



**UNIVERSIDAD DEL AZUAY**

**FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**“ESTUDIO SOBRE LAS PRESTACIONES DE ANTENAS  
INTELIGENTE EN SISTEMAS DE COMUNICACIONES  
MÓVILES DE TERCERA GENERACIÓN (UMTS).”**

**Trabajo de graduación previo a la obtención del título de  
Ingeniero Electrónico**

**Autoras**

**Ana Isabel Zhinín Morales.**

**Ruth Paola Zúñiga Ortega.**

**Director**

**Ing. Edgar Pauta.**

**Cuenca - Ecuador**

**2010**

## DEDICATORIA

**Ysabel...**

*Este trabajo de especialización representa un esfuerzo por superarme tanto en mi vida profesional como en la personal, la dedico muy especialmente con todo mi amor a mi mamá, quien me ha enseñado con su ejemplo a rebasar todas las barreras que la vida nos presenta, a querer ser mejor cada día, a entender que no hay nada imposible y que sólo hay que esmerarse y sacrificarse, si es necesario, para lograr las metas que nos planteamos.*

Para mis hijos hermosos Daniel y Julián  
y mi Esposo quien ha sabido comprenderme  
y apoyarme siempre.

**Ruth**

## AGRADECIMIENTOS

### **Ysabel...**

*En primer lugar agradecer a Dios y a mis padres, por haberme entregado cada día su apoyo incondicional que me ha servido en el cumplimiento de todas mis metas personales, como ésta. Gracias por brindarme la oportunidad de llegar donde ahora me encuentro.*

*Agradecer también a mis hermanos Bertha, Hilda, Margarita, Carlos y Verónica, por su apoyo y preocupación constante, inspirándome cada día a estudiar más y ser mejor en lo que hago diariamente.*

*Por último, agradecer a cada uno de los profesores y al personal de la Facultad de Ciencia y Tecnología, por todos los conocimientos y servicios aportados, en este camino universitario.*

*Gracias de todo corazón.*

A mis padres y hermana que me brindaron su comprensión y me impulsaron a seguir, y a mi tío que ha sido pilar fundamental en la culminación de esta etapa.

**Ruth**

## **RESUMEN**

Los principales tópicos que incluye esta tesis son: antenas básicas y los sistemas inteligentes o antenas inteligentes.

Los principales tipos de antenas básicas se resumen en los primeros capítulos. La segunda parte se refiere al análisis de las antenas inteligentes considerando que estas se basan en las antenas básicas; además se incluyen otros aspectos como: técnicas de manejo, ventajas, desventajas y otras características.

La teoría de las antenas se demuestra utilizando un simulador llamado “Antenas”. Este modela los patrones de radiación de cada antena. Los resultados modelados en el simulador son analizados en el capítulo 5.

## **ABSTRACT**

Two main topics are included in this thesis: basic antennas and “smart” antennas. Basic antennas, principles types, and other aspects are resumed in former chapters. The second part is referred to “smart” antennas considering they are based on basic antennas; additional issues are included, such as: driving techniques, advantages, disadvantages, and other aspects.

The antenna’s theory is demonstrated using Antenna’s Pattern Simulator software, namely “Antenas”. Modeling results are analyzed in chapter five.

## INDICE DE CONTENIDOS

Dedicatoria.....	ii
Agradecimientos.....	iv
Resumen.....	vi
Abstract.....	vii
Índice de contenidos.....	viii
Índice de tablas.....	xii
Índice de gráficos .....	xiii
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>

### **CAPITULO 1: CONSIDERACIONES GENERALES DE ANTENAS**

1.1 Introducción.....	2
1.2 Teoría de Antenas.....	4
1.3 Definiciones Importantes.....	5
1.4 Antenas Elementales.....	10
1.4.1 Dipolo Elemental.....	10
1.4.2 Dipolo.....	14
1.4.3 Dipolo en $\lambda/2$ .....	16
1.4.4 Antenas Omnidireccionales.....	16
1.4.4 .1 Antena Isotrópica.....	16
1.4.4 .2 Antenas Omnidireccionales Reales.....	17
1.4.5 Antenas Direccionales.....	17
1.4.5.1 Antena direccional normal.....	18

### **CAPITULO 2: ANTENAS INTELIGENTES**

2.1 Introducción.....	20
2.2 Tecnología de Antenas Inteligentes.....	22
2.2.1 Antenas Adaptativas.....	23
2.2.2 Formación de Lóbulos ( <i>Beamforming</i> ).....	24
2.2.2.1 Matriz de Butler.....	25

2.2.3 Dirección de llegada (DoA).....	30
2.3 Funcionamiento de las Antenas Inteligentes.....	31
2.3.1 Tipos de Alcances.....	32
2.4 Niveles de Inteligencia de las Antenas .....	36
2.4.1 Haz Conmutado (Switched Beam).....	36
2.4.1.1 Elementos de un Sistema de Haz Conmutado.....	37
2.4.1.2 Configuración – Haz Conmutado.....	40
2.4.1.3 Funcionamiento – Haz Conmutado.....	42
2.4.2 Haz de Seguimiento ( <i>Scanning</i> ).....	44
2.4.2.1 Elementos de un sistema de haz de seguimiento.....	45
2.4.2.2 Sistemas de Detección de DoA para Haz de Seguimiento.....	46
2.4.2.3 Funcionamiento - Haz de Seguimiento.....	47
2.4.3 Haz Adaptativo.....	49
2.4.3.1 Funcionamiento – Haz Adaptativo.....	52
2.5 Configuración de una Antena Inteligente.....	54
2.6 Beneficios de la tecnología de antenas inteligentes.....	55
2.7 Aplicación de Antenas Inteligentes en Tecnología UMTS.....	58
2.7.1 Antenas Inteligentes en SDMA (Acceso Múltiple por División Espacial)	
.....	59
2.7.2 Antenas Inteligentes en CDMA (Acceso Múltiple por División Código)	
.....	60
2.8 El Aporte de las Antenas Inteligentes.....	61

### **CAPITULO 3: CARACTERIZACION ESPACIAL DEL CANAL RADIO**

3.1 Introducción.....	63
3.2 Canal de Radio.....	64
3.2.1 Modelado de la propagación radio.....	64
3.3 Principales fenómenos físicos que explican la propagación radio.....	65
3.4 Componentes del modelo de canal radio.....	66
3.4.1 Pérdidas por propagación.....	66
3.5 Caracterización de canales radio móviles.....	70
3.5.1 Tasas altas de error.....	70

3.5.2 Ancho de Banda reducido.....	71
3.6 Modelos para la caracterización del canal de radio en comunicaciones.....	73
3.6.1 Propagación multitrayectoria y desvanecimiento a pequeña escala.....	74
3.6.1.1 Factores físicos en un canal macro y micro célula.....	75
3.6.2 Respuesta al impulso de un canal multitrayectoria.....	77
3.6.3 Canal multitrayectoria.....	78
3.7 Estadística aplicada para modelar el desvanecimiento del canal.....	80

**CAPITULO 4: ARRAY DE ANTENAS EN COMUNICACIONES MOVILES.**

4.1 Introducción.....	82
4.2 Definición de Arreglos de Antenas.....	83
4.3 Elementos de un arreglo.....	84
4.4 Definición de Términos en Arreglos de Antenas.....	85
4.4.1 Posición de la Fase.....	85
4.4.2 Patrón de Radiación.....	85
4.4.3 Posición en Fase de los Elementos.....	86
4.4.4 Directividad.....	87
4.4.5 Directividad e Interferencia.....	87
4.5 Clasificación de los Arreglos.....	89
4.5.1 Arreglos Lineales.....	90
4.5.1.1 Factor de Arreglo.....	91
4.6 Arreglos Omnidireccionales y Direccionales.....	92
4.6.1 Antena Omnidireccional en Comunicaciones Móviles.....	92
4.6.2 Antena Direccional en Comunicaciones Móviles.....	93
4.7 Arreglo de Antenas en Fase.....	93
4.8 Arreglos de Antenas Adaptativas.....	95
4.9 Arreglos de dos antenas isotrópicas.....	97
4.10 Multiplicación de Patrones de Radiación.....	102
4.10.1 Con Antenas Isotrópicas.....	103
4.10.2 Con Antenas Dipolo Reales.....	105

**CAPITULO 5: CUADRO COMPARATIVO ENTRE ANTENAS CONVENCIONALES Y ANTENAS INTELIGENTES CON SUS JUSTIFICACIONES.**

5.1 Introducción..... 108  
5.2 Planteamiento de la comparación..... 108  
5.3 Diagramas de Radiación en Análisis..... 109

**CAPÍTULO 6: SOFTWARE DEMOSTRATIVO DE LAS VENTAJAS DE ANTENAS INTELIGENTES.**

6.1 Introducción..... 116  
6.2 Simulador de Diagramas de radiación “Antenas”..... 117  
6.3 Pantalla Principal..... 119  
6.4 Opcion 1: Antenas Dipolo..... 119  
6.5 Segunda Opcion: Arreglos Isotropicos..... 127  
6.6 Tercera Opcion: ARREGLOS LES (*Linear Equally Spaced*) ISOTRÓPICOS  
..... 129  
6.7 Cuarta Opcion: ARREGLOS LES (*Linear Equally Spaced*) REALES  
..... 131  
6.8 Quinta Opción: ANTENAS INTELIGENTES..... 133

**CONCLUSIONES..... 138**  
**RECOMENDACIONES..... 140**  
**BIBLIOGRAFÍAS..... 141**

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1:	
Ecuaciones generales de campo.....	13
Tabla 1.2:	
Ecuaciones generales de campo lejano.....	13
Tabla 2.1:	
Desfase de cada elemento matriz de Butler 4 antenas.....	26
Tabla 2.2:	
Desfase de cada elemento matriz de Butler 8 antenas.....	28
Tabla 2.3.1:	
Desfase de cada elemento matriz de Butler 16 antenas (8 primeros puertos).....	29
Tabla 2.3.2:	
Desfase de cada elemento matriz de Butler 16 antenas (8 últimos puertos).....	29
Tabla 3.1:	
Dispersión temporal.....	78
Tabla 5.1:	
Cuadro Comparativo entre antenas.....	113
Tabla 5.2:	
Comparación del # de lóbulos principales.....	112

## INDICE DE GRAFICOS

Figura 1.1: Antena - dispositivo de transmisión.....	3
Figura 1.2: Campos magnéticos creados por la corriente que circula en un elemento metálico.....	4
Figura 1.3: Dirección de campos magnéticos, eléctrico y de propagación.....	5
Figura 1.4: Polarización vertical.....	5
Figura 1.5: Polarización horizontal.....	6
Figura 1.6 Sistema de Coordenadas para el análisis de antenas.....	7
Figura 1.7. Diagrama tridimensional de una antena en los plano E y H.....	7
Figura 1.8. Diagrama polar.....	9
Figura 1.9. Lóbulos del diagrama polar.....	9
Figura 1.10. Antena Dipolo.....	10
Figura 1.11. Radiación de la Antena Dipolo.....	11
Figura 1.12. Patrones de radiación de la Antena Dipolo.....	11
Figura. 1.13. Patrones Horizontal y Vertical.....	12
Figura. 1.14. Dipolo ubicado en el espacio y las componentes de campo en un punto p de referencia.....	12
Figura 1.15: Dipolo alimentado en su centro con una distribución sinusoidal de corriente y su equivalente monopolo.....	14
Figura 1.16: Antena Isotrópica.....	16
Figura 1.17: Antena omnidireccional real.....	17
Figura 1.18: Radiación - Antena Direccional.....	18
Figura 1.19: Antena Direccional.....	18
Figura 2.1. Esquema del entorno de una antena inteligente.....	23
Figura. 2.2. Esquema de una antena inteligente.....	23
Figura 2.3: Configuración de la Matriz de Butler.....	25
Figura 2.4: Diagramas de radiación de cada puerto.....	27
Figura 2.5 Desfase de cada elemento matriz de Butler 8 antenas.....	28
Figura 2.6 Desfase de cada elemento matriz de Butler 16 antenas.....	29
Figura 2.7 Tipos de Alcance de las Antenas.....	33
Figura 2.8. Vista de un lóbulo.....	33
Figura 2.9 Recepción de la Señal.....	34

Figura 2.10 Antena Adaptativa.....	35
Figura 2.11 Diagrama de antena normal e inteligente.....	36
Figura 2.12. Antena de Haz Conmutado.....	37
Figura 2.13. Acoplador Direccional.....	38
Figura 2.14. Híbrido 3dB-90°.....	38
Figura 2.15. Switch de microonda.....	39
Figura 2.16. Resolución del Haz.....	40
Figura 2.17. Configuración – Haz Conmutado.....	41
Figura 2.18. a) diagrama de control de antena haz conmutado. b) zona de cobertura.....	42
Figura 2.19: Representación de un Antena de Haz Conmutado.....	43
Figura 2.20: Antena de Haz de Seguimiento.....	48
Figura 2.21: Diagrama de control – Haz de Seguimiento.....	48
Figura 2.22: Radiación - Antena de Haz Adaptativo.....	49
Figura 2.23: Antena de Haz Adaptativo.....	49
Figura 2.24: Sistema de arreglo Adaptativo.....	50
Figura 2.25: Programa de control sistema Adaptativo.....	53
Figura 2.26. Configuración de una Antena Inteligente.....	54
Figura 2.27: Rango de extensión usando SA.....	56
Figura 2.28: Reducción de interferencia.....	57
Figura 2.29: Analogía con el oído humano.....	62
Figura 3.1: Servicios de transmisión de datos.....	63
Figura 3.2: Fenómenos físicos en la propagación de la señal.....	65
Figura 3.2.1 Componentes del modelo de canal radio.....	66
Figura 3.3. Propagación de la Señal Multitrayecto.....	66
Figura 3.4. Problemas en Señales de Multitrayecto.....	67
Figura 3.5. Desvanecimiento.....	67
Figura 3.6. Atenuación de la Señal recibida debido al desvanecimiento.....	68
Figura 3.7. Cancelación Completa de la Señal.....	68
Figura 3.8. Colisión de bit en una Transmisión Digital.....	68
Figura 3.9. Interferencia Co-Canal.....	69
Figura 3.10: Sistema inteligente.....	74
Figura 3.10.1 Estructura jerárquica de celdas.....	75

Figura 3.10.2 Estructura jerárquica de celdas.....	76
Figura.4.1 Array.....	82
Figura 4.1.2 Posición en fase de la antena en el espacio.....	85
Figura 4.2 Posición en fase de elementos conectados.....	86
Figura 4.3 Directividad e interferencia.....	88
Figura 4.4 Antena única versus arreglo.....	88
Figura 4.5 Clasificación de los Arreglos.....	89
Figura 4.6 Antena única vs. Arreglo.....	90
Figura 4.7 Representación de un Arreglo de fase lineal.....	95
Figura 4.8 Concepto de un arreglo adaptativo.....	95
Figura 4.8.1 Concepto de un arreglo adaptativo.....	96
Figura 4.9 Sistema de dos antenas isotrópicas.....	97
Figura 4.10 Radiación de 2 antenas isotrópicas desfasadas.....	100
Figura 4.11 Radiación de 2 antenas isotrópicas desfasadas 45°.....	101
Figura 4.12 Radiación de 2 antenas isotrópicas desfasadas 45°, $d = \frac{1}{4} \lambda$ .....	101
Figura 4.13 Arreglo de 8 elementos isotrópicos en condición <i>broadside</i> .....	103
Figura 4.15 Radiación de 2 antenas isotrópicas, $d = \lambda$ .....	104
Figura 4.16 Radiación de 2 antenas isotrópicas, $d = 2\lambda$ .....	104
Figura 4.16.1: 2 antenas dipolo.....	105
Figura 4.17 Diagrama de 2 antenas isotrópicas sobre el eje z.....	105
Figura 4.17.1: ubicación de 2 antenas dipolo.....	106
Figura 4.18 Diagrama de 2 antenas isotrópicas sobre el eje x-z.....	106
Figura 4.19 Multiplicación de Diagramas.....	106
Figura 5.1 Diagrama de radiación del sistema adaptativo.....	114
Figura 6.1: Pantalla principal del simulador.....	119
Figura 6.2: Pantalla de opciones – antena dipolo.....	119
Figura 6.3: Pantalla del gráfico y cálculo.....	125
Figura 6.4: Pantalla del menú – máximos.....	125
Figura 6.5: Pantalla del menú – ceros.....	126
Figura 6.6: Pantalla del menú – cálculo.....	126
Figura 6.7: Pantalla para el cálculo del valor del campo a un cierto ángulo.....	127
Figura 6.7.1: Pantalla para el cálculo del valor de $\lambda$ y $\beta$ .....	127

Figura 6.8: Pantalla principal – arreglos isotrópicos.....	128
Figura 6.8.1: Mínimos y nulos de radiación.....	129
Figura 6.9: Pantalla de opciones del menú – arreglos LES.....	129
Figura 6.10 Pantalla para diferentes arreglos LES reales.....	131
Figura 6.11: Pantalla para ingreso de datos.....	132
Figura 6.12. Presentación de diagramas de arreglos LES reales.....	132
Figura 6.13. Pantalla principal de sistemas inteligentes.....	133
Figura 6.14. Pantalla de ingreso de datos – hace fijos.....	134
Figura 6.15. Pantalla de cálculos disponibles – hace fijos.....	134
Figura 6.16. Pantalla de simulación – hace conmutados.....	135
Figura 6.17. Pantalla principal – antenas adaptativas.....	135
Figura 6.18. Pantalla de respuesta – antenas adaptativas.....	136
Figura 6.19. Pantalla de opción de Ayudas.....	136

Zhinin Morales Ana Isabel  
Zúñiga Ortega Ruth Paola  
Trabajo de Graduación  
Ing. Edgar Pauta Astudillo.  
Enero del 2010

***“ESTUDIO SOBRE LAS PRESTACIONES DE ANTENAS INTELIGENTE EN SISTEMAS DE COMUNICACIONES MÓVILES DE TERCERA GENERACIÓN (UMTS).”***

**INTRODUCCIÓN**

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

La tecnología de antenas inteligentes se presenta como una alternativa viable frente a otras soluciones como es el aumento en la densidad de estaciones base por área de servicio. El empleo de esta novedosa tecnología permitirá no sólo aumentar la capacidad, sino también mejorar la calidad de la señal, incrementar el alcance, aumentar el nivel de seguridad e incluso introducir nuevos servicios aprovechando las características particulares de este tipo de antenas.

En este trabajo de Tesis se detallan aspectos relativos a las antenas en los sistemas de comunicación continuando con la formación de sistemas inteligentes o antenas inteligentes, para lo cual la metodología empleada consiste en una investigación bibliográfica acerca del tema.

El alcance del trabajo incluye temas generales como la descripción de antenas, los tipos de antenas y su funcionamiento básico. Contempla además, temas específicos

relativos a las antenas inteligentes, tales como las técnicas utilizadas, utilidad, ventajas, desventajas y factores considerados para su uso. Finalmente, se describen los tres tipos de antenas inteligentes, a saber: antenas inteligentes de haz conmutado, antenas inteligentes de haz de seguimiento y antenas inteligentes de haz adaptivo.

Es claro mencionar que la solución más eficaz para el desarrollo de la tercera generación de telefonía móvil es el uso de este tipo de antenas. Aunque la inversión inicial pueda resultar de alto costo, dependiendo de la configuración que se desee se tendrá una plena confianza que el sistema responderá eficazmente solventando los problemas actuales en lo que a telefonía móvil se refiere.

## CAPITULO 1

### CONSIDERACIONES GENERALES DE ANTENAS

#### 1.1 Introducción

Una Antena es un elemento que convierte la energía eléctrica de alta frecuencia, entregada por el transmisor, en ondas electromagnéticas que pueden viajar por el espacio, llevando la información hacia uno o varios receptores. Las antenas son utilizadas a partir de los primeros experimentos sobre la transmisión inalámbrica de ondas electromagnéticas realizadas por Hertz, luego las investigaciones continuaron con los experimentos de Marconi y Popov, que desarrollaron las primeras tecnologías sobre este importante aspecto de las radiocomunicaciones.

Una antena es básicamente un pedazo de material conductor que está conectado al transmisor. Este conductor es generalmente un alambre de cobre o una varilla de aluminio, material muy utilizado debido a su buena resistencia y bajo peso. Para que una antena cumpla su función correctamente, debe tener un determinado tamaño, forma y estar construida con materiales especiales; la transmisión de información, básicamente se da a través de un medio físico (cables o fibra óptica) o la atmósfera.

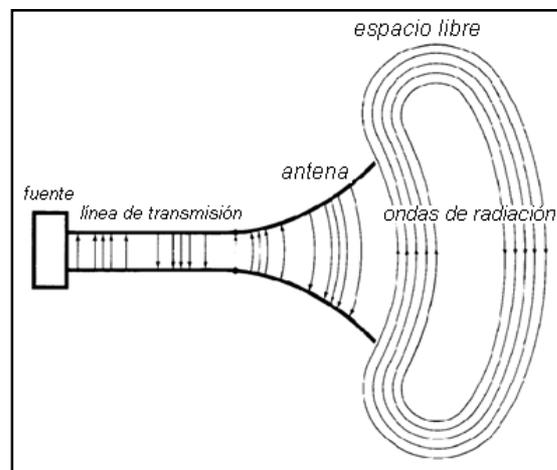


Fig 1.1: Antena - dispositivo de transmisión.

\* Fuente: CONSTANTINE A Balanis. Antenna Theory Analysis and Design, EEUU, WILEY Jhon & son, 1982, pg 2.

La comunicación ha sido y seguirá siendo uno de los puntos claves para el desarrollo tecnológico que vive la humanidad, éste desarrollo ha logrado en la actualidad que la distancia física entre dos personas no sea obstáculo para que puedan comunicarse e intercambiar información, en tiempo real. Es por eso que varias investigaciones se realizan alrededor del mundo buscando siempre las características de mejorarla, optimizarla y renovarla.

## 1.2 Teoría de Antenas

Las antenas se basan en el principio de la radiación producida al circular una corriente eléctrica por un conductor. Esta corriente produce un campo magnético alrededor del conductor, cuyas líneas de fuerza están en ángulo recto con respecto al conductor y su dirección está determinada por la dirección de la corriente.

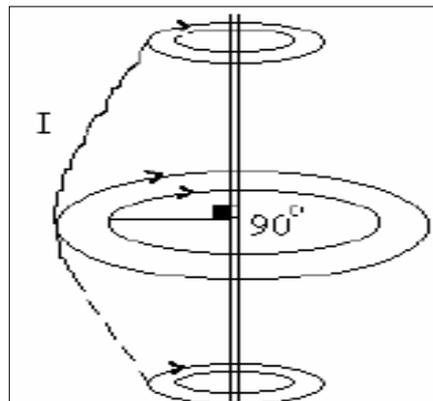


Fig 1.2: Campos magnéticos creados por la corriente que circula en un elemento metálico.

El campo magnético es variable y sigue las mismas ondulaciones de la corriente eléctrica de alta frecuencia que se le entrega a la antena. Cuando el transmisor entrega la señal de corriente alterna, ésta aumenta desde cero voltios hasta su máximo valor. Así al llegar al pico máximo de voltaje, la antena adquiere una carga eléctrica positiva. Esta carga produce a su alrededor un campo eléctrico. Cuando la señal de corriente alterna empieza a decrecer de su máximo valor hacia cero, el campo eléctrico también decrece. Por lo mismo se puede concluir que en una antena existen un campo eléctrico y un campo magnético simultáneos que siguen las variaciones de la señal entregada a ella, y que además son perpendiculares entre sí.

