓN DE CÓDIGO)
CDPD:	CELLULAR DIGITAL PACKET DATA (DATOS DE PAQUETES DIGITALES CELULARES)
C/I:	CARRIER TO INTERFERENCE RATIO (RELACIÓN PORTADORA A INTERFERENCIA)
CMA:	CONSTANT MODULUS ALGORITHM (ALGORITMO DE MÓDULO CONSTANTE)
D/A:	DIGITAL TO ANALOG (CONVERSION DIGITAL A ANALÓGICO)
DB:	DECIBEL (DECIBELIO)
DCS:	DIGITAL COMMUNICATIONS SYSTEM (SISTEMA DIGITAL DE COMUNICACIONES)
DECT:	DIGITAL ENHANCED CORDLESS TELEPHONY (TELEFONÍA DIGITAL INALÁMBRICA MEJORADA)
DFT:	DISCRETE FOURIER TRANSFORM (TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER)

DoA:	DIRECTION OF ARRIVAL (ALGORITMO DE ESTIMACIÓN DE LLEGADA)
DSP:	DIGITAL SIGNAL PROCESSOR (PROCESADOR DIGITAL DE SEÑALES)
DSSS:	DIRECT SEQUENCE SPREAD SPECTRUM (ESPECTRO EXPANDIDO DE SECUENCIA DIRECTA)
DTFT:	DISCRETE TIME FOURIER TRANSFORM (TRANSFORMADA DE FOURIER EN TIEMPO DISCRETO)
EDGE:	ENHANCED DATA RATES FOR GSM EVOLUTION (EVOLUCIÓN PARA AUMENTAR LA VELOCIDAD DE DATOS PARA GSM)
EIA:	ELECTRONIC INDUSTRIES ASSOCIATION (ASOCIACIÓN DE INDUSTRIAS ELECTRÓNICAS)
EWf:	ELECTRONIC WARFARE (GUERRA ELECTRÓNICA)
FCC :	FEDERAL COMMUNICATIONS COMMISSION (COMISIÓN FEDERAL DE COMUNICACIONES)
FDD:	FREQUENCY DIVISION DUPLEX (DOBLE DIVISIÓN DE FRECUENCIA)
FDMA:	FREQUENCY DIVISION MULTIPLE ACCESS (ACCESO MÚLTIPLE POR DIVISIÓN DE FRECUENCIA)
FFT:	FAST FOURIER TRANSFORM (TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER)
FHSS:	FREQUENCY HOP SPREAD SPECTRUM (ESPECTRO EXPANDIDO CON SALTO DE FRECUENCIA)
IF:	INTERMEDIATE FREQUENCY (FRECUENCIA INTERMEDIA)
FIR:	FINITE IMPULSE RESPONSE (RESPUESTA AL IMPULSO FINITA)
FM:	FREQUENCY MODULATED (FRECUENCIA MODULADA)
GHz:	GIGA HERTZ
GPRS:	GENERAL PACKET RADIO SERVICE (SERVICIO GENERAL DE PAQUETES VÍA RADIO)
GPS:	GLOBAL POSITIONING SYSTEM (SISTEMA DE POSICIÓN GEOGRÁFICA)
GSM:	GLOBAL SYSTEM FOR MOBILE COMMUNICATIONS (SISTEMA GLOBAL DE COMUNICACIONES MÓVILES)
HF:	HIGH FREQUENCY (ALTA FRECUENCIA)
HSCSD:	HIGH SPEED CIRCUIT SWITCHED DATA (CIRCUITOS DE DATOS CONMUTABLES A ALTA VELOCIDAD)
HSR:	HIGH SENSITIVITY RECEIVER (RECEPTOR DE ALTA SENSIBILIDAD)
IEEE:	INSTITUTE ELECTRIC AND ELECTRONIC ENGINEERS (INSTITUTO DE INGENIEROS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS)

IFFT:	INVERSE FAST FOURIER TRANSFORM (TRASFORMADA INVERSA RÁPIDA DE FOURIER)
IP:	INTERNET PROTOCOL (PROTOCOLO DE INTERNET)
LAN:	LOCAL AREA NETWORK (RED DE ÁREA LOCAL)
LCMV:	LINEAL CONSTRAINT MINIMUM VARIANCE (MÍNIMA VARIANZA CON RESTRICCIÓN LINEAL)
LMS:	LEAST MINIMUM SQUARES (ALGORITMO DE MÍNIMO VALOR POSIBLE)
LS:	LEAST SQUARES (MÍNIMO CUADRADO)
LS-CMA:	LEAST SQUARES CONSTANT MODULUS ALGORITHM (EXTENSIÓN NO LINEAL DEL LS QUE APROVECHA LAS CARACTERÍSTICAS DEL ALGORITMO CMA)
MAXSNR:	MAXIMIZATION OF SIGNAL TO NOISE RATIO (MAXIMIZA LA SNR)
MHz:	MEGA HERTZ
MIMO:	MULTIPLE INPUT/MULTIPLE OUTPUT (MÚLTIPLE ENTRADA Y MÚLTIPLE SALIDA)
MM:	MOBILITY MANAGEMENT (GESTIÓN DE MOVILIDAD)
MMSE:	MINIMUM MEAN SQUARE ERROR (MÍNIMO ERROR CUADRÁTICO MEDIO)
MSC:	MOBILE SWITCHING CENTER (CENTRO DE CONMUTACIÓN EN REDES MÓVILES)
MT:	MOBILE TERMINAL (TERMINAL MÓVIL)
MUSIC:	MULTIPLEX SIGNAL CLASSIFICATION (CLASIFICACIÓN DE MÚLTIPLES SEÑALES)
OFDM:	ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLEXING (MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN EN FRECUENCIAS OCTOGONALES)
PA:	DYNAMICALLY PHASED ARRAY OR PHASE ARRAY (ARREGLO EN FASE)
PB-ABFMA:	POLLING-BASED ADAPTIVE BEAMFORMING FOR MULTIPLE ACCESS PROTOCOL (PROTOCOLO DE ACCESO MÚLTIPLE PARA LA CONFORMACIÓN DEL HAZ ADAPTATIVO Y UNA ESTACIÓN BASE CENTRAL)
PC:	PERSONAL COMPUTER (COMPUTADOR PERSONAL)
PCS:	PERSONAL COMMUNICATION SERVICE (SERVICIO DE COMUNICACIÓN PERSONAL)
PDA:	PERSONAL DIGITAL ASSESSMENT (ASISTENTES DIGITALES PERSONALES)
PDC:	PERSONAL DIGITAL COMMUNICATION (COMUNICACIÓN DIGITAL PERSONAL)
QoS:	QUALITY OF SERVICE (CALIDAD DE SERVICIO)