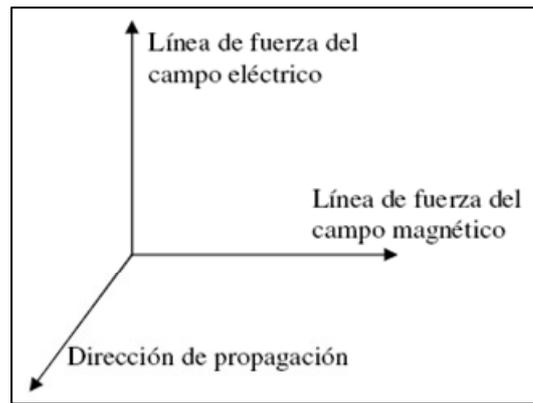


Fig 1.3: Dirección de campos magnéticos, eléctrico y de propagación.

Las antenas pueden tener diferentes formas o arreglos según sea la función que debe cumplir dentro de un sistema de comunicación.

Inicialmente, se explicarán algunas propiedades de las antenas que ayudarán al mejor entendimiento a la hora de abordar temas más profundos.

### 1.3 Definiciones Importantes

**Polarización:** Una onda electromagnética generalmente se debe polarizar horizontal o verticalmente. La polarización de una onda es la figura geométrica descrita, al transcurrir el tiempo, por el extremo del vector del campo eléctrico en un punto fijo del espacio en el plano perpendicular a la dirección de propagación.

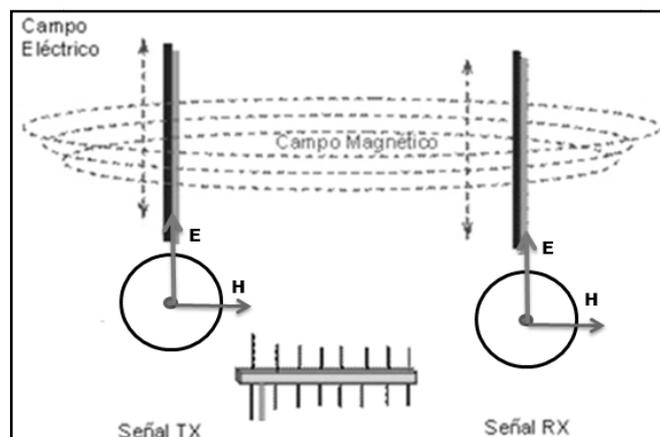


Fig. 1.4: Polarización vertical.

\* Fuente: GUITAL C; MUÑOZ E. Arquitectura de un modelo de redes wireless aplicando antenas smart, Chile, 2002, <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2006/bmfcig968a/>.

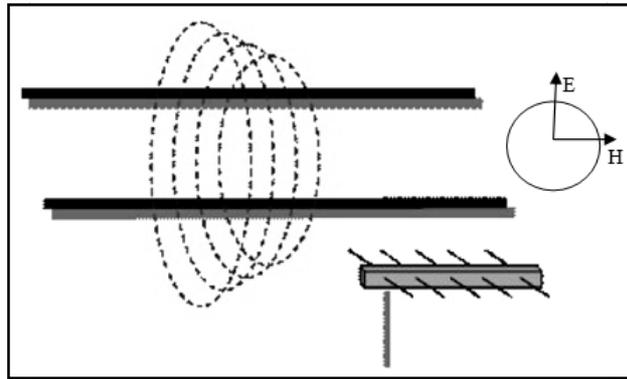


Fig. 1.5: Polarización horizontal.

\* Fuente: GUITAL C; MUÑOZ E. Arquitectura de un modelo de redes wireless aplicando antenas smart, Chile, 2002, <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2006/bmfcig968a/>.

En las figuras 1.4 y 1.5, demuestran que la polarización de una antena está definida por la dirección de las líneas de fuerza del campo eléctrico respecto a la tierra. Como el plano de las líneas de fuerza del campo eléctrico son paralelas a la antena, una antena horizontal emitirá ondas polarizadas horizontalmente y una antena vertical ondas polarizadas verticalmente. Si se emplea sistemas de antenas (*arrays*) que lleven elementos de polarización diferente, por ejemplo elementos verticales y horizontales, la polarización resultante será intermedia entre horizontal y vertical, dependerá de la respectiva amplitud y fase de las componentes rectangulares del vector eléctrico.

La mejor recepción se obtiene por una antena receptora que tenga la misma polarización que la antena emisora. A gran distancia se produce, a causa de las reflexiones en la atmósfera, una rotación de la polarización que hace que la posición de la antena receptora sea indiferente y entonces habrá que elegir la posición de la antena receptora para que capte la mejor señal.

**Patrón de Radiación:** Una de las características más importantes de una antena es su patrón de radiación; Por este motivo y porque el objetivo de este proyecto es mostrar los diagramas de radiación de las antenas inteligentes, se explicará detalladamente esta característica de las antenas.

Un diagrama de radiación es una representación gráfica de las propiedades de radiación de la antena, en función de las distintas direcciones del espacio, a una distancia fija.

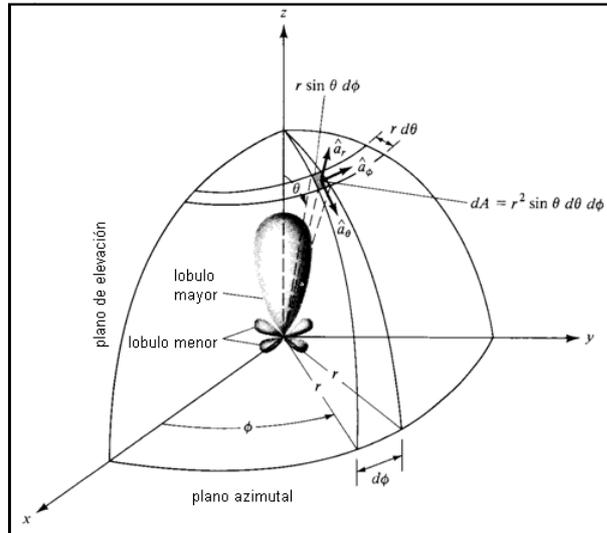


Fig. 1.6 Sistema de Coordenadas para el análisis de antenas.  
 \* Fuente: CONSTANTINE A Balanis. Antenna Theory Analysis and Design, EEUU, WILEY Jhon & son, 1982, pg 29.

El sistema de coordenadas normalmente usado es el esférico. Como muestra la figura 1.6, la antena situada en el origen y manteniendo constante la distancia se expresará el campo eléctrico en función de las variables angulares ( $\theta, \phi$ ). El campo se puede representar de forma absoluta o relativa, normalizando el valor máximo a la unidad.

Por lo general, los diagramas se refieren al campo eléctrico ya que el campo magnético se deriva directamente del eléctrico; pero la representación podría realizarse a partir de cualquiera de los dos.

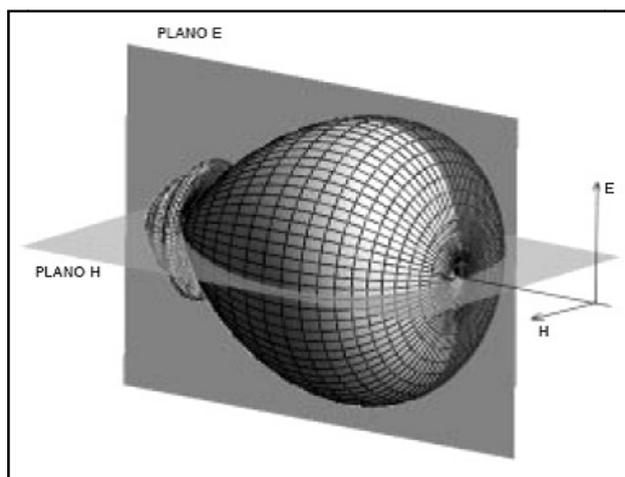


Fig. 1.7. Diagrama tridimensional de una antena en los plano E y H.  
 \* Fuente: CARDAMA, Ángel. Antenas, España, UPS, 1998, pg. 20.

Los diagramas de radiación dependen básicamente de la longitud de la antena y de su proximidad del suelo, interesa por lo tanto conocer la variación del patrón de radiación si se varía la longitud de la antena (Capítulo 5).

Las antenas linealmente polarizadas definen el plano E como el que forman la dirección de máxima radiación y el campo eléctrico en dicha dirección. Análogamente, el plano H es el formado por la dirección de máxima radiación y el campo magnético en dicha dirección; Ambos planos son perpendiculares y su intersección determina una línea que define la dirección de máxima radiación de la antena.

La radiación es tridimensional pero en muchos casos los cortes bidimensionales son suficientes, los cortes pueden hacerse de infinitas formas. Los más usados siguen los meridianos en una hipotética esfera (cortes para  $\phi$  constante) o los paralelos (cortes con  $\theta$  constante). La información de todos los cortes del diagrama es excesiva, por lo que se recurre a representar dicha información sólo en los planos principales.

Los cortes bidimensionales del diagrama de radiación se pueden representar en coordenadas polares donde o cartesianas.

- Diagrama polar: en este caso el ángulo representa la dirección del espacio, mientras que el radio representa la intensidad del campo eléctrico.
- Diagrama cartesiano: En coordenadas cartesianas se representa el ángulo en abscisas y el campo o la densidad de potencia en ordenadas.

En este proyecto usaremos la representación polar del campo eléctrico, un ejemplo de este tipo de diagrama se ve en la figura 1.8:

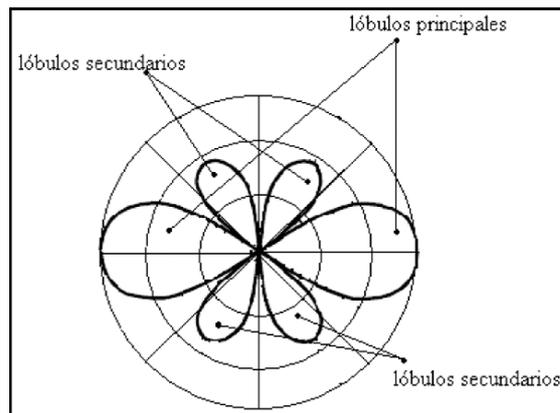


Fig. 1.8. Diagrama polar.

\* Fuente: PANIAGUA Luis. Introducción a antenas inteligentes, Costa Rica, 2008  
[www.eie.ucr.ac.cr/uploads/file](http://www.eie.ucr.ac.cr/uploads/file)

En un diagrama de radiación típico (fig. 1.8), está formado por las siguientes partes:

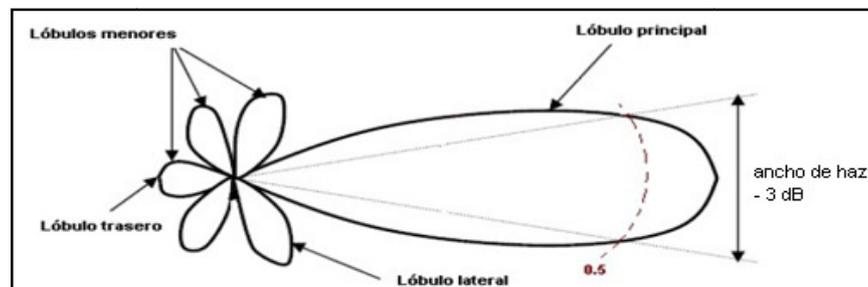


Fig. 1.9. Lóbulos del diagrama polar.

\* Basado: PANIAGUA Luis. Introducción a antenas inteligentes, Costa Rica, 2008  
[www.eie.ucr.ac.cr/uploads/file](http://www.eie.ucr.ac.cr/uploads/file)

**Principal o Lóbulo Principal:** Es una zona en la que la radiación es máxima.

**Lóbulos Laterales:** Son las zonas que rodean a los lóbulos principales estas son zonas de menor amplitud.

**Lóbulo Secundario:** Es un Lóbulo lateral de mayor amplitud.

A continuación se definen una serie de parámetros importantes del diagrama.

**Ancho de Haz a -3 dB (Dq-3db)** es la separación angular de las direcciones en las que el diagrama de radiación de potencia toma el valor mitad del máximo (fig. 1.9), en el diagrama de campo, es la excursión angular entre las direcciones en las que el valor del campo ha caído a 0,707 el valor del máximo. Dicho de otra manera el ancho del haz es el ángulo que se forma entre las rectas, ya sea en el plano vertical o

en el horizontal, y los puntos donde la energía tiene un valor igual a la mitad de la energía principal (puntos de -3dB). A mayor ganancia de la antena, menor será este ángulo.

**Ganancia.-** La definiremos como la cualidad que tiene una antena para concentrar la energía en un área dada

**Ancho de haz entre ceros (D<sub>qc</sub>)** es la separación angular de las direcciones del espacio en las que el lóbulo principal toma un valor mínimo.

#### 1.4 Antenas Elementales.

**1.4.1 Dipolo Elemental:** Esta antena es también considerado un conductor lineal de poca longitud se lo conocido como dipolo corto, y si su longitud es muy pequeña, se le da el nombre de dipolo infinitesimal.

Una antena lineal se puede considerar que está conformada por varios dipolos cortos conectados en serie, por esta razón es importante comenzar el estudio de las antenas con el análisis de las propiedades del dipolo corto, para luego hacerlas extensivas para antenas lineales.

Las antenas dipolo son muy prácticas y sencillas, están hechas de dos conductores cilíndricos en donde la corriente es uniforme y que están conectados entre sí por un alambre corto y muy delgado.

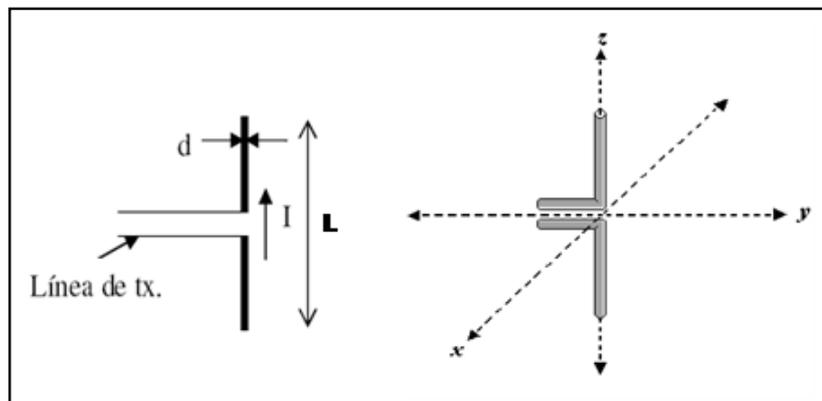


Fig. 1.10. Antena Dipolo.

\* Fuente: CARDAMA, Ángel. Antenas, España, UPS, 1998, pg. 127.

En la figura 1.10 se puede observar un dipolo corto alimentado por una línea de transmisión, la longitud del dipolo ( $l$ ) es mucho menor que la longitud de onda ( $\lambda$ ) ( $l \ll \lambda$ ), al extremo de la línea de transmisión debido a la separación existente se forma una carga capacitiva. La longitud corta y la presencia capacitiva producen una corriente uniforme  $I$  a lo largo de toda la longitud del dipolo.

El patrón de radiación de la antena dipolo consta de dos lóbulos principales unidos ubicados al lado del dipolo como se muestra en la figura 1.11 y 1.12.

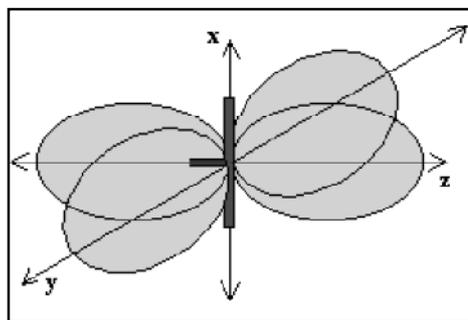


Fig. 1.11. Radiación de la Antena Dipolo.

\* Basado: CARDAMA, Ángel. Antenas, España, UPS, 1998.

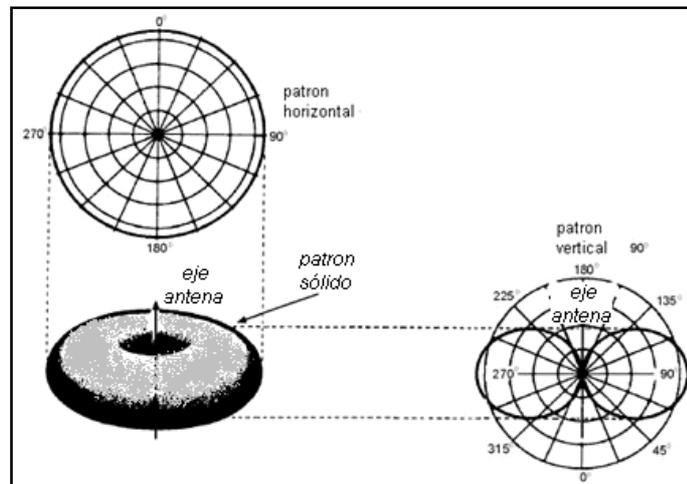


Fig. 1.12. Patrones de radiación de la Antena Dipolo.

\*Fuente: In-Nova Technologies. España, 2003, [www.radiocomunicaciones.net/antenas-dipolo.html](http://www.radiocomunicaciones.net/antenas-dipolo.html)

En el plano azimut (polarización Vertical), el dipolo presenta un campo omnidireccional, y en el plano de elevación (polarización Horizontal) el campo es direccional y está compuesto por dos lóbulos. La figura siguiente muestra el campo de radiación teóricos para ambos casos de polarización.

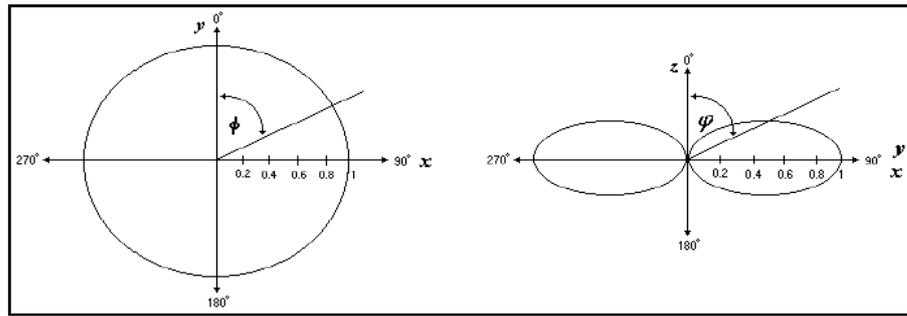


Fig. 1.13. Patrones Horizontal y Vertical.  
 \* Basado: CARDAMA, Ángel. Antenas, España, UPS, 1998.

**Ecuación del Campo Eléctrico de la Antena Dipolo Elemental**

En el cálculo del campo electromagnético producido por un dipolo eléctrico en el espacio libre (punto arbitrario p), primero consideraremos el significado de elemento de corriente  $I dl$  que es una corriente filamentososa  $I$  circulando a lo largo de un trozo muy corto de alambre delgado con una longitud elemental  $dl$ , la corriente es esencialmente constante a lo largo de dicha longitud. Aunque el elemento de corriente constante es un concepto irreal, toda antena portadora de corriente se consideran conjuntos de un gran número de tales elementos unidos por sus extremos. Por tanto, conociendo el campo electromagnético de un dipolo corto se conseguirá calcular el campo de cualquier antena larga.

En el siguiente gráfico se observa a la antena o elemento de corriente alterna ( $I dl \cos wt$ ) en coincidencia con el eje z y con su centro en el origen.

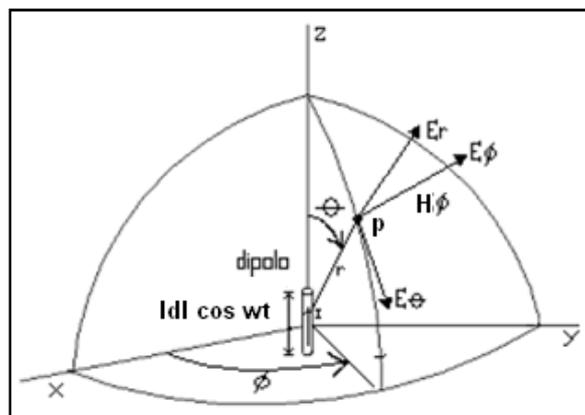


Fig. 1.14. Dipolo ubicado en el espacio y las componentes de campo en un punto p de referencia.

\* Basado: SANDOVAL Francisco. Antenas Helicoidales, Ecuador, 2009, <http://antenared.com/>

En la figura 1.6 se puede observar que se ha tomado como referencia un punto cualquiera (p) con una distancia (r), para el análisis del campo; se tiene tres componentes,  $E_r$ ,  $E_\theta$ ,  $E_\phi$  o  $H_\phi$ . Se supone que el medio que rodea al dipolo es el aire o el vacío.

Las componentes del campo resultante son: [1]

Componente	Expresión general
$E_r$	$\frac{I_o e^{j(\omega t - \beta r)} \cos \theta}{2\pi \epsilon_o} \left( \frac{1}{cr^2} + \frac{1}{j\omega r^3} \right)$
$E_\theta$	$\frac{I_o e^{j(\omega t - \beta r)} \text{sen} \theta}{4\pi \epsilon_o} \left( \frac{j\omega}{c^2 r} + \frac{1}{cr^2} + \frac{1}{j\omega r^3} \right)$
$H_\phi$	$\frac{I_o e^{j(\omega t - \beta r)} \text{sen} \theta}{4\pi} \left( \frac{j\omega}{cr} + \frac{1}{r^2} \right)$

Tabla 1.1: Ecuaciones generales de campo.

Cuando r es muy grande, los términos que tienen  $1/r^2$  y  $1/r^3$  en las ecuaciones pueden despreciarse en comparación con los términos que llevan  $1/r$ . Entonces en el campo electromagnético lejano efectivamente tiene solo dos componentes de campo:

Componente	Campo lejano
$E_r$	0
$E_\theta$	$\frac{j60\pi I_o e^{j(\omega t - \beta r)} \text{sen} \theta}{r} \frac{1}{\lambda}$
$H_\phi$	$\frac{jI_o e^{j\omega t - \beta r} \text{sen} \theta}{2r} \frac{1}{\lambda}$

Tabla 1.2: Ecuaciones generales de campo lejano.

[1] KRAUS John D. Antenas y radiación, tercera edición

### 1.4.2 Dipolo

En la sección anterior se analizó una estructura pequeña en términos de  $\lambda$ , en la que se pudo suponer que la distribución de corriente es uniforme. Ahora, si las dimensiones de la antena no son pequeñas en términos de  $\lambda$ , se tratará de dipolos conocidos como antenas largas las que presentarán interacciones entre sus diferentes elementos así como retardos, con lo que la aproximación de corriente uniforme ya no será cierta.

Para calcular los campos eléctrico y magnético de antenas más largas es necesario conocer la distribución de la corriente a lo largo de la antena. Sin conocer la distribución de corriente en una antena, es posible suponer una cierta distribución, y con esta suposición calcular los campos electromagnéticos. Por estudios realizados se conoce que la distribución de la corriente es sinusoidal, vale anotar que esto se cumple para antenas muy delgadas, ya que para antenas gruesas que se conocen como cilíndricas existen métodos bastante complicados para calcular la distribución de la corriente en las mismas. En este caso la intención posterior es el análisis de antenas inteligentes por lo que no es necesario adoptar los métodos para antenas cilíndricas, es mejor el análisis con la suposición de antenas muy delgadas, donde la corriente es sinusoidal.

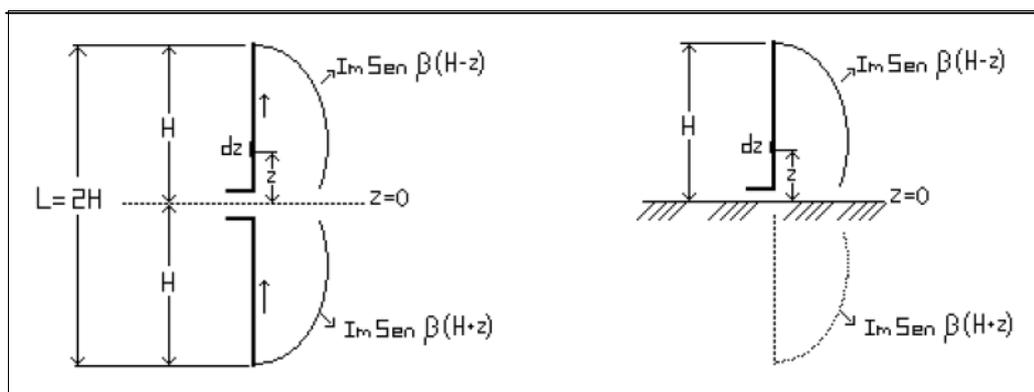


Fig 1.15: Dipolo alimentado en su centro con una distribución sinusoidal de corriente y su equivalente monopolo.

\* Basado: Universidad Nacional de Colombia, Dipolos, 2009,

<http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4040050/Descargas/capseis/dipolosymonopulos.pdf>

La antena monopolo de la figura 1.15 a la derecha tiene la misma característica de radiación que la antena dipolo, cabe señalar que la antena esta sobre un plano perfectamente conductor. Los campos debidos a un elemento de corriente  $I dz$ , al reflejarse en el plano, parecen originarse en un elemento imagen situado debajo del plano.

La altura de la antena dipolo es el doble de la antena monopolo, sin embargo presentan la misma característica de radiación, se ubicará como  $H$  la altura del monopolo y como  $L=2H$  la longitud del dipolo.

Para realizar este análisis se supondrá una distribución sinusoidal de la corriente a través de la antena.

$$I = I_m \text{ sen } \beta(H-z) \quad z > 0$$
$$I = I_m \text{ sen } \beta(H+z) \quad z < 0$$

$I_m$  representa el valor pico de la corriente, en la distribución espacial,  $z$  es la distancia desde el punto de referencia hasta el elemento  $dz$  objeto de análisis, se puede comprender mejor esto observando el siguiente el gráfico 1. 14. De donde se obtiene la componente de radiación (campo lejano) del campo eléctrico; el desarrollo completo se puede encontrar en [1]

$$E_{\theta} = \frac{j60I_m e^{-j\beta r}}{r \text{ sen } \theta} [\cos(BH \cos \theta) - \cos BH] \quad (1.1)$$

Se analizará varias antenas de diferente longitud, en las cuales se conserva las mismas características de corriente, además se tomará como referencia el mismo punto  $P$  debidamente alejado de la antena. Con estas acotaciones se puede volver a escribir la ecuación anterior como:

$$E_{\theta} = E_o \frac{[\cos(BH \cos \theta) - \cos BH]}{\text{sen } \theta} \quad (1.2)$$

$$E_o = \frac{j60 \text{Im} e^{-j\beta r}}{r}$$

(Eo es el mismo para todas las antenas en análisis)

### 1.4.3 Dipolo en $\lambda/2$

Esta antena es una de las más habituales se la conoce como dipolo de media onda. En la cual:  $L=2H=\lambda/2$ , entonces  $H= \lambda/4$ . Para este valor concreto de longitud del dipolo la expresión del campo radiado es:

$$E_{\theta} = E_o \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{\text{sen } \theta} \quad (1.3)$$

Ya que,  $\beta$  es la constante de fase:  $\beta = 2\pi/\lambda$

De una forma semejante al caso anterior se puede obtener para antenas de diferentes longitudes. Las formulas así obtenidas son del los campos eléctricos muy útiles en capítulos posteriores.

### 1.4.4 Antenas Omnidireccionales:

Esta es una antena capaz de radiar energía prácticamente en todas direcciones.

**1.4.4 .1 Antena Isotrópica:** una antena isotrópica es una definición teórica de una antena que puede irradiar en igual en todas las direcciones. Por medio de un diagrama de radiación de esta antena se intenta explicar mejor este hecho. Como ya se dijo, el diagrama de radiación sirve para determinar la energía radiada en cada dirección del espacio.

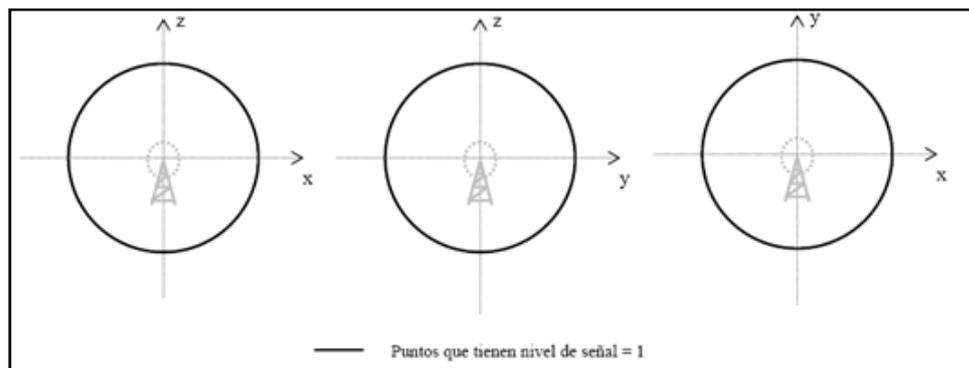


Fig 1.16: Antena Isotrópica.

Analizando la figura 1.15, se ve que en los planos verticales  $(x, z)$  e  $(y, z)$  la cantidad de energía radiada es exactamente la misma en todas las direcciones. Tenemos lo mismo para el plano horizontal  $(x, y)$ . Esto nos indica que esta antena podrá enviar o recibir señal con las mismas condiciones esté en la posición que esté. Esta antena recibe el nombre de antena isotrópica.

**1.4.4.2 Antenas Omnidireccionales Reales:** Prácticamente, esta antena no emite exactamente igual en todas direcciones, sino que tiene una zona donde irradia energía por igual (por ejemplo el plano horizontal). Un caso puede ser cuando no es necesario emitir o recibir señal de la parte que está exactamente encima de la antena, como la antena de radio del coche: difícilmente la fuente de señal estará exactamente encima de la antena, así que favorece la emisión o recepción en otras direcciones (como puede ser el plano horizontal) en disminución de otras (el plano vertical). En el siguiente esquema se observa este comportamiento, donde la cantidad de señal enviada en dirección  $z$  es 0, en cambio la que se envía en las direcciones  $x$  e  $y$  es máxima, y entre los dos límites hay una graduación.

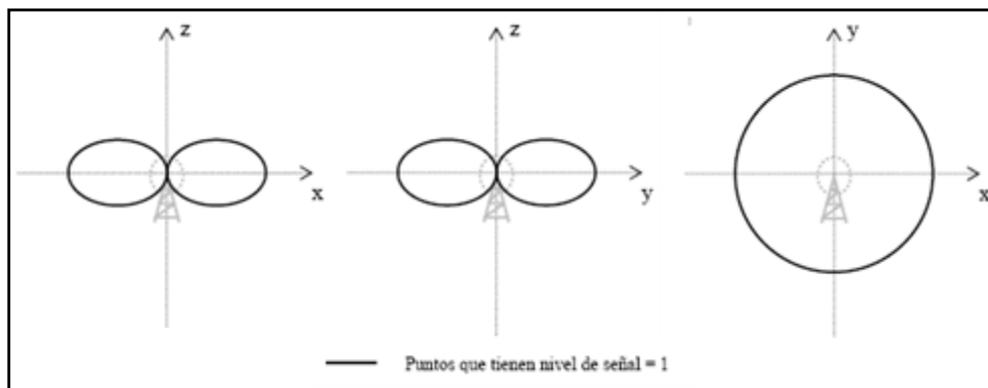


Fig 1.17: Antena omnidireccional real.

### 1.4.5 Antenas Direccionales

Las antenas direccionales son aquellas que han sido concebidas y construidas para favorecer 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 estaremos hablando de un número de direcciones determinado donde se encontrarán el lóbulo principal y los secundarios.

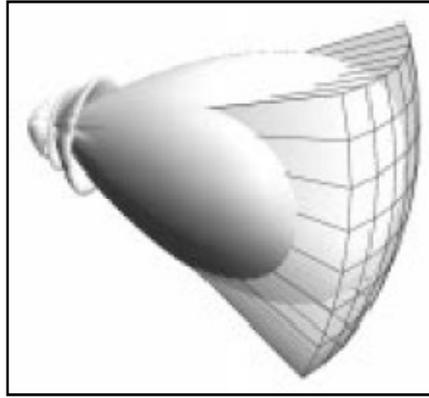


Fig 1.18: Radiación - Antena Direccional.

\* Fuente: CARDAMA, Angel. Antenas, España, UPS, 1998, pg. 23.

**1.4.5.1 Antena direccional normal:** En este tipo de antena siempre se va a usar el término de lóbulo principal que se trata de la dirección donde se proyectará la mayor parte de la energía. Como es imposible hacer una antena que radie en una sola dirección nos interesará saber qué rango de direcciones (o abertura) recibirá el mayor porcentaje de energía. Nos interesará que el lóbulo principal sea lo más estrecho posible, así ganamos en direccionalidad, pero esto repercute directamente en el coste económico de la antena.

También por el simple hecho de trabajar en un medio físico no ideal, se presentaran un número determinado de lóbulos secundarios. Estos lóbulos proyectarán energía en direcciones que no son la deseada, o en caso de recepción captarán señales que no provienen directamente de nuestra fuente, captando ecos y reflexiones o interferencias de otras fuentes. Normalmente nos interesará una relación entre el lóbulo principal y los secundarios lo más grande posible.

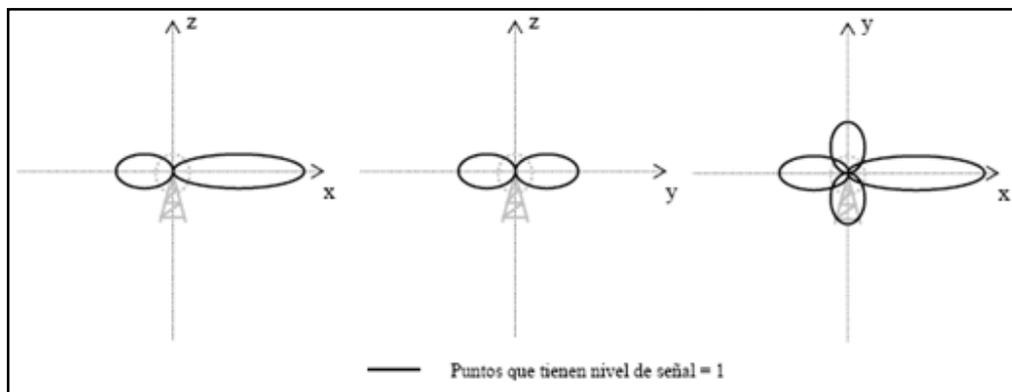


Fig 1.19: Antena Direccional.

Otra de las finalidades de las antenas direccionales es la confidencialidad. La información puede ser difundida en todas direcciones cuando realmente sólo se requiere llegar a un punto, es decir, es muy probable de que los datos confidenciales puedan ser captados por alguien que no nos interesa.

Otra aplicación importante es para evitar la saturación de frecuencias, ya que si usamos una frecuencia en un camino muy recto entre dos antenas direccionales lo que conseguimos es dejar el resto de espacio disponible para usar esa misma frecuencia.

Los conceptos presentados en este capítulo son muy importantes, especialmente para el capítulo 4, en el que se estudiará el comportamiento de estas antenas cuando son agrupadas, formando así los sistemas inteligentes.

## **CAPITULO 2**

### **ANTENAS INTELIGENTES**

#### **2.1 Introducción**

Las antenas en general son una parte muy importante en un sistema de telecomunicación. Siendo así; han surgido varios modelos de antenas para mejorar el desempeño del sistema, las más utilizadas son las de tipo monopolo y dipolo debido a su facilidad de construcción, bajo costo y buenas características de transmisión y recepción.

Un sistema cuyo medio de transmisión es el espacio libre, debe necesariamente tener dentro de su estructura una antena o arreglo de antenas.

En sistemas de radiodifusión y televisión se utilizan diferentes tipos de antenas, por lo general se hace uso de paneles, los cuales están formados por arreglos de dipolos. En algunas ocasiones es necesario tener dos o más sistemas directivos para cubrir la región deseada y cumplir con los reglamentos de telecomunicaciones. Lo ideal sería tener antenas omnidireccionales para estos sistemas, pero para evitar interferencias y, como ya se mencionó cumplir con la Norma General de Radiodifusión y Televisión, no es factible siempre utilizar este tipo de antenas.

El desarrollo tecnológico de los sistemas celulares se ha dado en lo referente a métodos de acceso al canal y utilización del mismo. Y no se ha prestado mucha atención a las antenas.

En los últimos años, el rápido crecimiento del número de usuarios del sistema de comunicaciones móviles y la aparición de sistemas de tercera generación basadas en el Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles (UMTS) que requieren altas

tasas binarias de transmisión, han provocado la necesidad del estudio de nuevos modelos de antenas que sean aptos de mejorar la capacidad de las estaciones base en una red de comunicación y lograr así dar nuevos y mejores servicio a un mayor número de usuarios con mayor calidad. Una manera de lograr esto, es mediante la mejora de las antenas utilizadas en las estaciones base, siendo éste uno de los motivos por los que aparecen las antenas “smart” (o inteligentes) para los sistemas celulares, que dirigen la señal al usuario en forma de lóbulo muy estrecho.

Las primeras antenas utilizadas eran omnidireccionales, es decir, irradiaban y recibían señales hacia y desde todas las direcciones. No poseían la capacidad de adaptar sus recursos a las condiciones de radio, y su estrategia estaba limitada a solo evitar los desafíos ambientales en función de la potencia de la señal irradiada. La estrategia omnidireccional impactaba directamente y adversamente en la eficiencia espectral, limitando la reutilización de frecuencia.

Un sistema de antenas inteligentes, o *Smart Antennas*, combina múltiples elementos de antenas que poseen la capacidad de procesamiento de señal para optimizar sus patrones de radiación automáticamente en respuesta a un ambiente de radio cambiante o dinámico.

Las antenas en grupo proporcionan el uso eficiente de la potencia y del espectro de frecuencia, incrementando la potencia útil recibida así como la reducción de interferencia, al mismo tiempo que aumenta la capacidad de la red a través de una nueva técnica de acceso múltiple, denominada Acceso Múltiple por División Espacial, SDMA.

Los beneficios del uso de estas antenas son posibles ya que dirigen la señal al usuario en forma de lóbulo muy estrecho, por esta razón son llamadas también Antenas Adaptativas.

Una antena inteligente se define como un arreglo de antenas con una configuración de radiación variable de acuerdo a las necesidades. Existen varias formas de conseguir un diagrama de radiación distinto con el mismo arreglo.

Sin embargo la tecnología de antenas inteligentes trae consigo algunos obstáculos, entre ellos se puede mencionar la complejidad de esta tecnología, un costo superior al de antenas tradicionales entre otros. Además, para la implementación de esta nueva tecnología de antenas en sistemas existentes se hará necesario realizar algunos cambios en la planificación y despliegue de la red, para obtener los mejores resultados.

## **2.2 Tecnología de Antenas Inteligentes.**

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

La demanda del incremento de la capacidad de las redes de comunicación móvil y el alto índice de innovación tecnológica (sistemas de 3G) ha motivado la reciente búsqueda hacia el desarrollo de algoritmos y estándares que exploten el espacio de manera selectiva.

Hoy en día, las antenas son muy investigadas, especialmente en el campo de las comunicaciones móviles; en donde, la antena de la estación base tiene 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.

La idea de las antenas inteligentes es usar antenas en las estaciones base con lóbulos que no sean fijos, sino más bien variables, pero adaptados a las condiciones de la telefonía celular actual. Tales características proporcionan oportunidades para incrementar la capacidad del sistema, proporcionando calidad de servicio, control de potencia y alargando la duración de las baterías de las unidades portátiles.

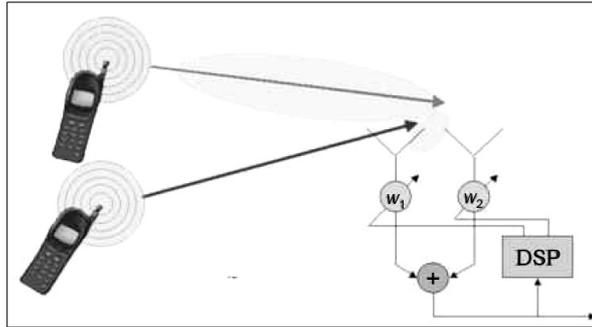


Fig. 2.1. Esquema del entorno de una antena inteligente.

\* Fuente: LÓPEZ Marcial, Smart Antena, Perú,

<http://aniak.uni.edu.pe/antenas/CH%2012%20Smart%20Antennas.pdf>

El diseño de la antena inteligente consiste en la combinación de un arreglo de antenas (*arrays*) con una unidad de Procesamiento Digital de Señales (DSP) que optimiza los diagramas de transmisión y recepción dinámicamente en respuesta a una señal de interés en el entorno. Esta antena, en vez de disponer de un diagrama de radiación fijo, es capaz de generar o seleccionar haces muy directivos enfocados hacia el usuario deseado, e incluso adaptarse a las condiciones radioeléctricas en cada momento.

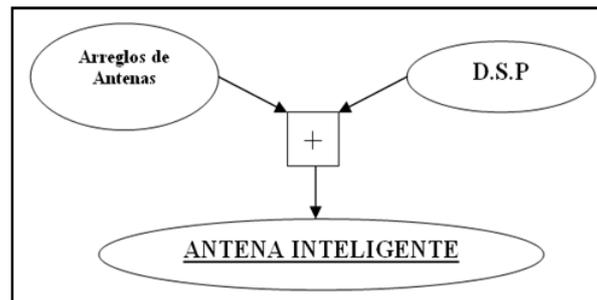


Fig. 2.2. Esquema de una antena inteligente.

Estrictamente hablando, las antenas no son inteligentes, sino que lo son los sistemas de antenas.

### 2.2.1 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 Canciller Antenna”*), que ajusta el diagrama de forma que aparece un nulo en la

dirección de la interferencia. Una antena como la indicada consiste de 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 la denominada 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 (más usada).

### **2.2.2 Formación de Lóbulos (*Beamforming*)**

Uno de las principales funciones de una antena inteligente es la de generar automáticamente los haces de su patrón de radiación según sea la necesidad. La generación de lóbulos de un patrón de radiación se conoce como *beamforming* y este se puede hacer automáticamente mediante técnicas de procesamiento digital de señales. Por medio del *beamforming*, la señal deseada es cubierta por un lóbulo del patrón de radiación mientras que las demás señales y las interferencias son rechazadas por los nulos de radiación, que significa que en la dirección de la interferencia no habrá ningún haz de radiación y por lo tanto la señal indeseada no es captada. Este proceso realiza, por medio de variaciones en las fases de las señales de los elementos del arreglo, interferencias aditivas para las señales deseadas y sustractivas para las indeseadas. Con un arreglo de antenas se puede lograr hacer varios lóbulos que cubren ciertas zonas angulares por medio del *beamforming*.

La formación de lóbulos es una combinación de algoritmos computacionales como el *Steepest Descent* y el LMS (*Least Mean Square*), expuestos posteriormente; y las principales técnicas de conformación de haz; la matriz de Butler es la técnica usada en el software antenas por las características que a continuación se muestra.

### 2.2.2.1 Matriz de Butler

La matriz de Butler es una técnica relativamente sencilla de implementar la red de formación de lóbulos, que utiliza acopladores híbridos de  $90^\circ$  y desplazadores o cambiador de fase; por lo general la matriz es de orden  $M \times M$ .

Un acoplador híbrido de  $90^\circ$  es un acoplador de cuatro puertos que puede dividir una señal de entrada en dos señales iguales de salida pero con desfase de  $90^\circ$  entre ellas.

Para conseguir el desfase entre las corrientes que alimentan a cada elemento del arreglo según la matriz de Butler, se utiliza cambiadores de fase.

Un cambiador de fase es un dispositivo cuya función principal es cambiar la fase de propagación de una señal. Cualquier reactancia colocada en serie o paralelo en una línea de transmisión produce cambios en la fase de la señal y por consiguiente existen ilimitadas configuraciones posibles.

En la siguiente figura se grafica un ejemplo de la matriz de Butler cuando se tiene 4 elementos que conforman el arreglo.

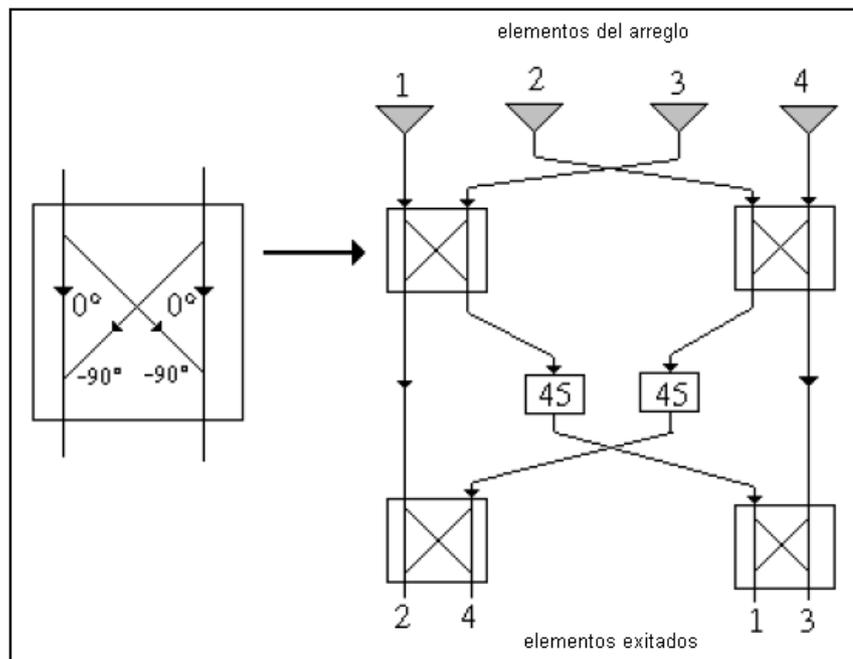


Fig. 2.3: Configuración de la Matriz de Butler.

\* Basado: PANIAGUA Luis. Introducción a antenas inteligentes, Costa Rica, 2008  
[www.eie.ucr.ac.cr/uploads/file](http://www.eie.ucr.ac.cr/uploads/file)

La figura 2.3 simboliza una matriz de Butler de 4x4 donde los cuadrados representan los acopladores pudiendo calcular el desfase de la señal que se transmite por cada línea de la siguiente manera y en la tabla 2.1 se presentan los resultados para la matriz Butler 4x4.