QPSK:	QUADRATURE PHASE SHIFT KEYING (MODULACIÓN DIGITAL DE FASE EN CUADRATURA)
RBS:	RADIO BASE STATION (ESTACIÓN DE RADIO BASE)
ISDN:	INTEGRATED SERVICE DIGITAL NETWORK (RED DIGITAL DE SERVICIOS INTEGRADOS)
RF:	RADIO FREQUENCY (FRECUENCIA DE RADIO)
RFID:	RADIO FREQUENCY IDENTIFICATION (IDENTIFICACIÓN POR RADIOFRECUENCIA)
RLS:	RECURSIVE LEAST SQUARES (ALGORITMO DE MÍNIMOS CUADRADOS RECURSIVOS)
RRC:	RADIO RESOURCES CONTROL (CONTROL DE LOS RECURSOS RADIO)
SAS:	SMART ANTENNA SYSTEM (SISTEMAS DE ANTENAS INTELIGENTES)
SDMA:	SPATIAL DIVISION MULTIPLE ACCESS (ACCESO MÚLTIPLE POR DIVISIÓN ESPACIAL)
SEBI:	SISTEMA DE ESTACIÓN BASE INTELIGENTE (INTELLIGENT BASE STATION SYSTEM)
SFIR:	SPATIAL FILTERING INTERFERENCE REJECTION (RECHAZO DE INTERFERENCIAS POR FILTRADO ESPACIAL)
SIM:	SUBSCRIBER IDENTIFICATION MODULE (MÓDULO DE IDENTIFICACIÓN DEL SUSCRIPTOR)
SINR:	SIGNAL TO INTERFERENCE AND NOISE RATIO (RELACIÓN SEÑAL A RUIDO MÁS INTERFERENCIA)
SIR:	SIGNAL TO INTERFERENCE RATIO (RELACIÓN SEÑAL A INTERFERENCIA)
SISO:	SINGLE-INPUT-SINGLE-OUTPUT (SIMPLE ENTRADA Y SIMPLE SALIDA)
SL:	SWITCHED LOBE (HAZ CONMUTABLE)
SLB:	SIDELobe BLANKING ANTENNA (ANTENA PARA PONER BLANCOS CERCA DEL LÓBULO)
SLC:	SIDELobe CANCELLER ANTENNA (ANTENA PARA PONER CEROS CERCA DEL LÓBULO)
SLL:	SIDE LOBE LEVEL (NIVEL DEL LÓBULO LATERAL)
SMS:	SHORT MESSAGES SYSTEM (SISTEMAS DE MENSAJES CORTOS)
SNR:	SIGNAL TO NOISE RATIO (RELACIÓN SEÑAL A RUIDO)
TACS:	ADVANCE COMMUNICATION TECHNOLOGIES AND SERVICES (TECNOLOGÍAS Y SERVICIOS MÓVILES AVANZADOS DE COMUNICACIONES)

TDD:	TIME DIVISION DUPLEX (DOBLE DIVISIÓN DE TIEMPO)
TDMA:	TIME DIVISION MULTIPLE ACCESS (ACCESO MÚLTIPLE POR DIVISIÓN DE TIEMPO)
TPC:	TRANSMIT POWER CONTROLLER (CONTROL DE POTENCIA TRANSMITIDA)
TR:	REMOTE TERMINAL (TERMINALES REMOTOS)
TRB:	TEMPORAL REFERENCE BEAMFORMING (REFERENCIA TEMPORAL DEL CONFORMADOR DE HAZ)
UHF:	ULTRA HIGH FREQUENCY (ULTRA ALTA FRECUENCIA)
UMTS:	UNIVERSAL MOBILE TELECOMMUNICATION SYSTEM (SISTEMA UNIVERSAL DE TELECOMUNICACIONES MÓVILES)
WAP:	WIRELESS ACCESS POINT (PUNTOS DE ACCESO INALÁMBRICOS)
VHF:	VERY HIGH FREQUENCY (MUY ALTA FRECUENCIA)
WLAN:	WIRELESS LOCAL AREA NETWORK (RED DE ÁREA LOCAL INALÁMBRICA)
WLL:	WIRELESS LOCAL LOOP (LAZO LOCAL INALÁMBRICO)