Para calcular la fase entre elementos se realiza el siguiente cálculo:

$$\text{Fase elemento 2} - \text{fase elemento 1} = -180^\circ - (-45^\circ) = -135^\circ$$

$$\text{Fase elemento 3} - \text{fase elemento 2} = 45^\circ - (-180^\circ) = 225^\circ = -135^\circ$$

$$\text{Fase elemento 4} - \text{fase elemento 3} = -90^\circ - (45^\circ) = -135^\circ$$

	Elemento 1 (Grados)	Elemento 2 (Grados)	Elemento 3 (Grados)	Elemento 4 (Grados)	Fase entre elementos (Grados)
Puerto 1	-45	-180	45	-90	-135
Puerto 2	0	-45	-90	-135	-45
Puerto 3	-135	-90	-45	0	45
Puerto 4	-90	-45	-180	-45	135

Tabla 2.1: Defase de cada elemento matriz de Butler 4 antenas.

Cada puerto tiene un diagrama de radiación exclusivo. Usando el software antenas, como ejemplo, para una frecuencia de 800 Mhz. y una distancia de separación entre cada elemento de 30 cm. se tiene los diagramas de radiación que se presenta a continuación:

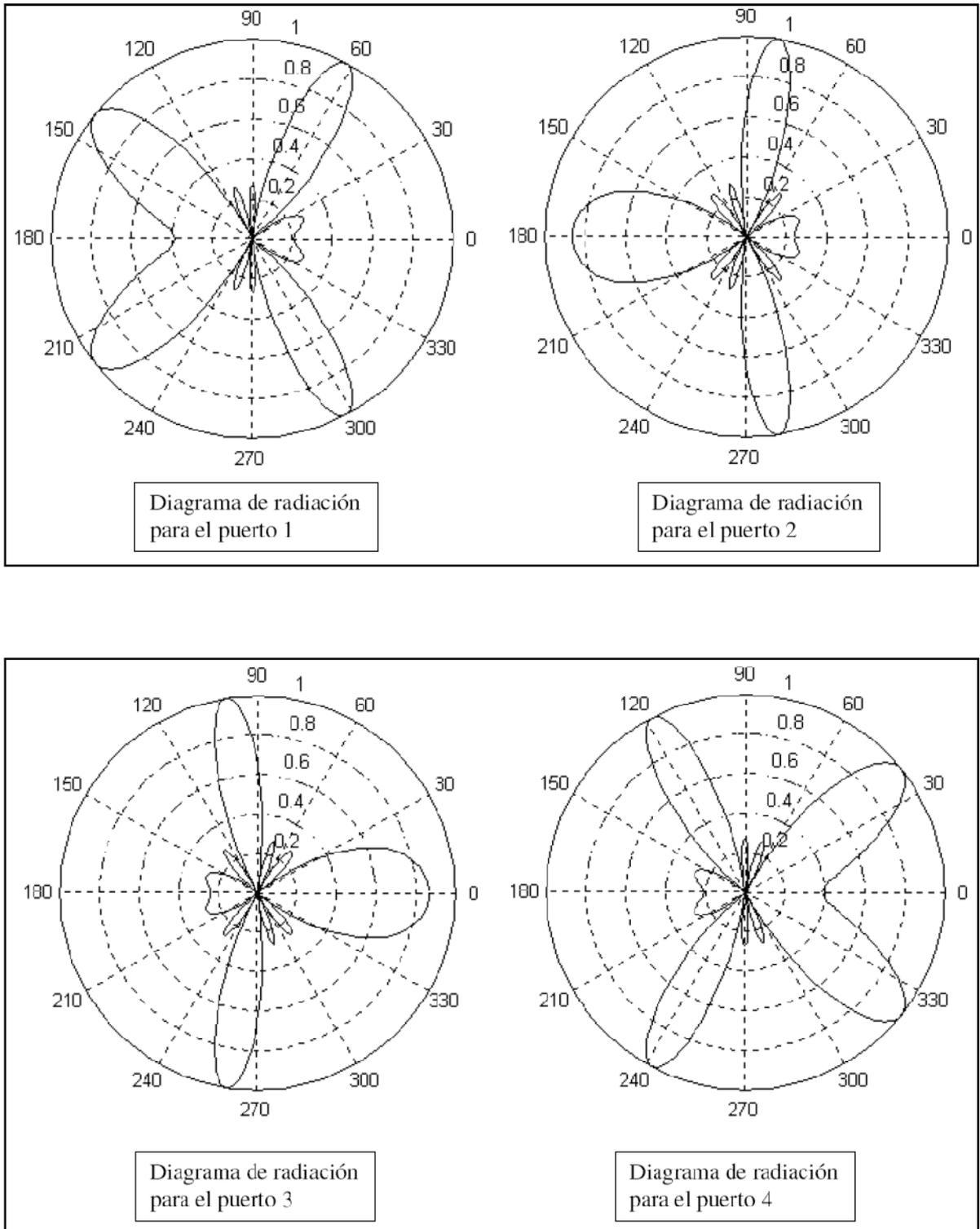


Fig. 2.4: Diagramas de radiación de cada puerto.

La cobertura de esta matriz de elementos depende del espaciamiento entre los elementos y el patrón de radiación de estos y puede cubrir un espacio de hasta 360°. Cada lóbulo producido por la matriz puede ser usado para un transmisor o receptor

específico. La dirección y forma de los lóbulos producidos por esta matriz puede ser modificado por medio de un conmutador de radio frecuencia. Además, existen las matrices Butler de 8x8 y 16x16; que son muy usadas para el *beamforming*.

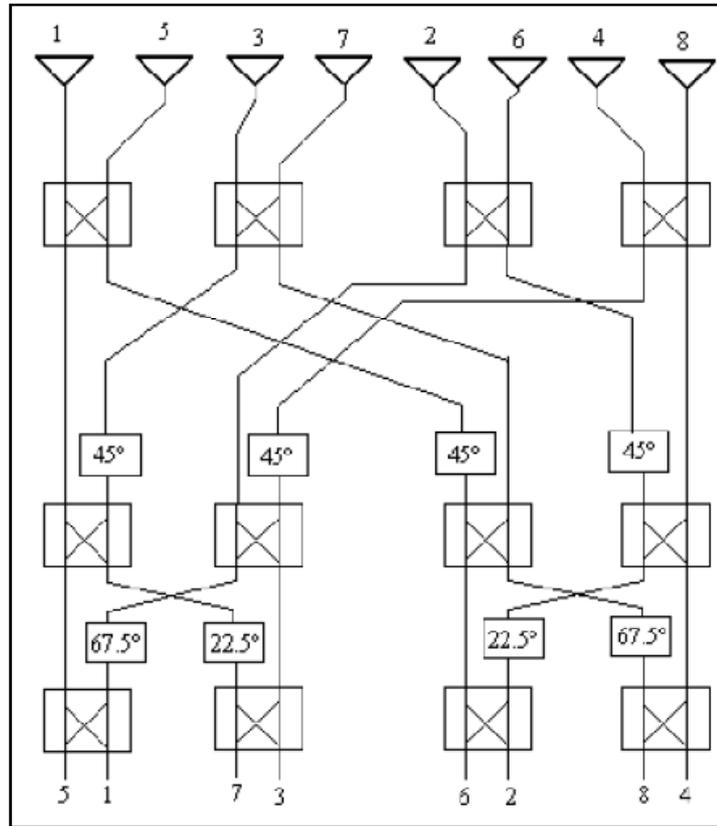


Fig.2.5 Desfase de cada elemento matriz de Butler 8 antenas.

\* Basado: PANIAGUA Luis. Introducción a antenas inteligentes, Costa Rica, 2008  
[www.eie.ucr.ac.cr/uploads/file](http://www.eie.ucr.ac.cr/uploads/file)

	Elemento 1 (Grados)	Elemento 2 (Grados)	Elemento 3 (Grados)	Elemento 4 (Grados)	Elemento 5 (Grados)	Elemento 6 (Grados)	Elemento 7 (Grados)	Elemento 8 (Grados)	Defase (Grados)
Puerto 1	-90	67,5	-135	22,5	-180	-22,5	-225	-67,5	157,5
Puerto 2	-135	-22,5	-270	-157,5	-45	67,5	-180	-67,5	112,5
Puerto 3	-157,5	-90	-22,5	45	-247,5	-180	-112,5	-45	67,5
Puerto 4	-157,5	-135	-112,5	-90	-67,5	-45	-22,5	0	22,5
Puerto 5	0	-22,5	-45	-67,5	-90	-112,5	-135	-157,5	-22,5
Puerto 6	-45	-112,5	-180	-247,5	45	-22,5	-90	-157,5	-67,5
Puerto 7	-67,5	-180	67,5	-45	-157,5	-270	-22,5	-135	-112,5
Puerto 8	-67,5	-225	-22,5	-180	22,5	-135	67,5	-90	-157,5

Tabla 2.2: Defase de cada elemento matriz de Butler 8 antenas.

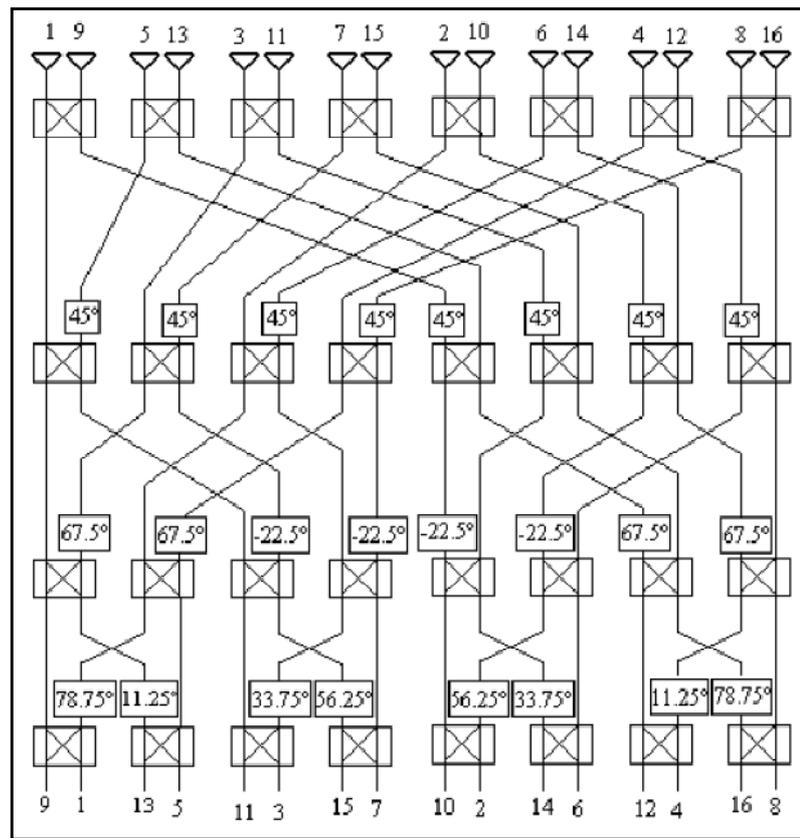


Fig.2.6 Desfase de cada elemento matriz de Butler 16 antenas.

\* Basado: PANIAGUA Luis. Introducción a antenas inteligentes, Costa Rica, 2008  
[www.eie.ucr.ac.cr/uploads/file](http://www.eie.ucr.ac.cr/uploads/file)

	1	2	3	4	5	6	7	8	DEFASE
Puerto 1	-90	78,75	-112,5	56,25	225	33,75	202,5	11,25	168,75
Puerto 2	-157,5	-11,25	135	-78,75	67,5	213,75	0	146,25	146,25
Puerto 3	-180	-56,25	67,5	191,25	-45	78,75	-157,5	-33,75	123,75
Puerto 4	-157,5	-56,25	45	146,25	-112,5	-11,25	90	-168,8	101,25
Puerto 5	-168,75	-90	-11,25	67,5	-213,75	-135	-56,25	22,5	78,75
Puerto 6	-213,75	-157,5	-101,25	-45	11,25	67,5	123,75	-180	56,25
Puerto 7	-213,75	-180	-146,25	-112,5	-78,75	-45	-11,25	22,5	33,75
Puerto 8	-168,75	-157,5	-146,25	-135	-123,75	-112,5	-101,25	-90	11,25
Puerto 9	0	-11,25	-22,5	-33,75	-45	-56,25	-67,5	-78,75	-11,25
Puerto 10	-67,5	-101,25	-135	-168,75	-202,5	-236,3	90	56,25	-33,75
Puerto 11	-90	-146,25	-202,5	-258,75	45	-11,25	-67,5	-123,8	-56,25
Puerto 12	-67,5	-146,25	-225	56,25	-22,5	-101,3	180	101,25	-78,75
Puerto 13	-78,75	-180	78,75	-22,5	-123,75	-225	33,75	-67,5	-101,25
Puerto 14	-123,75	-247,5	-11,25	-135	101,25	-22,5	-146,25	90	-123,75
Puerto 15	-123,75	-270	-56,25	-202,5	11,25	-135	78,75	-67,5	-146,25
Puerto 16	-78,75	-247,5	-56,25	135	-33,75	157,5	-11,25	180	-168,75

Tabla 2.3.1: Desfase de cada elemento matriz de Butler 16 antenas (8 primeros puertos).

	9	10	11	12	13	14	15	16	DEFASE
Puerto 1	180	-11,25	157,5	-33,75	135	-56,25	112,5	-78,75	168,75
Puerto 2	-67,5	78,75	225	11,25	157,5	-56,25	90	-123,8	146,25
Puerto 3	90	213,75	-22,5	101,25	-135	-11,25	112,5	-123,8	123,75
Puerto 4	-67,5	33,75	135	-123,75	-22,5	78,75	-180	-78,75	101,25
Puerto 5	101,25	180	-101,25	-22,5	56,25	135	-146,25	-67,5	78,75
Puerto 6	-123,75	-67,5	-11,25	45	101,25	157,5	-146,25	-90	56,25
Puerto 7	56,25	90	123,75	157,5	-168,75	-135	-101,25	-67,5	33,75
Puerto 8	-78,75	-67,5	-56,25	-45	-33,75	-22,5	-11,25	0	11,25
Puerto 9	-90	-101,25	-112,5	-123,75	-135	-146,3	-157,5	-168,8	-11,25
Puerto 10	22,5	-11,25	-45	-78,75	-112,5	-146,3	-180	146,25	-33,75
Puerto 11	-180	123,75	67,5	11,25	-45	-101,3	-157,5	146,25	-56,25
Puerto 12	22,5	-56,25	-135	146,25	67,5	-11,25	-90	-168,8	-78,75
Puerto 13	-168,75	90	-11,25	-112,5	146,25	45	-56,25	-157,5	-101,25
Puerto 14	-33,75	-157,5	78,75	-45	-168,75	67,5	-56,25	-180	-123,75
Puerto 15	-213,75	0	-146,25	67,5	-78,75	135	-11,25	-157,5	-146,25
Puerto 16	11,25	-157,5	33,75	-135	56,25	-112,5	78,75	-90	-168,75

Tabla 2.3.2: Desfase de cada elemento matriz de Butler 16 antenas (8 últimos puertos).

### 2.2.3 Dirección de llegada (DoA)

La estimación de la dirección con que una señal llega a una antena es uno de los aspectos más importantes de una antena inteligente. A la dirección de llegada de la señal se le conoce por DoA por sus siglas en inglés “*Direction of Arrival*”. El cálculo del DoA es una técnica básica en el procesamiento de señales del arreglo, no solo para sistemas de comunicación inalámbricos, sino también para sistemas de procesamiento de voz y audio.

Se dice que el concepto básico del cálculo del DoA es equivalente al de la estimación del espectro.

Las técnicas más populares para la estimación del DoA son el MUSIC (Multiple Signal Classification) y sus derivados. Las anteriores están basadas en análisis subespacial y pueden ser aplicadas en señales mezcladas. También, existen otras técnicas y algoritmos como la correlación, maximum likelihood, ESPRIT (*Estimation of Signal Parameters using Rotational Invariance Techniques*), MUSIC (*Multiple Signal Classification*) y matrix pencil entre otras. Algunas de las técnicas

utilizadas serán explicadas según se mencionen cuando se hable de las técnicas utilizadas por los diferentes tipos de antenas inteligentes.

El problema, generalmente planteado, es que  $M$  señales llegan a un arreglo lineal con  $N$  elementos equidistantes. Cada una de estas señales llega con un ángulo. La meta de la estimación del DoA es usar los datos recibidos por el arreglo para estimar estos ángulos de llegada de las señales.

### **2.3 Funcionamiento de las Antenas Inteligentes**

En principio cada antena inteligente recibe una señal separada y definida. Las ventajas que pueda ofrecer depende exclusivamente de la configuración del sistema inteligente, una de estas ventajas es que 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.

La actividad del sistema inteligente comienza cuando las antenas reciben una señal de radiofrecuencia (RF) sin procesar. Esta señal es manejada por circuitos como una señal analógica, tal como un radio. Luego de esta etapa analógica, la RF se convierte en una señal digital, misma que se envía al dispositivo host como una cadena de datos. Los conceptos inteligentes de la mayoría de dispositivos son aplicados en estos primeros procesos digitales.

El despliegue de antenas inteligentes en los sistemas de comunicaciones móviles supone, con respecto a la instalación de la antena en la estación base: una modificación en las etapas de planificación y dimensionado de la red celular, un cambio en la gestión de los recursos radio (control de potencia, traspasos entre celdas) y, finalmente, un cambio en la tecnología necesaria en el receptor.

Los cambios en la etapa de planificación implicarían una reducción en el número de estaciones base necesaria para dar cobertura a una zona de servicio y un aumento en el número de usuarios que puede atenderse. Haciéndose necesario definir y cuantificar un conjunto de parámetros que caractericen las prestaciones de la antena

inteligente en diferentes entornos y así poder seleccionar el esquema de conformación más apropiado en cada caso.

Las antenas inteligentes, a diferencia de las antenas convencionales, pueden trabajar de dos modos distintos:

**1. Modo omnidireccional.** La antena en este modo funciona exactamente igual que las antenas convencionales es decir, emite señal con la misma intensidad hacia todas direcciones.

**2. Modo direccional.** En este modo, la antena emite señal en una sola dirección y con un cierto ángulo de apertura. Logrando transmitir en este modo con un mayor alcance hacia la dirección donde emite la antena gracias a que ésta concentra todo su espectro de potencia en un rango de cobertura mucho menor.

### 2.3.1 Tipos de Alcances.

Los tipos de alcances dependen del modo en que trabaje la antena. Consiguiendo un mayor alcance cuando la antena trabaja en modo direccional que en modo omnidireccional ya que, en este caso, concentra toda su potencia en un rango menor.

A continuación, unas definiciones importantes:

- Zona: es la región donde se encuentran todos los usuarios. Esta zona se divide en dos subzonas.

1. Subzona Broadcast. Esta zona corresponde al rango de alcance de la antena en modo omnidireccional.

2. Subzona Beamforming. Esta zona está dividida en  $n$  beams. Un *beam* se define como el rango de alcance de la antena en modo direccional para un cierto ángulo

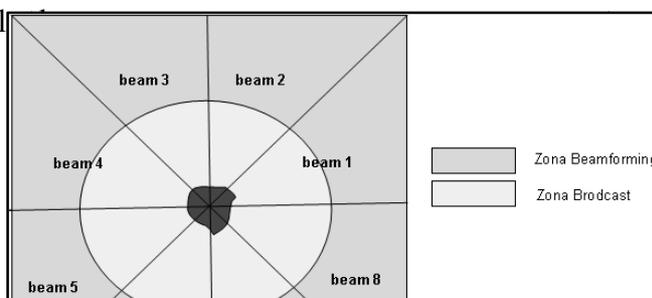
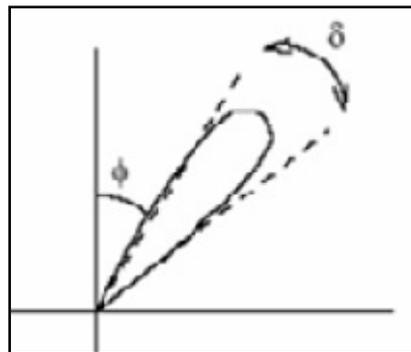


Fig. 2.7 Tipos de Alcance de las Antenas.

\* Fuente: GUITAL C. MUÑOZ E. Arquitectura de un modelo de redes wireless aplicando antenas smart, <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2006/bmfcig968a/>

En la Figura 2.7 se observa la cobertura direccional (*beams*) de forma triangular, en realidad la cobertura es un lóbulo redondeado donde existe una distancia máxima, como se presenta en la figura 2.8:



$\delta$ : ancho del *beam*  
 $\phi$ : ángulo de dirección del *beam*

Fig. 2.8. Vista de un lóbulo.

\* Fuente: GUITAL C. MUÑOZ E. Arquitectura de un modelo de redes wireless aplicando antenas smart, <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2006/bmfcig968a/>

La característica principal de este tipo de antenas es el de poder orientar la señal que emiten hacia una cierta dirección donde se encuentra el usuario con el que se realiza la comunicación. Para esto, cada usuario debe tener, además de su propio identificador, una firma espacial que indique las coordenadas de la posición dentro de la zona.

Cuando una señal es detectada por la antena inteligente, esta de manera general procede de la siguiente manera:

- Recibe la señal del usuario a través de sus sensores (elementos de la antena)

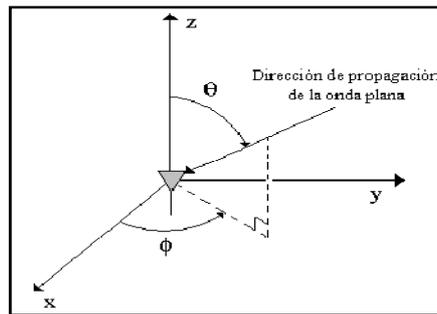


Fig. 2.9 Recepción de la Señal

\* Basado: PANIAGUA Luis. Int a antenas inteligentes, Costa Rica, 2008  
[www.eie.ucr.ac.cr/uploads/file](http://www.eie.ucr.ac.cr/uploads/file)

- La señal arriba a cada elemento de la antena en un tiempo diferente (retardo de tiempo)
- El procesador digital de señales (DSP), es un procesador de señales especializado, desempeña el papel de recepción de la señal en el que calcula la dirección de arribo (DoA) del usuario en los retardos de tiempo y suma a su vez las intensidades de las señales de cada elemento de la antena para formar el haz hacia la dirección calculada para el DoA de cada usuario.

El DoA comprende un par de ángulos ( $\theta$ ,  $\phi$ ) donde ( $\theta$ ) es el ángulo acimutal y ( $\phi$ ) el ángulo zenital (figura 2.5), ángulos que constituyen la dirección de llegada de la onda plana incidente en el arreglo.

El DSP cuenta con un *access point* AP (punto de acceso) este es el encargado de utilizar la firma espacial del usuario para saber hacia donde debe enfocar la antena en cada caso. Obviamente, existe una fase previa a la transmisión de datos entre el AP y los usuarios. En esta fase, el AP debe descubrir cuáles son los usuarios que se encuentran dentro de la zona y obtener sus firmas espaciales. Una vez que el AP tiene conocimiento de la firma espacial de todos y cada uno de los usuarios se encuentra en condiciones de iniciar una transferencia de información.

Si más usuarios se juntan:

- El sistema de antenas adaptativas puede desintonizar las señales no deseadas (interferentes) colocando nulos hacia las señales que no son de interés (*Signal-Not-Of-Interest* ó- *SNOI*), y concentrarse sobre las señales deseadas, ubicando el haz principal en la dirección de la señal de interés (*Signal-Of-Interest* ó *SOI*).

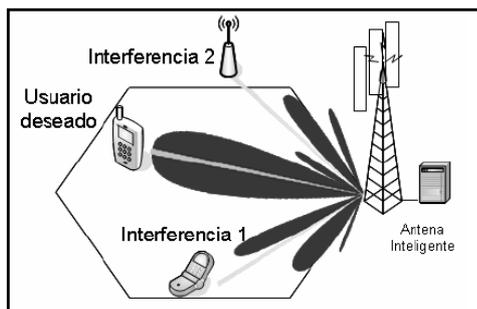


Fig. 2.10 Antena Adaptativa

\* Basado: JÁUREGUI Rodrigo. Planificación de una Red Telefónica Pública Móvil GSM, Guatemala, 2002, <http://www.tesis.ufm.edu.gt/fisicc/2003/74387/tesis.htm>

Tradicionalmente, el diseño electrónico del haz se realizaba en la etapa de radiofrecuencia, lo que provocaba difíciles y costosas implementaciones hardware. Actualmente, y gracias al gran rendimiento de los DSP, ésta conformación de haz se realiza en la estación base, lo que proporciona una mayor versatilidad, facilidad, y abaratamiento de costes, posibilitando un mayor número de aplicaciones algunas desconocidas o poco realizables hasta el momento por ejemplo: en sistemas de radar, radioastronomía, radiotelescopios, y el más conocido en sistemas celulares. En contrapartida, los sistemas multihaz deben emplear algoritmos de conmutación entre haces y software de procesamiento de la señal de radiofrecuencia RF bastante complejos. Estos algoritmos, para cada llamada 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 (*Smart Antenna System*) monitoriza la calidad de la señal determinando cuándo un cierto haz debe ser seleccionado.

## 2.4 Niveles de Inteligencia de las Antenas

## 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 variaciones de sistemas de antena inteligente relativamente costosos en sistemas militares de defensa. Hasta años recientes, 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, ha hecho práctico el uso de las antenas inteligentes para los sistemas de comunicaciones celulares.

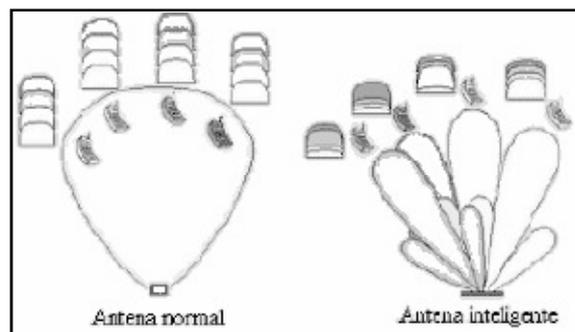


Fig. 2.11 Diagrama de antena normal e inteligente

\* Basado: MORENO Oscar, FRANCO Ignacio, antena inteligente, España, 2001, <http://www.freewebs.com/jojaqui/anteInte.pdf>

Los sistemas de Antenas inteligentes se clasifican en tres tipos:

1. Haz Conmutado.
2. Haz de Seguimiento.
3. Haz Adaptativo

### 2.4.1 Haz Conmutado (Switched Beam).

Esta configuración de antenas es la más simple de todas, su funcionamiento consiste en seleccionar uno de los patrones de radiación previamente establecidos. Para trabajar con antenas inteligentes de haz conmutado, se realizan los cálculos necesarios para establecer los pesos complejos de cada elemento del arreglo para

modificar la amplitud y fase de las señales entrantes o salientes a cada elemento. Con estos cambios en la amplitud y frecuencia, se logran predeterminar varios lóbulos de radiación dirigidos, cada uno, hacia diferentes direcciones, logrando una cobertura total.

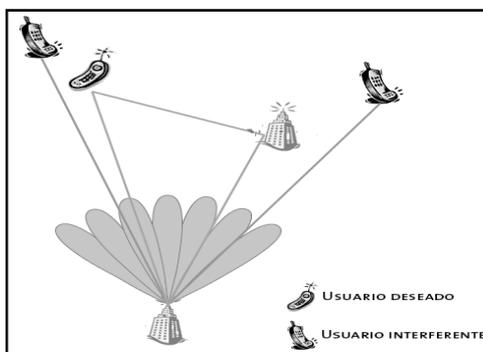


Fig. 2.12. Antena de Haz Conmutado

\* Fuente: MORENO Oscar, FRANCO Ignacio, antena inteligente, España, 2001, <http://www.freewebs.com/jojaqui/anteInte.pdf>

Conforme la otra antena o móvil se mueve, se determina cual es la dirección donde se encuentra la mayor ganancia para utilizar el lóbulo que está dirigido hacia esa dirección. Constantemente, la antena realiza lo descrito anteriormente por medio de los algoritmos para haz conmutado para lograr mantener la mejor calidad de la señal y asegurar el mínimo error posible en la transmisión.

Ventaja: Esta técnica, logra enfocar la señal y a su vez suprimir las señales de interferencia que no se encuentren dentro del lóbulo.

Desventaja: En este tipo de antena es que, si la señal de interferencia se encuentra en la misma dirección que la señal deseada, o bien lo suficientemente cerca para que el lóbulo la cubra, existirán problemas a la hora de recibir dicha señal deseada. Igualmente, como producto normal de la formación de haces, se forman también lóbulos secundarios que pueden captar también señales no deseadas.

#### 2.4.1.1 Elementos de un Sistema de Haz Conmutado

Las antenas inteligentes de haz conmutado generalmente están hechas con arreglos de matrices de Butler, explicado anteriormente. Pero además de esto, este tipo de

antenas están hechas de acopladores direccionales, híbridos 3dB -90°, switches de microondas y sistemas de control de fase.

**Acopladores Direccionales:** Estos son los elementos que unen las líneas de transmisión que se encuentran dentro de las matrices de los arreglos utilizados. Estos dispositivos de microondas se consideran elementos pasivos y poseen generalmente cuatro puertos numerados (figura 2.13). Si la energía incide en un puerto, esta será repartida por alguno de los otros puertos, mientras que otros puertos estarán aislados para evitar que el flujo de esta energía entrante pase por ellos. Para que estos puertos queden aislados, este elemento consta de una impedancia o carga acoplada. Con este aislamiento se evitan reflexiones indeseadas que pueden perjudicar la calidad de la señal. Los acopladores direccionales presentan un nivel de acoplo característico, que es la relación entre las potencias incidente y acoplada, el nivel de acoplo se mide en decibeles.

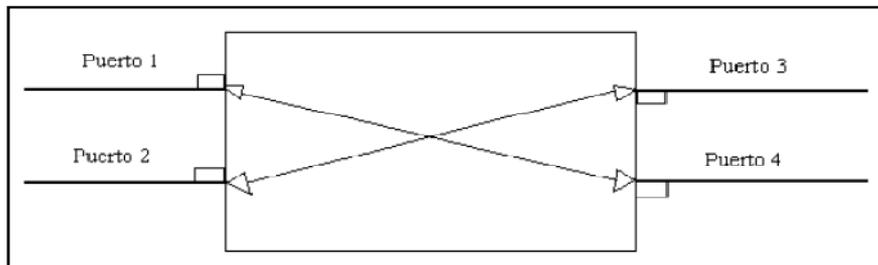


Fig. 2.13. Acoplador Direccional.

\* Fuente: PANIAGUA Luis. Introducción a antenas inteligentes, Costa Rica, 2008, [www.eie.ucr.ac.cr/uploads/file](http://www.eie.ucr.ac.cr/uploads/file)

**Híbridos 3dB-90°:** Con estos elementos se logra dividir la señal de entrada en dos señales separadas 90° una de la otra. Su nivel de acoplo es de 3dB. Existen varios tipos de híbridos 3dB-90° entre los que destacan híbridos de *Lange*, híbridos *branchline* o de línea secundaria, de revestimiento y de borde entre otros.

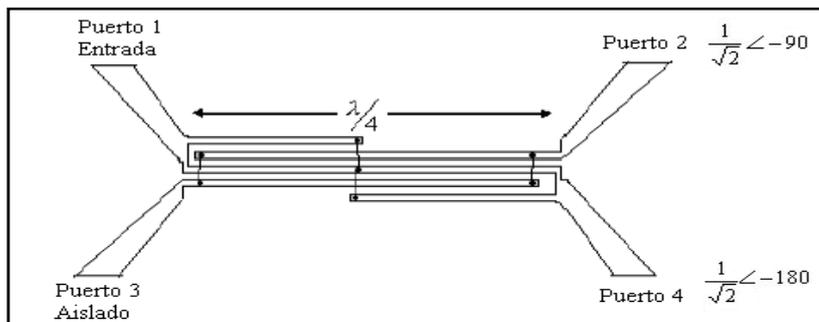


Fig. 2.14. Híbrido 3dB-90°.

\* Fuente: PANIAGUA Luis. Introducción a antenas inteligentes, Costa Rica, 2008, [www.eie.ucr.ac.cr/uploads/file](http://www.eie.ucr.ac.cr/uploads/file)

Un ejemplo de este tipo de dispositivos muestra la figura 2.10, donde se presentan un puerto de entrada, uno aislado y dos de salida. El puerto aislado está acoplado de forma que no produce pérdidas en la señal de salida, mientras que por el puerto 2 y el puerto 3 sale la señal de entrada con una ganancia de 3dB y con un desfase de  $-90^\circ$  y  $-180^\circ$  respectivamente. Los desfases y la magnitud de las señales de salida son producto de la estructura física del acoplador híbrido.

**Switches de Microondas:** Los *switches* de microondas se usan en gran cantidad en sistemas de microondas, para dirigir una señal o algún flujo de energía hacia dos elementos, o bien para permitir o no el paso de la energía a través de este dispositivo. Para construir elementos de este tipo con las mejores velocidades alcanzables, se utilizan los diodos PIN.

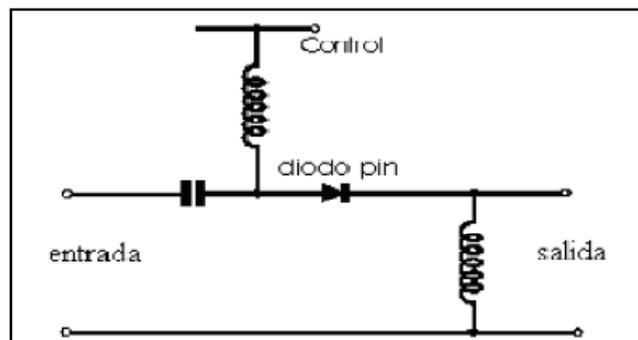


Fig: 2.15. Switch de microonda.

\* Fuente: PANIAGUA Luis. Introducción a antenas inteligentes, Costa Rica, 2008, [www.eie.ucr.ac.cr/uploads/file](http://www.eie.ucr.ac.cr/uploads/file)

Los diodos PIN son elementos de radiofrecuencia y a estas frecuencias pueden ser vistos prácticamente como resistencias perfectas o como conductores perfectos, además pueden ser acoplados fácilmente en circuitería planar o impresa y su operación de alta velocidad llega a 100 nanosegundos para cada cambio de estado que éste realice. La figura 2.15 muestra un ejemplo *switch* de microondas, en donde se tiene una entrada y una salida, controlada por la señal de control. El diodo PIN cumple la función de permitir el paso o no de corriente a través de él, dejando obtener o no la señal de entrada en la salida.

**Sistemas de Control de Fase:** Estos componentes de las antenas de haz conmutado, como su nombre lo dice, controlan la fase de las señales, específicamente de las señales de cada uno de los elementos del arreglo. Con este control de fase, se logra

formar los ya establecidos patrones de radiación. A este proceso se le conoce también como *beam steering* y es, en otras palabras, el direccionamiento del lóbulo principal hacia el objetivo deseado. El control de fase es el que controla la dirección hacia donde está apuntando el haz del patrón de radiación. Los controladores Pudiendo diferir enormemente y según la tecnología que utilizan y la calidad y exactitud del mismo, se obtendrán señales más dirigidas y con ellos mejorar la calidad de la señal y la reducción de la interferencia.

#### 2.4.1.2 Configuración – Haz Conmutado

El objetivo básico del sistema será conseguir un lóbulo que apunte hacia diferentes direcciones. Con la matriz de Butler se consiguen haces del arreglo de antenas.

La configuración del sistema *switch beam* consiste en un barrido discreto de la zona de cobertura (fig. 2.16) en posiciones angulares fijas, ya que el sistema genera varios haces a ángulos prefijados que conmutan secuencialmente dentro de la zona. En cada posición discreta del haz ( $\theta = \theta_i + \Delta\theta$ ) se activa el sistema de recepción para detectar la posible existencia de señales. En caso de recibir señal, el sistema guarda información correspondiente a la posición del haz, es decir, su ángulo más la identificación de usuario ( $\alpha_u$ ;  $I_{du}$ ), y se establece la comunicación con el usuario en un intervalo de tiempo ( $\Delta t$ ). Luego de este intervalo conmuta al siguiente haz para detectar la existencia de otros posibles usuarios hasta llegar al límite angular de la zona de cobertura ( $\theta_f$ ). Este proceso se repite permanentemente en el tiempo.

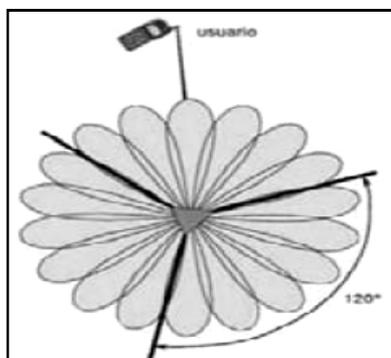


Fig. 2.16. Resolución del Haz

\* Fuente: LÓPEZ Marcial, Smart Antena, Perú,  
<http://aniak.uni.edu.pe/antenas/CH%2012%20Smart%20Antennas.pdf>

Para tener la cobertura mencionada, existen topologías diferentes que pueden seguirse. De manera general se tendrá un sistema con una red o matriz de cierto tamaño  $M \times M$ , que produce  $M$  lóbulos ortogonales en la dirección azimutal. A cada salida de esta red se le conecta otra matriz de cierto tamaño  $N \times N$ , produciendo  $N$  haces ortogonales para cada elemento de la matriz  $M \times M$ , cubriendo así un sector angular vertical. La operación en cascada de las dos matrices puede producir entonces una cantidad discreta de lóbulos  $M \times N$ .

Las entradas de cada uno de los puertos de las matrices son controladas, generalmente, de forma digital y por los controladores de fase y amplitud que le dan los pesos complejos apropiados para formar de manera apropiada estos  $M \times N$  lóbulos principales. Este arreglo se puede observar en la siguiente figura.

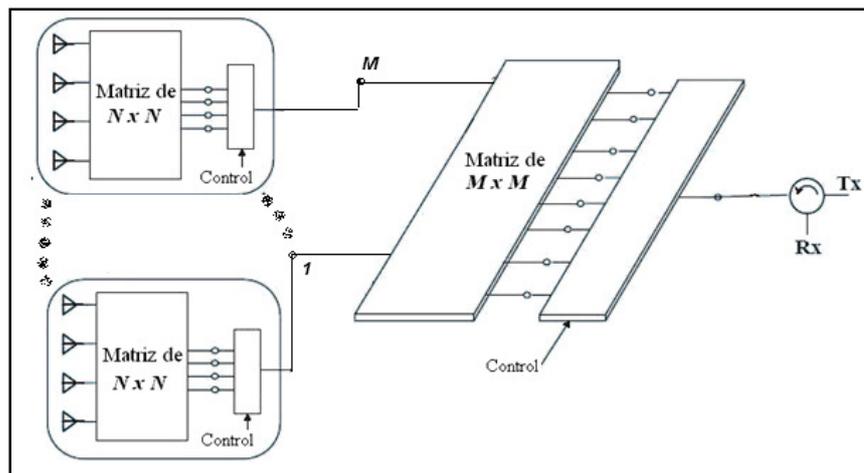


Fig. 2.17. Configuración – Haz Conmutado.

\* Fuente: FAKOUKAKIS F. Development of an Adaptive Beam, Grecia, 2005, <http://piers.mit.edu/piersonline/pdf/Vol1No3Page276to280.pdf>

Con este sistema de matrices, el ancho que puede tener un lóbulo varía de manera inversa con el número de elementos que tenga la matriz para esa dirección, es decir, entre mayor sea el número de elementos del arreglo ubicados para emitir o recibir señales en dirección vertical u horizontal, menor será el ancho de dicho lóbulo y con ello se logrará un mejor direccionamiento.

Para determinar la dirección del lóbulo principal, se requiere de un sistema de detección de ángulo de llegada o DoA para haz conmutado. Generalmente, un sistema aparte del sistema principal de antenas es el que provee la información para

calcular el DoA de la señal recibida y la transfiere a una unidad de microcontrolador que realiza los algoritmos necesarios para determinar el DoA. Esta unidad de microcontrolador, además de realizar las estimaciones del ángulo de llegada, maneja también los controles de cada una de las matrices utilizadas en el arreglo para proporcionar los desfases necesarios para la formación del patrón de radiación necesario en determinado momento.

### 2.4.1.3 Funcionamiento – Haz Conmutado

La descripción de manera general sobre el funcionamiento de una antena inteligente de haz conmutado es mostrada en el diagrama de bloques de la figura 2.14.

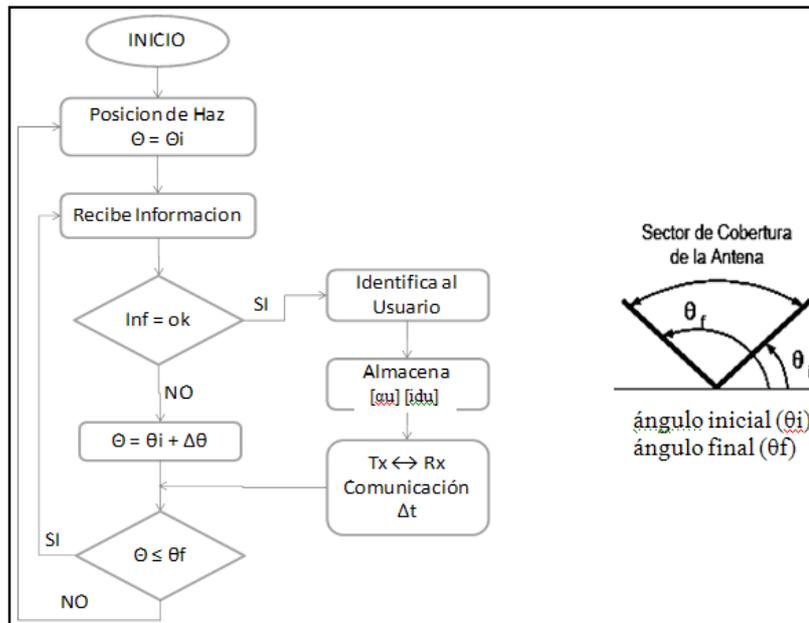


Fig. 2.18. a) diagrama de control de antena haz conmutado.  
b) zona de cobertura.

En la figura:  $\theta$  representa la dirección hacia donde está dirigido el lóbulo principal,  $\theta_i$  indica la primera posición del haz principal al inicio del proceso,  $\theta_f$  la última posición posible que puede tener el lóbulo principal,  $\alpha_u$  son los DoA de cada uno de los usuarios,  $idu$  es la identificación de cada uno de estos usuarios.

Específicamente para una señal, lo primero que realiza una antena inteligente de este tipo es posicionar la dirección o ángulo del lóbulo principal en una dirección previamente determinada. Como se dijo, esta dirección está determinada por un

ángulo en dirección azimutal y otro en dirección vertical, por tanto existirán dos ángulos que determinen la posición aproximada de la señal recibida. Una vez posicionado el lóbulo principal, se procede a recibir la primera información proveniente de la señal. Si esta información tiene las condiciones adecuadas para la transferencia de datos se procede a identificar el usuario que está enviando esta señal. Luego, se almacenan el usuario y su posición y se produce el intercambio de información. Es importante notar que la antena envía información por primera vez a partir de este momento.

Si en el momento de recibir por primera vez la información proveniente del usuario, se detecta que esta viene distorsionada o con interferencias, se pasa a utilizar un ángulo de otro lóbulo y así sucesivamente hasta lograr que la dirección a la que apunta el lóbulo principal sea la que capte de mejor manera la señal.

El sistema de detección de DoA para antenas de haz conmutado mantiene fija la dirección a la que apunta un lóbulo con la cual se inicia este proceso está previamente definida, igualmente que el orden con que cambian los ángulos del lóbulo del patrón de radiación. Es decir, se tiene una rutina donde cada posición del haz principal que puede tener la antena de haz conmutado, va a ser utilizada solamente luego de que la posición anteriormente utilizada no tuvo la recepción adecuada.

De esta manera, se van cambiando los haces del patrón de radiación conforme vaya cambiando la posición de de origen de la señal recibida por la antena.

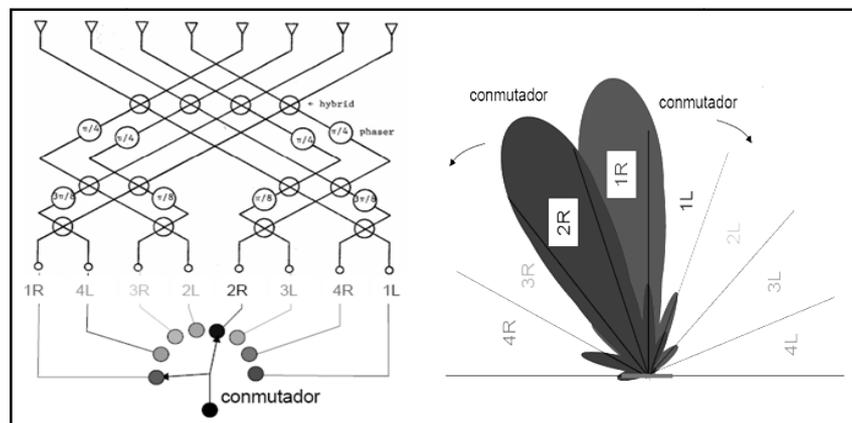


Fig. 2.19: Representación de un Antena de Haz Conmutado.

\* Basado: ALBORNOZ Rafael. Antenas Inteligentes, Venezuela, 2004, [http://lant.ing.uc.edu.ve/files/antenas%20inteligentes-8a-\(sec\).pdf](http://lant.ing.uc.edu.ve/files/antenas%20inteligentes-8a-(sec).pdf)

La ventaja reside en su poca complejidad en implementar e instalar. Por otra parte, la mayor desventaja es que el haz presenta una baja resolución.

En conclusión, este sistema es la idea más sencilla para mejorar la comunicación disponiendo de antenas a las cuales se puede acceder de manera individual:

- En cada momento, se cambiaría a la antena que tuviera el diagrama de radiación más adecuado de acuerdo a algún criterio de optimización de señal deseada frente a interferencias.
- Sólo una de las N antenas del array estaría funcionando en un momento dado, se estarían desaprovechando las ventajas de tener muchas antenas colaborando.

#### **2.4.2 Haz de Seguimiento (*Scanning*).**

Las antenas inteligentes de haz de seguimiento se asemejan mucho a las de haz conmutado, con la diferencia de que las antenas inteligentes estudiadas en esta sección tienen la capacidad de modificar el ángulo en que el lóbulo principal es dirigido casi de forma continua en el espacio. En otras palabras, el lóbulo principal puede seguir la señal con la que tiene establecida la comunicación.

Para modificar el ángulo del lóbulo principal, estos tipos de antenas requieren un arreglo de antenas con el cual la fase de las corrientes de excitación de cada elemento puede ser controlada electrónicamente. Este tipo de arreglo se le conoce como Phased Array.

Además del control de fase, las antenas de haz de seguimiento utilizan algoritmos de DoA para detectar la dirección de llegada de las señales de los diferentes usuarios.

Los elementos de este tipo de antenas inteligentes tienen como función la generación del lóbulo principal en la dirección de la señal. Entre los principales elementos de un sistema de haz de seguimiento se encuentran los desfases, los compensadores y

los sistemas de detección de DoA para haz de seguimiento, que se describen a continuación.

#### **2.4.2.1 Elementos de un sistema de haz de seguimiento**

Entre los principales elementos de un sistema de haz de seguimiento se encuentran los desfasadores, los compensadores y los sistemas de detección de DoA para haz de seguimiento. Tales elementos en este tipo de antenas inteligentes tienen como función la generación del lóbulo principal en la dirección de la señal.

**Desfasadores** (*phase shifters*): estos componentes son utilizados para controlar las características de la fase de una señal. Los desfasadores ideales introducen muy pocas pérdidas y producen la misma amplitud para una misma señal pero con diferentes fases. Las pérdidas implantadas por un desfasador no ideal, pueden ser compensadas por etapas de amplificadores, aunque se debe intentar hacer mínimas estas pérdidas, ya que entre menos pérdidas haya, menos potencia se necesita para compensarlas. La mayoría de los *phase shifters* se consideran redes recíprocas, porque funcionan efectivamente con señales yendo en una u otra dirección. Estos elementos pueden ser controlados magnética, mecánica o electrónicamente, siendo la forma electrónica la manera más efectiva y la que requiere menos espacio de las tres.

**Compensadores:** Los compensadores son utilizados para el control de estabilidad en las señales, velocidad de respuesta del sistema o desfases entre señales de entrada y salida. Existen compensadores en adelanto o en atraso, esto quiere decir que adelantan o atrasan la fase de las señales, respectivamente, según convenga. Los de adelanto puede incrementar la estabilidad o la velocidad de respuesta del sistema, mientras que uno en atraso puede reducir la diferencia de fase entre la señal de salida con respecto a la señal que se deseada.

Se pueden utilizar compensadores en atraso y adelanto juntos según sea el efecto que se quiera tener sobre la señal.

#### **2.4.2.2 Sistemas de Detección de DoA para Haz de Seguimiento:**

Estos sistemas, funcionan con el fin de detectar la dirección de donde proviene una señal con la que se está estableciendo alguna comunicación.

Estos sistemas emplean diferentes unidades de un microcontrolador, los cuales poseen algoritmos entre los que se encuentran el LSM, MUSIC y ESPRIT, entre otros. De una forma general, se explico lo que es un sistema de detección de DoA, pero en ahora se describirán brevemente algunas técnicas y algoritmos que se utilizan para esto.

**LMS** (*Least Mean Square*): Este algoritmo reduce el error mínimo cuadrado; Esta técnica calcula por medio de bits de prueba el error que existe entre la señal deseada y la señal recibida luego de haberse determinado una dirección de llegada, es decir, con la dirección a la cual apunta el lóbulo principal se obtiene una señal de prueba la cual es comparada con la que debió haber llegado. Para tener esta señal conocida se transmiten secuencias de entrenamiento. Con el algoritmo LMS se designa una constante de ganancia  $u$  que controla el rango en que la dirección de llegada estimada es adaptada.

**MUSIC** (*Multiple Signal Classification*): La clasificación de múltiples señales es un método de cálculo de DoA, es uno de los métodos más populares y a la vez complejos para la detección de DoA.

Este método puede ser aplicado para varias señales mezcladas que inciden en el arreglo al mismo tiempo, siempre y cuando haya menos señales que elementos en el arreglo siendo utilizados. Este método tiene la gran ventaja que puede ser aplicado para cualquier tipo de configuración de arreglo de antena, siempre y cuando el tipo de arreglo y la respuesta ante las diferentes señales sean conocidos antes de implementar el algoritmo.

Para esta técnica, la antena receptora debe tomar varias muestras de las señales, para luego de hacer diferentes cálculos y estimaciones, determinar cuál de todas estas

muestras ofrece una mejor ganancia y mayor relación señal a ruido (S/N). Como cada una de estas muestras se tomó para determinada dirección, una vez que se determine la muestra que ofrece las mejores características, se sabrá cual es la dirección a la que debe apuntar el lóbulo principal para tener la mejor recepción.

Los métodos anteriores logran su objetivo de encontrar la dirección de donde viene una señal verificando varios ángulos de llegada continuamente. Esto quiere decir que analizan todas las posibles direcciones para determinar finalmente el correcto DoA. Este procedimiento, conocido también como *scanning* hace que la detección del DoA sea menos eficiente.

**ESPRIT** (*Estimation of Signal Parameters Via Rotational Invariance Techniques*):

El problema de *scanning* se soluciona usando la técnica de estimación de los parámetros de señal vía técnicas de invariancia rotacional convirtiendo el *scanning* en una determinación directa de los retardos que logran dirigir el lóbulo principal hacia la posición de las fuentes vía sus ángulos directores. En otras palabras se puede decir que el algoritmo *ESPRIT* enfoca el lóbulo principal hacia la mejor dirección de una sola vez, sin necesidad de verificar si otros lóbulos brindan una mejor recepción.

La desventaja que tiene este método es que se ve afectado por el ruido no blanco, es decir, el ruido que varía su magnitud conforme varía su frecuencia. Además, para su funcionamiento se requiere de una carga computacional tan grande que hace inconveniente el uso de este algoritmo para procesamiento de señales en tiempo real para señales que varían constantemente en el tiempo.

#### **2.4.2.3 Funcionamiento - Haz de Seguimiento**

Las antenas inteligentes de haz de seguimiento inician su función detectando la dirección de arribo del móvil o señal con la que se va a establecer el contacto. Una vez obtenida la ubicación del móvil los procesadores internos identifican al usuario con el que se está comunicando y almacenan esta identificación junto con el ángulo de llegada. Es importante recordar que la dirección de llegada se establece con ángulos en dirección vertical y azimutal u horizontal. Para la detección de la

dirección de llegada se utilizan los algoritmos descritos en la sección 2.4.2.2. Una vez ubicada la señal se procede a posicionar el haz, esto es establecer los desfases necesarios de las señales que llegan a cada elemento del arreglo para conseguir el direccionamiento deseado del lóbulo principal. Entonces, posicionado el haz principal, se produce la comunicación entre el móvil y la antena inteligente para nuevamente volver a ejecutar la detección de DoA e iniciar el proceso nuevamente. La resolución del haz en este sistema es mucho más definido que en el sistema anterior en el que los cambios de fase se realizan a ángulos fijos, es decir, corresponden a ángulos prefijados por el sistema.

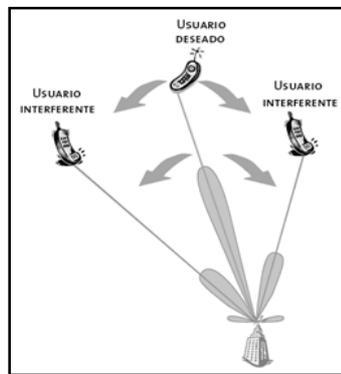


Fig. 2.20: Antena de Haz de Seguimiento.

\* Fuente: LÓPEZ Marcial, Smart Antena, Perú,  
<http://aniak.uni.edu.pe/antenas/CH%2012%20Smart%20Antennas.pdf>

En la figura 2.21 se muestra un diagrama de bloques que ejemplifica el funcionamiento de este tipo de antenas.

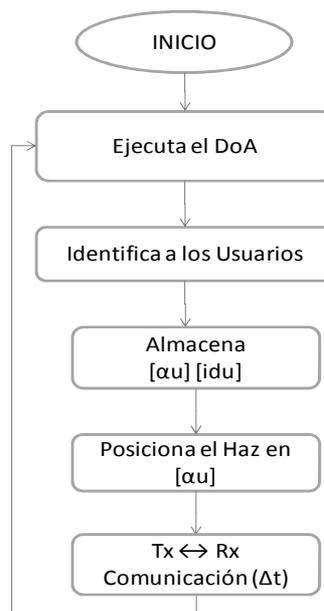


Fig. 2.21: Diagrama de control – Haz de Seguimiento.

### 2.4.3 Haz Adaptativo.

La configuración haz adaptativo es el tipo de antena inteligente más avanzado, complejo y difícil de implementar que existe. Su inteligencia es la máxima que se puede alcanzar con una antena inteligente.

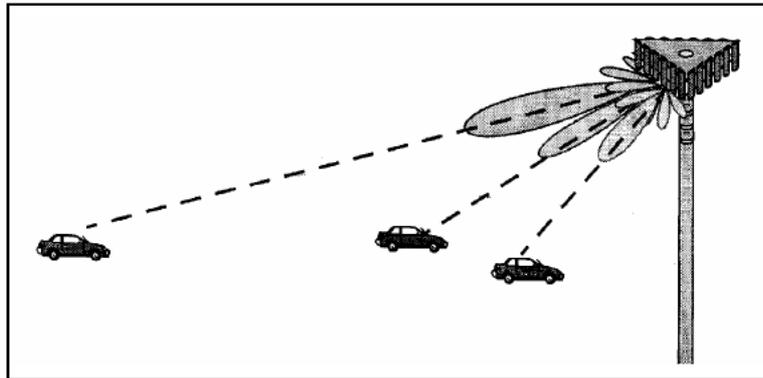


Fig. 2.22: Radiación - Antena de Haz Adaptativo.

\* Basado: GUITAL C; MUÑOZ E. Arquitectura de un modelo de redes wireless aplicando antenas smart, Chile, 2002,  
<http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2006/bmfcig968a/>

Las antenas inteligentes de haz adaptativo, como su nombre lo dice, pueden modificar o adaptar la forma de su patrón de radiación según sea la necesidad. Es capaz de cambiar la dirección de su lóbulo principal así como utilizar sus lóbulos secundarios para captar ciertas señales. Con esta característica la antena de haz adaptativo toma en cuenta las señales que han sido desviadas, es decir, utiliza las diferentes propagaciones por diferentes trayectos de la señal principal para captar la señal entera. Además de estas características, estas antenas pueden dirigir sus nulos de radiación hacia la dirección donde se encuentra la interferencia.

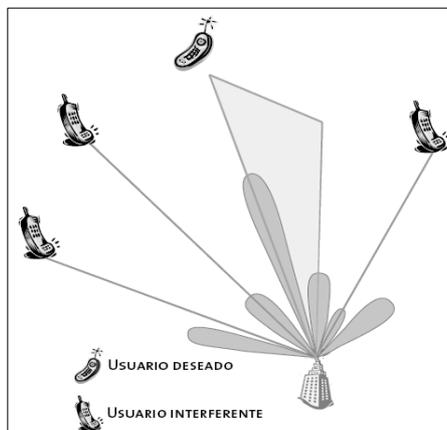


Fig. 2.23: Antena de Haz Adaptativo.

\* Fuente: LÓPEZ Marcial, Smart Antena, Perú,  
<http://aniak.uni.edu.pe/antenas/CH%2012%20Smart%20Antennas.pdf>

El lóbulo principal puede ser controlado de diferentes formas, pero conforme se varía la dirección de este, los lóbulos secundarios cambian también, es por esto que algunas veces, la señal de interferencia puede coincidir con un haz secundario. Si bien es cierto, su intensidad estaría reducida, puesto que es un lóbulo secundario con menor potencia de recepción, la señal que está siendo captada podría verse afectada por esta interferencia. Con la formación de nulos en estas direcciones se asegura que no haya interferencia que obstaculice la comunicación entre antenas.

En la técnica de haz adaptativo al igual que en la antena de haz de seguimiento, se requiere de un *array*, ya que, la señal proporcionada en cada elemento del *array* será ponderada con un factor de peso. El valor de estos pesos varía en función de numerosos parámetros tales como las posiciones de los diversos terminales, la potencia de las señales transmitidas, existencia de canal multitrayecto, etc. Cada algoritmo trata de minimizar una determinada función de coste para maximizar alguna de las características del resultado proporcionado por la antena.

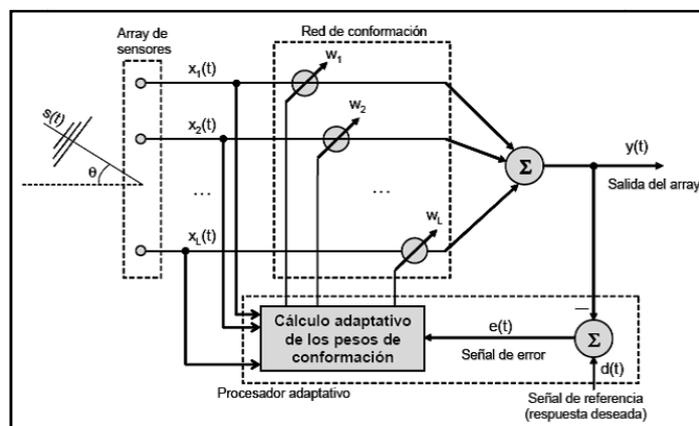


Fig 2.24: Sistema de arreglo Adaptativo.

\* Basado: GUITAL C; MUÑOZ E. Arquitectura de un modelo de redes wireless aplicando antenas smart, Chile, 2002,

<http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2006/bmfcig968a/>

Los pesos complejos son asignados continuamente para cada uno de los elementos del arreglo, para proporcionar los resultados adecuados en todo momento. Para la asignación y optimización de los pesos complejos o factores de peso, es necesario de un sistema de detección de DoA similar al utilizado en las antenas de haz de seguimiento y de un sistema de formación de haz.

Este tipo de antenas inteligentes está formado por dos subsistemas: el sistema de *beamforming* para antenas de haz adoptivo y el sistema de detección de DoA para el mismo tipo de antenas inteligentes. El sistema de detección de DoA ya ha sido mencionado previamente, lo único que cabe mencionar es que para las antenas de haz adaptivo, este sistema cumple dos funciones: la función de detectar la dirección de la cual proviene una señal y sus señales ramales y la función de asignar los factores de peso para cada elemento del arreglo.

La formación de haces o *beamforming* es generalmente digital, este cuenta con diferentes elementos que hacen que el procesamiento de las señales sea rápido y eficiente; tales como: mezcladores o *mixers*, osciladores locales, filtros pasa banda, convertidores analógico digital, *down-converters* y procesadores; estos últimos utilizan la señal modificada por los anteriores elementos para darle la forma del patrón de radiación adecuada.

Un aspecto importante en el tema de las antenas de haz adaptivo es el de los pesos complejos o factores de pesos asignados a los elementos del arreglo.

Un vector de pesos  $w$  contiene los factores de peso de cada elemento del arreglo. El objetivo es encontrar un vector de pesos que sea capaz de realizar un diagrama de radiación adecuado. Si un sistema es capaz de establecer NR comunicaciones al mismo tiempo con diferentes usuarios, habrá que calcular NR vectores de pesos para aplicarlos a las salidas y obtener NR salidas. Existen tres principales algoritmos que logran calcular estos vectores y estos se diferencian en el modo en que seleccionan al usuario deseado.

### **1. Técnicas con referencia temporal**

Para este método, el receptor genera localmente una estimación de la señal del usuario que desea captar. Esta estimación se obtiene a partir de una secuencia de entrenamiento conocida por el receptor. Posteriormente, el algoritmo encuentra los valores del vector  $w$  que minimiza el error entre la señal de salida del sistema de antenas y la estimación dada por la secuencia de entrenamiento. Con la solución

encontrada se maximiza la relación señal a ruido y se consigue dirigir el lóbulo principal del patrón de radiación hacia el usuario deseado. Con esta técnica además, se logra localizar nulos en las señales de interferencia y en las señales ramales. Si se quisieran utilizar estas señales ramales, habría que considerarlas como otro usuario diferente y crear otro vector de pesos para cada una.

## **2. Técnicas con referencia espacial**

Este método no se requiere el uso de secuencias de entrenamiento, pero en cambio, se necesita calcular el DoA del usuario deseado y de los interferentes. La ventaja de esta técnica frente a la anterior es que no necesita conocer datos estadísticos de la señal. Además, son muy sensibles a los posibles errores de direccionamiento del patrón de radiación, ya que, si la señal deseada no está en la misma dirección que apunta el lóbulo principal, puede ser eliminada al considerarse como interferencia.

## **3. Técnicas de referencia ciega**

Los algoritmos utilizados para esta técnica son los más complejos y explotan alguna característica conocida de la señal deseada, como por ejemplo algún tipo de modulación. Entre las técnicas más conocidas que utilizan referencia ciega está la CMA (code multiple access).

### **2.4.3.1 Funcionamiento – Haz Adaptativo**

Las antenas de haz adaptativo inicia su proceso calculando los pesos complejos de cada elemento del arreglo gracias al sistema de estimación del DoA. Se varían y ajustan estos factores de peso para obtener los ángulos de los cuales proviene la señal de interés. Una vez establecidos estos ángulos, se identifican los usuarios y su dirección, almacenando en memoria el código para dicho usuario y los ángulos que permiten conocer en donde está ubicado dicho usuario con respecto a la antena base.

Una vez identificados los usuarios y su localización en el espacio, el sistema de *beamforming* entra en acción, calculando los pesos complejos que permitirán formar

el patrón de radiación con la forma más adecuada según sea el DoA determinado anteriormente. Con los valores para los pesos complejos ajustados para el *beamforming*, la antena adquiere la capacidad de localizar su lóbulo principal en dirección a la señal deseada, sus lóbulos secundarios en dirección a los trayectos secundarios de dicha señal y los nulos en dirección a las interferencias. Una vez establecida la forma del patrón de radiación más adecuado, se procede a realizar la comunicación con el usuario, regresando, posteriormente, al cálculo de un posible nuevo DoA para un nuevo ajuste de los pesos complejos.

Una ilustración a este proceso, presenta la figura 2.25:

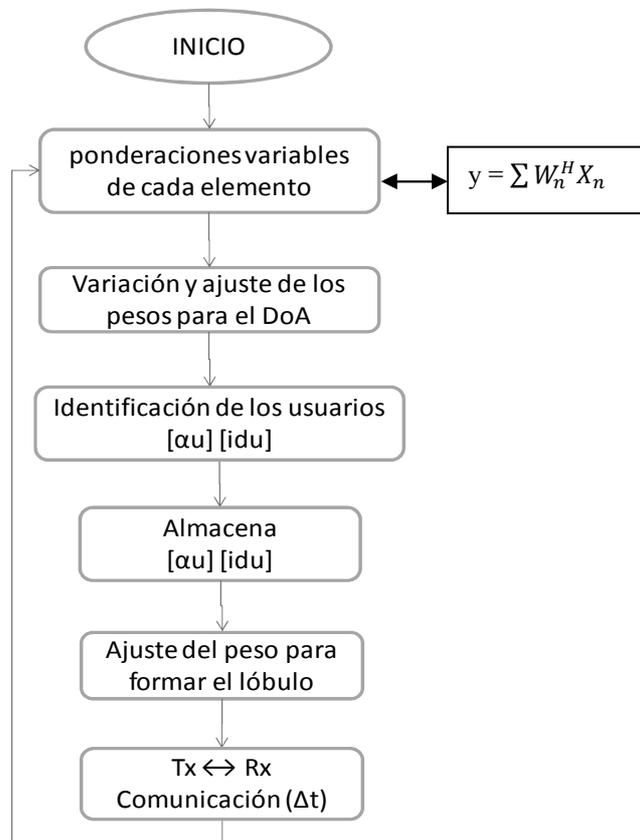


Fig 2.25: Programa de control sistema Adaptativo.

De la figura:  $W_n^H$  es una matriz formada por todos los vectores de peso y  $X_n$  es la matriz de vectores donde se tienen las señales recibidas por cada uno de los elementos del arreglo de antena utilizado.

2.5 Configuración de una Antena Inteligente.

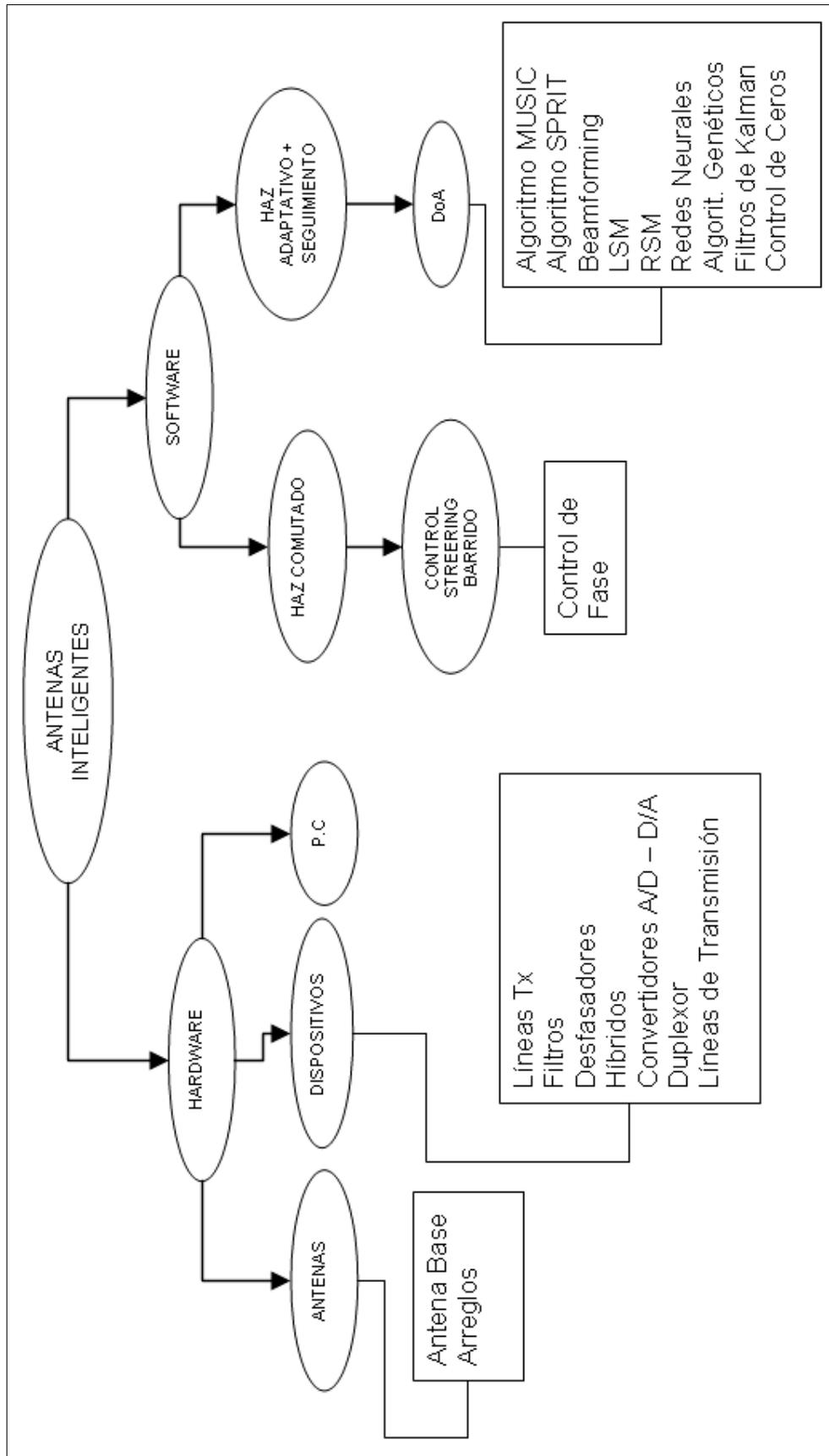


Figura 2.26. Configuración de una Antena Inteligente.

## **2.6 Beneficios de la tecnología de antenas inteligentes.**

El mayor reto de la implementación del SAS en comunicación móviles, es la gran cantidad de tráfico y el tiempo disponible para el cálculo complejo involucrado, que hoy en día, gracias a los procesadores digitales y el desarrollo de técnicas basadas en software han hecho que los SAS sean una realidad, lo cual hace pensar en los beneficios que ofrecerá este sistema:

La principal ventaja del uso de las antenas inteligentes es la capacidad que se obtiene de modificar el patrón de radiación. Con esto se logra dirigir los lóbulos principales hacia un objetivo específico mientras que los nulos se pueden orientar hacia las señales de interferencia o hacia donde se encuentren las principales fuentes de ruido.

Los múltiples lóbulos secundarios permiten también tomar en cuenta las ondas de la señal deseada que han sido desviadas por las características del canal de transmisión.

Con la ventaja directa de modificar el patrón de radiación se logran otras ventajas secundarias como por ejemplo:

- Incremento en la Zona de Cobertura: Con un arreglo de antenas la ganancia es mayor que en el caso de una antena omnidireccional o sectorizada, así transmitiendo a una misma potencia, se pueda recibir la señal a una mayor distancia.

En áreas poco pobladas, la ampliación de la cobertura es a menudo más importante que aumentar la capacidad. El incremento de cobertura proporcionado por las antenas adaptativas puede extender el rango de una celda para cubrir un área más grande y a más usuarios que con el uso de las antenas omnidireccionales o sectorizadas.

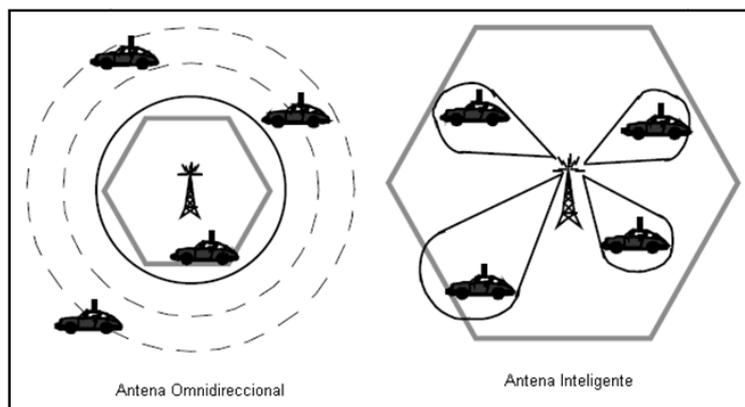


Fig.2.27: Rango de extensión usando SA.

\* Basado: GUERRERO Luis. Apuntes del curso: telecomunicaciones, Mexico, <http://hosting.udlap.mx/profesores/luisg.guerrero/Cursos/IE445/Apuntesie445/ie445home.htm>

- Reducción de la potencia de transmisión: La mayor ganancia del arreglo de antenas permitirá incrementar la sensibilidad de BS, por lo que los móviles podrán transmitir con menor potencia; debido a que toda la potencia de la antena está dirigida, el alcance utilizando la misma potencia es mucho mayor que en una antena isotrópica; con el aumento del área de cobertura se puede utilizar una menor cantidad de estaciones de transmisión base y con esto ahorrar costos en este aspecto.
- Incremento de la capacidad global del sistema. Gracias a las características anteriores que ofrece el sistema de SA, el suscriptor podrá transmitir una menor potencia por cada enlace, generando una disminución en la Interferencia de Acceso Múltiple (MAI), lo cual permitirá incrementar el número simultáneo de suscriptores que puede soportar cada BS.
- Reducción de la propagación multitrayecto. Debido a la menor dispersión angular de la potencia radiada por la BS, se reduce el número de trayectos múltiples que alcanzan al móvil, mejorando las características de dispersión de retardo del canal.
- Reducción de interferencia: La selectividad espacial que proporciona el sistema de antenas inteligentes, permite discernir las señales interferentes provenientes de otros usuarios con esto se logra hacer insensible a la antena receptora en esas direcciones y evitar que esas señales sean procesadas en el sistema de recepción; es decir, mediante los nulos de radiación de las señales de interferencias estos pueden ser ignorados total o parcialmente por el sistema.

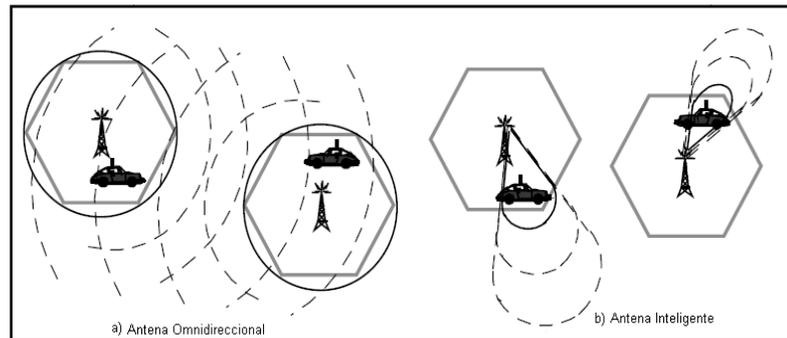


Fig.2.28: Reducción de interferencia.

\* Basado: GUERRERO Luis. Apuntes del curso: telecomunicaciones, Mexico, <http://hosting.udlap.mx/profesores/luisg.guerrero/Cursos/IE445/Apuntesie445/ie445home.htm>

- Aumento de la direccionalidad: mediante la modificación del lóbulo se logra apuntar más directamente el objetivo aunque este se encuentre en movimiento.
- Mejora de la Eficiencia Espectral. Debido que existe separación angular de los usuarios dentro de la celda, se pueden reutilizar los canales dentro de la misma celda. Este nuevo esquema de separación de usuarios recibe el nombre de multiplexación por división espacial (SDMA). Con ello, en un sistema TDMA (multiplexación por división de tiempo), se podría reutilizar el mismo slot de tiempo por varios usuarios, mientras que en CDMA (multiplexación por división de código) la ventaja se obtiene por reutilizar el código de ensanchamiento dentro de la celda.
- Mejora de la seguridad. Gracias a que la transmisión entre la BS y el terminal móvil es direccional, no será posible que un equipo ajeno intercepte la comunicación.
- Introducción de nuevos servicios. Gracias a las características que ofrece el sistema de SA, es posible pensar en servicios de valor agregado como la localización personal, entre otros.

Todos los suscriptores se beneficiarán de las ventajas que brinda el sistema de SA, ya que dicha tecnología es utilizada sólo en la BS y es transparente para cada usuario.

La desventaja que se tienen con las antenas inteligentes es la complejidad que involucra el uso de estas. Los procesadores de señales deben ser de última generación para evitar retardos que pueden ser totalmente perjudiciales cuando se

trabaja en el área de telecomunicaciones y los componentes utilizados deben ser los mejores que existan en el mercado para evitar pérdidas y tener la máxima exactitud posible. Como consecuencia de la complejidad de esta tecnología, se tiene el alto costo de implementar un sistema de antenas inteligentes, el cual llega a ser el impedimento principal para que se decida utilizar este tipo de antenas.

## **2.7 Aplicación de Antenas Inteligentes en Tecnología UMTS.**

Los sistemas de comunicaciones móviles están experimentando un claro giro hacia la provisión de servicios multimedia a sus abonados. Uno de los aspectos más característicos de estos servicios son las altas tasas binarias que demandan, lo cual, unido al hecho de que el número de usuarios no deja de crecer, provocará a medio plazo un incremento espectacular en el tráfico soportado por las redes móviles, haciendo necesario un incremento paralelo de su capacidad.

La capacidad de un sistema de comunicaciones móviles se puede definir como la tasa binaria que puede ofrecerse en el ancho de banda disponible y en un área geográfica determinada. En el sistema GSM se ha conseguido aumentar la capacidad mediante el uso de celdas de menor tamaño (microceldas y picoceldas) y, mediante la incorporación del sistema GPRS (que permite asignar varios *timeslots* simultáneos a un mismo usuario).

Ahora con la 3ra Generación (3G) UMTS, que presenta mayor capacidad, debido a su mayor ancho de banda y a la mejora en la eficiencia espectral respecto a GSM. Sin embargo, este incremento de la capacidad puede no ser suficiente en futuras aplicaciones.

La capacidad no es la única limitación inherente a los sistemas móviles como GSM y UMTS, también se destacan las siguientes:

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

frecuencia) y, además, el empleo de receptores Rake permitirá combinar las componentes de multitrayecto para mejorar la recepción de la señal deseada..

2. La interferencia cocanal, que empeora la relación C/I de la señal recibida, lo que afecta directamente al buen funcionamiento del sistema. Este efecto es mucho más pronunciado en los sistemas CDMA (como UMTS), ya que la relación C/I está directamente relacionada con el grado de cobertura de un Nodo B (*cell breathing*).

3. La dispersión temporal de la señal recibida, debida de nuevo al multitrayecto, que provoca un aumento de la interferencia entre símbolos. En UMTS, el receptor Rake ayuda a mitigar este efecto.

Un receptor rake es un receptor de telecomunicaciones diseñado para atenuar los efectos de la dispersión multicamino en un enlace de comunicaciones móviles. Lo consigue con varios sub-receptores levemente retrasados para sincronizar las componentes individuales de la trayectoria multicamino. Cada componente se decodifica de forma independiente, pero en una última etapa del receptor se suman constructivamente con objeto de sacar el máximo provecho de cada camino. Normalmente conseguirá una mejora de la relación señal a ruido (o relación energía de bit a ruido) en un entorno multicamino.

### **2.7.1 Antenas Inteligentes en SDMA (Acceso Múltiple por División Espacial)**

La configuración de arrays para sistemas SDMA 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 *timeslot* 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. La introducción de

SDMA supone la necesidad de contar también con complicados sistemas de gestión de usuarios, de asignación de canales, etc.

### **2.7.2 Antenas Inteligentes en CDMA (Acceso Múltiple por División Código)**

CDMA es la tecnología digital inalámbrica más moderna que ha abierto la puerta a una nueva generación de productos y servicios de comunicación inalámbrica.

Utilizando codificación digital y técnicas de frecuencias de radio de espectro amplio (RF), CDMA provee una mejor calidad de voz y más privacidad, capacidad y flexibilidad que otras tecnologías inalámbricas.

El CDMA permite que cada estación transmita en el espectro completo de frecuencia todo el tiempo. Las transmisiones múltiples simultáneas se separan usando la teoría de codificación. El CDMA también relaja el supuesto de que los marcos en colisión se alteran completamente. En cambio, supone que las señales múltiples se suman linealmente.

Los nuevos Sistemas de Comunicaciones Móviles de Tercera Generación (UMTS) basados en CDMA requieren la aplicación de nuevas técnicas para dar servicios multimedia a un gran número de usuarios. Dos métodos para dar cabida a más usuarios serían la asignación de más bandas de frecuencia o la reducción del tamaño de las celdas del sistema. Sin embargo, estas dos soluciones no serán suficientes a largo plazo.

Una posible solución para mejorar la capacidad de los sistemas WCDMA (Wideband CDMA) sería discriminar a los usuarios por su posición espacial utilizando antenas inteligentes en las estaciones base. Esta tecnología se basa en la reconfiguración dinámica del diagrama de radiación de la antena, dependiendo del entorno. Las ventajas aportadas por el uso de antenas inteligentes son la extensión de la zona de cobertura y la disminución de la interferencia procedente de usuarios no deseados. Esta última característica es muy importante en los sistemas CDMA, donde la capacidad del sistema está limitada por interferencia.

## **2.8 El Aporte de las Antenas Inteligentes.**

La demanda del incremento de la capacidad de las redes inalámbricas ha motivado la reciente búsqueda hacia el desarrollo de algoritmos y estándares que exploten el espacio de manera selectiva. Como consecuencia de esta demanda se está investigando sobre el diseño de antenas inteligentes.

El funcionamiento de muchos sistemas de ingeniería se entiende realmente cuando son comparados con el funcionamiento de un sistema del cuerpo humano:

### **Antenas Adaptativas, Analogía con el oído y cerebro humano**

Al cerrar los ojos e iniciar una conversación con alguien que se mueva por la habitación. A pesar de tener los ojos cerrados, le resultará sencillo saber por donde se mueve el otro interlocutor, por lo siguiente:

- Ud. está oyéndole por medio de dos oídos que son sus sensores acústicos.
- La voz llega a cada oído por distinto camino (diversidad de espacio), por tanto los sonidos no llegan a los dos oídos a la vez. Casi siempre habrá una pequeña diferencia.
- El cerebro es un procesador de señal muy especial, sin que usted se dé cuenta está realizando una gran cantidad de cálculos para determinar la posición de la otra persona.
- El cerebro, además, suma las señales de los dos oídos, de modo que el sonido que le llega de la orientación del interlocutor es el doble de intenso del que le llega de otras zonas.

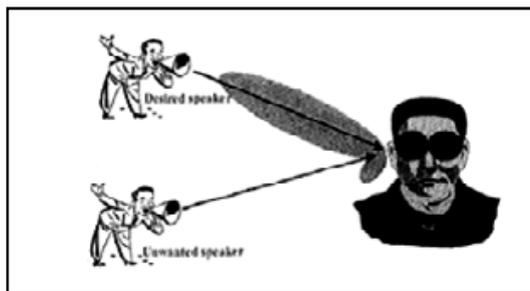


Fig.2.29: Analogía con el oído humano.

\* Fuente: LÓPEZ Marcial, Smart Antena, Perú,  
<http://aniak.uni.edu.pe/antenas/CH%2012%20Smart%20Antennas.pdf>

Las antenas adaptativas hacen lo mismo, con antenas en vez de oídos. Incluso pueden tener 8, 10 o 12 oídos para ser más precisas. Y como además de recibir sirven para emitir, un sistema adaptativo puede ajustar el patrón de emisión para que ilumine hacia la misma dirección de donde recibe. Por tanto, ese sistema además de recibir 8, 10 o 12 veces más fuerte también puede emitir más fuerte y con mayor directividad.

Ahora; si entrasen más personas a la habitación, su procesador de señal (su cerebro) ignoraría el ruido producido por las otras conversaciones, las que no quiere escuchar (las interferencias), para enfocar su atención en la conversación deseada. De manera similar un sistema adaptativo con un procesador DSP adecuado puede diferenciar entre las señales deseadas y las no deseadas. Análogamente, el DSP calcula la diferencia de retardo y, por siguiente, la posición del usuario con quien se comunica.

## CAPITULO 3

### CARACTERIZACION ESPACIAL DEL CANAL RADIO

#### 3.1 Introducción.

En el análisis de sistemas de antenas adaptativas, se hace necesario entender las propiedades espaciales que tienen los canales de comunicación inalámbricos, debido a que estas propiedades tendrán un gran impacto sobre el funcionamiento de los sistemas.

Los servicios de transmisión de datos a través de redes móviles constituyen uno de los sectores de las telecomunicaciones destinado a experimentar un auge muy notable en los próximos años. La demanda potencial de servicios móviles de datos es tan grande que está obligando a los operadores a suministrar este tipo de comunicaciones.

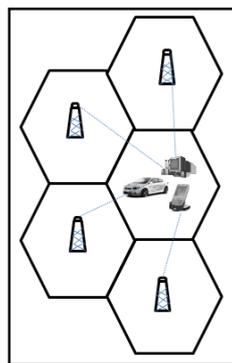


Fig. 3.1: Servicios de transmisión de datos.

Las razones principales por las que los usuarios están comenzando a solicitar, cada vez más, servicios de datos que utilicen el acceso radio, se dan ya que, el número de móviles con capacidad multimedia y de navegación son cada vez muy superior al de ordenadores personales, superando esencialmente a las líneas de telefonía fija que existen en la actualidad. La explicación a este crecimiento del mercado se encuentra

en el rápido avance de la tecnología, a las oportunidades comerciales que se asocian con la movilidad personal, y a la bajada del precio de los terminales y de las tarifas de conexión.

### **3.2 Canal de Radio**

El medio físico utilizado para enviar señales desde un transmisor hacia un receptor se le conoce como canal de comunicación. El canal de radio es el canal de comunicación que utiliza el espacio y la atmósfera como medios de transmisión. Este es extremadamente aleatorio y de análisis complicado pero su estudio es vital pues constituye la base de todas las tecnologías inalámbricas.

#### **3.2.1 Modelado de la propagación radio.**

Un modelo de propagación es un conjunto de expresiones matemáticas, diagramas y algoritmos usados para representar las características del medio donde transitan las ondas electromagnéticas en un ambiente dado.

El canal utilizado por los sistemas de comunicaciones vía radio presenta numerosas dificultades a la hora de transmitir información a través de él. A diferencia del canal de transmisión en comunicaciones por cable, que es estacionario y predecible, el canal radio es extremadamente variante con el tiempo y, por tanto, difícil de predecir.

Su análisis es complejo, haciendo del modelado del canal una de las partes más difíciles del diseño de sistemas de comunicación radio. Actualmente existen 2 modelos de propagación:

1. Aquellos modelos que intentan predecir la potencia media recibida en función de la distancia al transmisor. Son útiles para poder estimar el área de cobertura radio de un transmisor y se denominan modelos a gran escala. Las distancias al transmisor consideradas son del orden de centenares o miles de metros.

2. Modelos de propagación denominados modelos a pequeña escala. Son modelos cuyo objetivo es predecir la oscilación de la señal recibida en puntos próximos a una localización determinada. Al ser la separación de los puntos considerados muy pequeña con respecto a la distancia a este último, la atenuación de la señal recibida causada por la distancia al transmisor es común a todos los puntos considerados.

### 3.3 Principales fenómenos físicos que explican la propagación radio.

Para disponer de modelos de propagación radio más realistas, se debe contemplar la existencia de distintos objetos situados entre el transmisor y el receptor y estudiar su influencia en la propagación de la señal transmitida. Los tres fenómenos básicos que explican la propagación radio son la reflexión, difracción, refracción y dispersión.

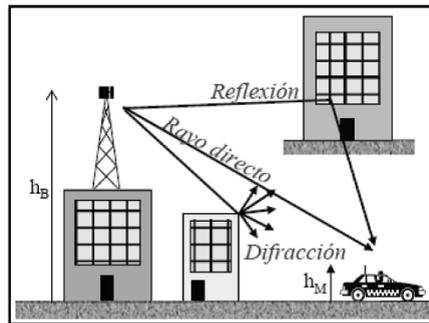


Fig. 3.2: Fenómenos físicos en la propagación de la señal.

\* Basado: ALVAREZ Sergio. Propagacion de RF, Mexico, 2004,  
[http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lem/peredo\\_a\\_s/](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/peredo_a_s/)

El fenómeno de reflexión ocurre cuando una onda electromagnética incide en una superficie lisa de grandes dimensiones con respecto a la longitud de dicha onda.

Cuando se recibe la señal de radio, el receptor no obtiene exactamente la señal que transmite el emisor, esto es debido al canal radio que posee características principales como la introducción de pérdidas de potencia, puede existir distorsión en las señales de radio enviadas, además, el medio es variante con el tiempo.

### 3.4 Componentes del modelo de canal radio

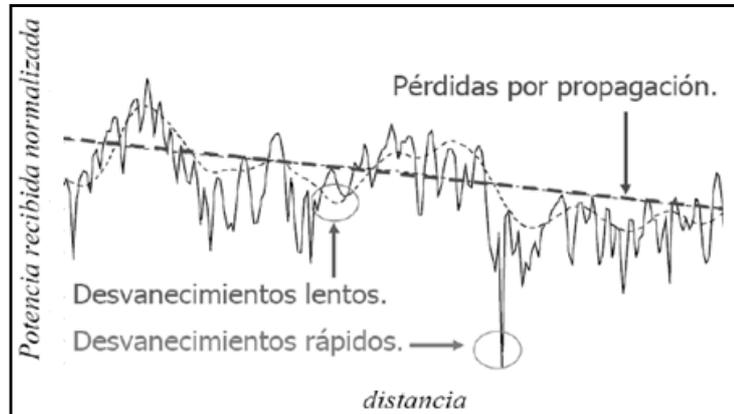


Fig. 3.2.1 Componentes del modelo de canal radio

\* Basado: FERNANDEZ Oscar. Caracterización experimental y modelado de canal MIMO, España, 2007, [http://www.tdx.cbuc.es/TESIS\\_UC/AVAILABLE/TDR-1006108-131325/](http://www.tdx.cbuc.es/TESIS_UC/AVAILABLE/TDR-1006108-131325/)

#### 3.4.1 Pérdidas por propagación

Las pérdidas por propagación son debido a la distancia; lógicamente cuanto distancia haya entre el emisor y el receptor, más pérdidas por propagación. Estas pérdidas son proporcionales a la distancia recorrida, de esto que en la figura anterior se represente con una línea recta.

**Multitrayecto:** La señal generada por el usuario del dispositivo móvil es de naturaleza omnidireccional, causando que la señal sea reflejada por estructuras tales como edificios, arboles, montañas, etc. resultando en la estación base el arribo de muchas copias retardadas de la señal.

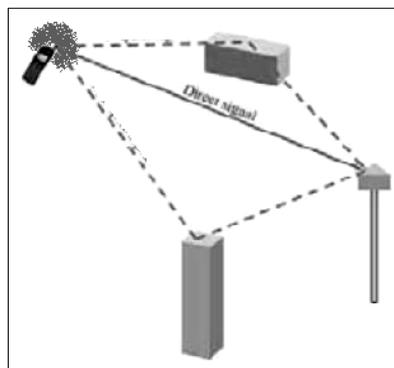


Fig. 3.3. Propagación de la Señal Multitrayecto

\* Fuente: LÓPEZ Marcial, Smart Antena, Perú, <http://aniak.uni.edu.pe/antenas/CH%2012%20Smart%20Antennas.pdf>

**Problemas Asociados con el Multitrayecto:** En la estación base las múltiples copias retardadas de la señal, por lo general, no están en fase presentando problemas posteriores tales como desvanecimiento (fading), cancelación de fase y retardo dispersivo.

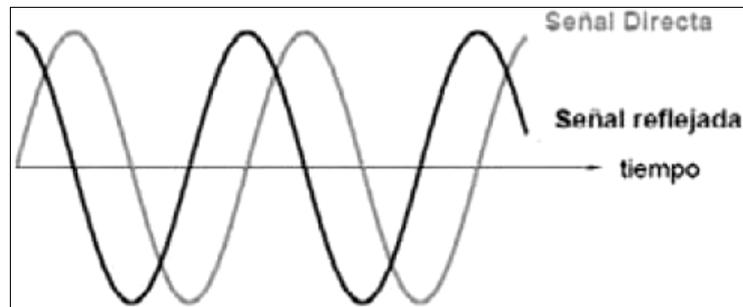


Fig. 3.4. Problemas en Señales de Multitrayecto.

\* Fuente: LÓPEZ Marcial, Smart Antena, Perú,  
<http://aniak.uni.edu.pe/antenas/CH%2012%20Smart%20Antennas.pdf>

**Desvanecimiento (Fading):** Las fases de los componentes de las señales de multitrayectos pueden combinarse destructivamente sobre un ancho de banda estrecho tanto como las señales sean retardadas, resultando en un desvanecimiento del nivel de señal recibida. Esta deficiencia de la señal es conocido como desvanecimiento tipo Rayleigh o rápido.

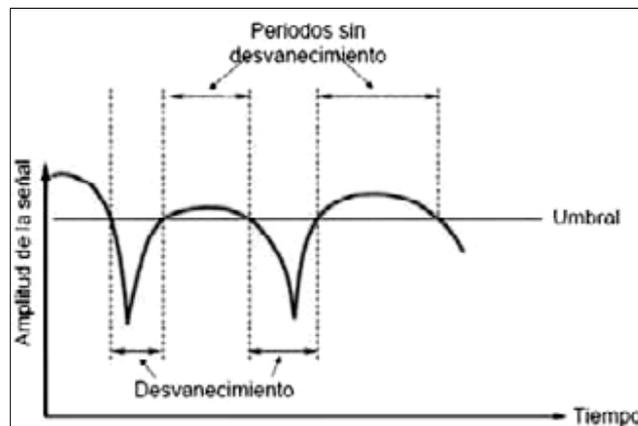


Fig. 3.5. Desvanecimiento

\* Fuente: LÓPEZ Marcial, Smart Antena, Perú,  
<http://aniak.uni.edu.pe/antenas/CH%2012%20Smart%20Antennas.pdf>

El desvanecimiento está cambiando constantemente y es un fenómeno en tres dimensiones creando zonas de desvanecimiento, las cuales son usualmente pequeñas y tienden a atenuar periódicamente la señal recibida, por ejemplo degradarla en calidad, en tanto los usuarios pasen a través de ellos.

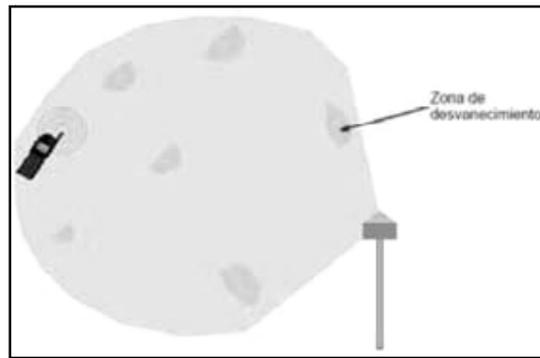


Fig. 3.6. Atenuación de la Señal recibida debido al desvanecimiento.

\* Fuente: LÓPEZ Marcial, Smart Antena, Perú,  
<http://aniak.uni.edu.pe/antenas/CH%2012%20Smart%20Antennas.pdf>

**Cancelación de Fase:** La cancelación de Fase ocurre cuando la llamada no se puede mantener por un periodo largo de tiempo y se interrumpe. Es decir, las señales del multitrayecto están rotadas  $180^\circ$  fuera de fase.

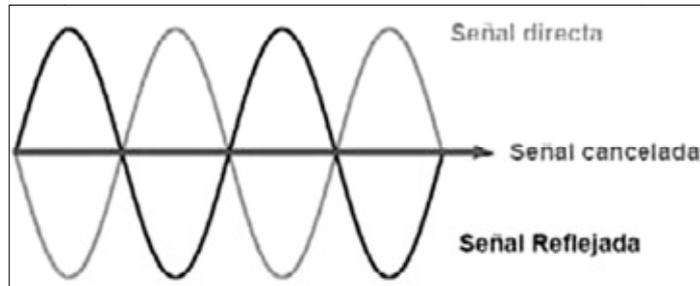


Fig. 3.7. Cancelación Completa de la Señal

\* <http://aniak.uni.edu.pe/antenas/CH%2012%20Smart%20Antennas.pdf>

**Dispersión del Retardo:** Con señales digitales, el efecto del multitrayecto causa una condición llamada dispersión del retardo (*delay spread*), los símbolos que representan los bits colisionan unos a otros causando Interferencia InterSímbolos (ISI). Cuando esto ocurre el BER (Bit Error Rate) se incrementa y se observa una degradación apreciable en la calidad.

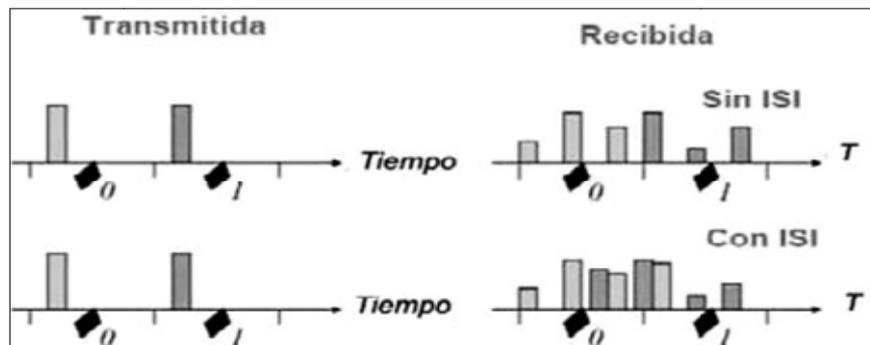


Fig. 3.8. Colisión de bit en una Transmisión Digital.

\* Fuente: LÓPEZ Marcial, Smart Antena, Perú,  
<http://aniak.uni.edu.pe/antenas/CH%2012%20Smart%20Antennas.pdf>

**Interferencia Co-Canal:** Este tipo de interferencia es el principal limitante en la maximización de la capacidad del sistema de comunicación móvil, teniendo la mayor desventaja las celdas omnidireccionales que las direccionales. Esta interferencia ocurre cuando una señal de un usuario interfiere con otra celda que tiene el mismo grupo de frecuencias.

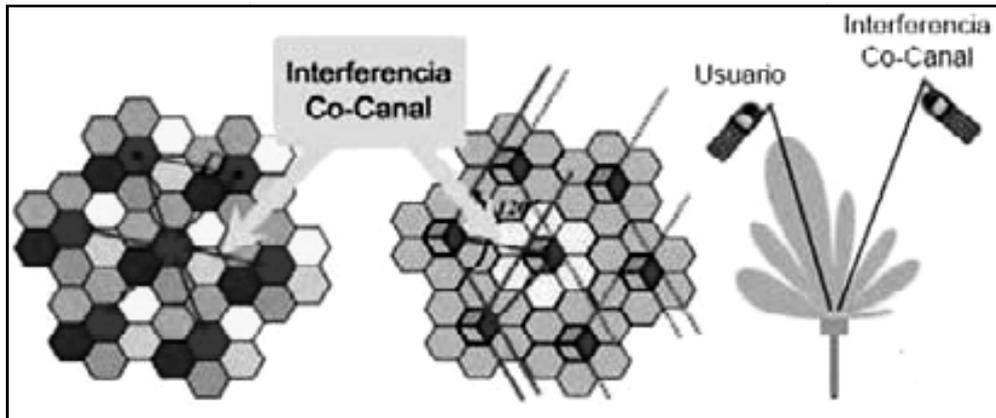


Fig. 3.9. Interferencia Co-Canal

\* Fuente: LÓPEZ Marcial, Smart Antena, Perú,  
<http://aniak.uni.edu.pe/antenas/CH%2012%20Smart%20Antennas.pdf>

De manera eficiente, los sistemas de antenas inteligentes combaten los efectos de la interferencia co-canal porque enfocan el patrón de radiación sobre determinados usuarios y direccionan nulos hacia los usuarios no deseados.

**Desvanecimientos lentos:** Debido a las obstrucciones y provocados por las zonas de sombra (shadowing). La variación lenta de potencia posee una función densidad de probabilidad log normal; es decir, el valor real de la potencia media recibido en un punto (sin considerar desvanecimientos rápidos) estará por encima o por debajo con cierta probabilidad calculada mediante modelos de propagación.

**Desvanecimientos rápidos:** Provocado por la propagación multicamino, quiere decir que, en el receptor inciden rayos con diferente retardo, amplitud y fase. Entonces esta variación de la señal transmitida debe considerarse en el cálculo de la BER (probabilidad de error en el bit).

### **3.5 Caracterización de canales radio móviles**

El estudio de la transmisión de datos en sistemas móviles requiere, como paso previo fundamental, la caracterización del entorno de propagación, es decir, el canal radio móvil.

Las redes móviles presentan características de transmisión muy diferentes de las de las redes tradicionales fijas. Estas características tienen su origen tanto en la propia naturaleza del medio físico utilizado (el canal radio) como en los efectos debidos a la movilidad.

Fundamentalmente son dos las características diferenciales del canal radio móvil frente a la red fija: las altas tasas de error y el ancho de banda reducido.

**3.5.1 Tasas altas de error:** La información enviada a través del canal radio resulta, inevitablemente, deteriorada. Algunas de las causas de este deterioro son:

- Los obstáculos reducen el nivel de la señal captada por el receptor. Esta atenuación, inherente al canal radio, es conocida como desvanecimiento lento o ensombrecimiento (shadow fading o shadowing). La reducción en el nivel de la señal por causa de este desvanecimiento es transitoria si el obstáculo en cuestión, el emisor o bien el receptor, están en movimiento.

La duración de la pérdida de señal puede durar unos pocos milisegundos o, incluso, prolongarse varios segundos dependiendo de factores como la naturaleza del obstáculo o la velocidad del terminal.

- La señal radio también puede verse sometida a reflexiones en obstáculos presentes en el camino pero no necesariamente en la línea de visión del receptor. Este fenómeno, conocido como propagación multicamino, puede ocasionar la llegada al receptor de señales con diferencias de fase tales, que su suma dé lugar a una interferencia destructiva cuyas consecuencias pueden llegar hasta la cancelación mutua, es decir, la eliminación total de la potencia

de señal en recepción. La propagación multicamino da lugar a desvanecimientos rápidos o de Rayleigh.

- Las interferencias procedentes de transmisiones concurrentes pueden degradar la relación señal/interferente.
- La limitación de la potencia transmitida por los terminales móviles, debida tanto a la necesidad de minimizar las interferencias como a consideraciones relacionadas con su alimentación mediante baterías contribuye, también, a la presencia de altas tasas de error en los enlaces radio.
- El ruido ambiente es inevitable en un entorno abierto y frágil como el canal radio. En núcleos urbanos, este factor es especialmente influyente.

Experimentalmente, las tasas de error en los canales radio móviles varían dentro del rango  $10^{-6}$  a  $10^{-1}$  dependiendo de las condiciones del enlace. Las redes fijas de fibra óptica presentan, en cambio, tasas inferiores a  $10^{-12}$ .

Hay que tener en cuenta, además, que el efecto combinado de los mecanismos generadores de errores (atmósfera, suelo, edificio, nieve, etc.) en la mayoría de canales es significativo, que éstos se producen en forma de ráfagas. Esto significa que los canales sufren periodos erráticos durante los cuales toda comunicación a través de ellos resulta inviable. Existe, por tanto, cierta dependencia estadística en la ocurrencia de los errores.

En concreto, el comportamiento de los canales radio está limitado por las frecuentes ráfagas de error causadas por los desvanecimientos, atenuaciones e interferencias. Durante los periodos de ráfaga, el terminal (o la estación base) recibe sólo una señal muy débil de manera que todos los intentos de transmisión de datos resultan fallidos con muy alta probabilidad.

**3.5.2 Ancho de Banda reducido:** El espectro de radiofrecuencia es un recurso extremadamente valioso y, como tal, es gestionado celosamente por las

administraciones. Esto supone que el ancho de banda disponible para la comunicación entre el móvil y la estación base es, siempre, limitado.

Por lo tanto, un aspecto primordial en el diseño de los sistemas móviles debe ser el uso eficiente del ancho de banda disponible. Así analizaremos las ventajas e inconvenientes de incorporar métodos de reducción del tamaño de los paquetes de información que viajan por los enlaces móviles que permitan utilizar de forma más eficiente el ancho de banda disponible.

**Efectos de la movilidad:** La movilidad de los terminales tiene claras consecuencias en las comunicaciones establecidas a través de éstas. Algunas de ellas se detallan a continuación:

- Cuando el usuario del terminal móvil cambia de celda, se lleva a cabo el proceso de traspaso, el cual transfiere el control de la comunicación desde la estación base inicial a una nueva estación base con cobertura en la nueva celda.

Durante el intervalo de tiempo que dura este proceso, los paquetes destinados al móvil y aquellos transmitidos por éste no pueden ser enrutados. Esto provoca pausas o latencias en la comunicación.

- En algunas ocasiones, el usuario móvil puede entrar en zonas de sombra, es decir, zonas en las que ninguna estación base puede darle cobertura. En estos casos, se producen desconexiones temporales que suponen la pérdida de paquetes. Cuando el terminal móvil sale de la celda inicial y entra en la zona de sombra y sigue apuntando a la anterior estación base como intermediaria en la comunicación. Sólo cuando recibe la señal de indicación de presencia procedente de la nueva estación base, puede el terminal actualizar la tabla; sin embargo, hasta ese momento, el terminal continúa enviando paquetes que, inevitablemente, no llegan a su destino. Por otro lado, también los paquetes destinados al terminal móvil se pierden ya que la estación base no detecta que el móvil ha abandonado su celda hasta que la nueva estación base se lo notifica explícitamente, lo cual no ocurre hasta que el móvil se conecta a ella.

**Efecto de los errores y las desconexiones:** En los entornos móviles las pérdidas de paquetes son muy frecuentes debido no a congestión sino, básicamente, a las altas tasas de error que caracterizan al canal radio y a las desconexiones temporales asociadas a procesos de traspaso. Por lo tanto, los algoritmos de control de la congestión que TCP activa al detectar los errores propios del enlace móvil, pueden ocasionar un comportamiento muy poco eficiente del protocolo en estos entornos, cuyos efectos deben ser evaluados.

### **3.6 Modelos para la caracterización del canal de radio en comunicaciones**

Las telecomunicaciones en la actualidad tienden a la convergencia de tecnologías, siendo el objetivo principal, que la información pueda viajar del transmisor al receptor a través de cualquier medio de comunicación. Para lograr esto la telefonía celular de 3G se presenta como el principal soporte, debido a la capacidad que tendría de llevar a un usuario móvil servicios como voz, datos, video, internet, audio de alta calidad, e-mail, entre otros.

En este contexto, es importante estudiar el canal de radio, lo que implica conocer los mecanismos fundamentales de propagación de las señales de radio, los factores de atenuación y las fuentes de distorsión. Con esta información se puede modelar matemáticamente dicho canal, y a su vez, utilizarle para diseñar apropiadamente sistemas moduladores y codificadores de canal.

Un modelo de propagación es un conjunto de expresiones matemáticas, diagramas y algoritmos usados para representar las características del medio donde transitan las ondas electromagnéticas en un ambiente dado. Dicho ambiente de propagación, el área de cobertura, o el origen de los datos son algunos criterios que se utilizan actualmente para clasificarlos, en este último caso permitiendo una división entre modelos empíricos y teóricos.

Una técnica avanzada para el control del desvanecimiento de señales de radio, problema asociado a efectos de propagación multitrayectoria, y la mitigación de la interferencia co-canal en sistemas móviles, son los sistemas de antenas inteligentes

basados en arreglos de antenas y procesamiento de señales espacio-temporales, los cuales buscan mejorar el desempeño de los sistemas inalámbricos aumentando la capacidad de transmisión de datos bajo entornos dinámicos.

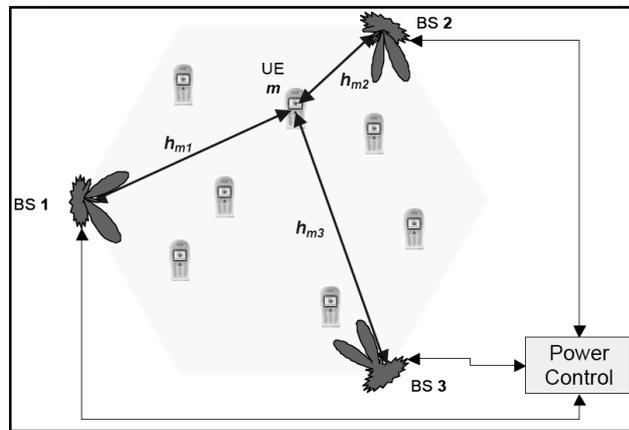


Fig. 3.10: Sistema inteligente.

\* Basado: LÓPEZ Marcial, Smart Antena, Perú,  
<http://aniak.uni.edu.pe/antenas/CH%2012%20Smart%20Antennas.pdf>

Las características de propagación que intervienen en un sistema de comunicación que utiliza antenas inteligentes son:

### 3.6.1 Propagación multitrayectoria y desvanecimiento a pequeña escala

Para analizar los procesos y técnicas utilizados en los equipamientos de comunicación que buscan la correcta recepción y transmisión de la información en entornos dinámicos, es relevante comprender los diferentes fenómenos asociados a la propagación de las ondas electromagnéticas sobre las cuales se transmite la información. En este sentido, el fenómeno de multitrayectoria en el canal, ocasionado por múltiples reflexiones, difracciones y dispersión de la señal transmitida y que llegan al receptor, crea efectos de desvanecimiento a pequeña escala, de los cuales los tres más importantes son:

- Rápidos cambios en la intensidad de la señal sobre una corta distancia de viaje o en intervalos.
- Modulación de frecuencia aleatoria debido a cambios Doppler en diferentes señales multitrayectoria.

- Dispersiones en el tiempo (ecos) causadas por retardos en la propagación multitrayectoria.

El desvanecimiento a pequeña escala, o simplemente desvanecimiento, es un término para describir la rápida fluctuación de la amplitud de una señal de radio en un corto periodo o durante el viaje de ésta en una distancia corta en relación a su longitud de onda.

El desvanecimiento a pequeña escala es causado por la interferencia entre dos o más versiones de la señal transmitida cuando llegan al receptor con muy poco tiempo de diferencia.

Estas señales son llamadas señales de multitrayectoria o multipath, y son combinadas en la antena receptora para obtener una señal resultante la cual puede variar de gran forma en amplitud y fase, dependiendo de la distribución de intensidad, del tiempo relativo de propagación de las ondas y del ancho de banda de la señal transmitida (el cual varía de un sistema a otro).

### 3.6.1.1 Factores físicos en un canal macro y micro célula

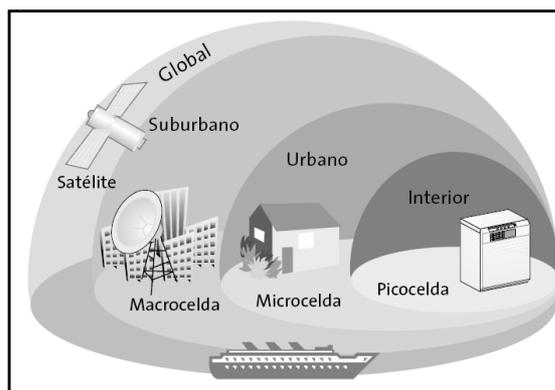


Fig. 3.10.1 Estructura jerárquica de celdas,

\* Basado: GUITIERREZ Jenny, Telecomunicaciones, España, 2009,  
<http://jennygutierrez0606.blogspot.es/>

Los principales factores físicos en el canal de propagación que influyen en el desvanecimiento a pequeña escala son:

**1) Propagación Multitrayectoria:** La presencia de objetos reflectores y dispersores en el entorno crea un cambio constante en el canal de propagación de la señal, lo que disipa energía en amplitud, fase y tiempo. Estos efectos producen múltiples versiones de la señal transmitida que llega a la antena receptora, desplazadas una respecto a la otra en tiempo y orientación espacial.

De estos tipos de propagación multitrayectoria se destaca que los tiempos de viaje de las ondas son distintos y el modelado de cada uno de los canales se debe hacer con consideraciones estadísticas diferentes, lo que en últimas se traduce en el diseño de equipos de comunicaciones específicos para cada entorno celular y la aplicación de técnicas de mitigación de diferentes variantes.

**2) Velocidad Relativa:** El movimiento relativo entre el transmisor (satélite, radio base o punto de acceso) y el móvil produce una modulación en frecuencia aleatoria debido a diferentes efectos Doppler (variación de la longitud de onda emitida o recibida por un objeto en movimiento) en cada una de las componentes multitrayectoria.

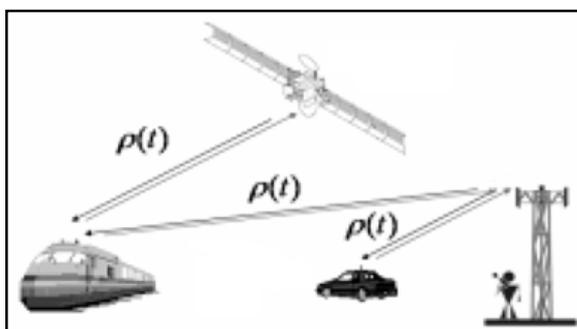


Fig. 3.10.2 Estructura jerárquica de celdas,

\* Basado: LENIZ Roberto, El radar de navegacion, 2008, <http://navegacion.tripod.com/Apuntes2008/Cap16RadarNv.pdf>

Si la función  $\rho(t)$  describe la distancia entre el transmisor y el receptor respecto al tiempo, ésta dependerá del rango, velocidad y aceleración relativos. Desde el punto de vista de aplicación, las limitaciones en el procesamiento de señales en sistemas de comunicaciones móviles para el control de este fenómeno, se relacionan con la intensidad de la señal recibida, el ruido, y los cambios de nivel debido al paso de la señal por los bloques de radiofrecuencia, interferencia y Banda Base, donde en este

último se espera que el desplazamiento Doppler siga siendo perceptible para su detección y control.

**3) Velocidad de Objetos Cercanos:** Si los objetos del entorno se encuentran en movimiento, inducen un efecto Doppler variando el tiempo en las componentes multitrayectoria. Si los objetos cercanos se mueven a mayor velocidad que el móvil, entonces este efecto domina el desvanecimiento a pequeña escala.

**4) El Ancho de Banda de la Señal:** Si el ancho de banda de la señal transmitida es más grande que el ancho de banda del canal multitrayectoria, la señal recibida puede ser distorsionada, pero la intensidad no decaerá demasiado sobre un área local (el desvanecimiento a pequeña escala de la señal no será significativo sobre todo el espectro); es decir, si la señal transmitida tiene un ancho de banda estrecho comparado con el del canal, la amplitud de la señal cambiará rápidamente, pero la señal no se distorsionará en el tiempo (todo el ancho de banda se verá afectado por los mismos tiempos de propagación y representará una atenuación constante de todo el espectro).

Este fenómeno es aprovechado claramente en el esquema de acceso múltiple CDMA (esquema de espectro expandido) utilizado en sistemas satelitales y terrestres, donde se manifiesta aún más su potencialidad al aplicarlo en sistemas inteligentes utilizando técnicas DS-SS-CDMA (CDMA de Secuencia Directa: *Direct Sequence CDMA*), permitiendo controlar el fenómeno de Interferencia Intersímbolo (ISI: *Intersymbol Interference*) y otros problemas asociados a la propagación multitrayectoria y a la interferencia  
cocal.

### **3.6.2 Respuesta al impulso de un canal multitrayectoria**

La respuesta al impulso es una caracterización de un canal de banda ancha y contiene toda la información necesaria para simular o analizar cualquier tipo de radio transmisión a través del canal. Esto hace posible que un canal inalámbrico de comunicación pueda ser modelado como un filtro lineal con una respuesta al impulso

variante en el tiempo, donde la variación del tiempo es debida al movimiento del receptor.

Al considerar sistemas multiusuario CDMA, ya sean satelitales o terrestres, y la aplicación de técnicas con antenas inteligentes en estos sistemas, hay algunas características comunes de configuración de los enlaces y de las consideraciones de respuesta al impulso de los canales. En canales con antenas inteligentes, si se representa un sistema multiusuario con  $N$  usuarios comunicándose con un receptor común (estación base o satélite), el receptor debe estar equipados con un arreglo de antenas para la transmisión y recepción.

Actualmente, la solución a este problema del comportamiento dinámico en sistemas multiusuario con antenas inteligentes hace parte de numerosas investigaciones abordadas desde un punto de vista de procesamiento de señales espacio-temporales en sistemas multiusuario DSCDMA, lo que implica, además de una convivencia del sistema bajo interferencia co-canal, un control simultáneo de los problemas asociados a los efectos dinámicos.

### **3.6.3 Canal multitrayectoria**

Los parámetros del canal multitrayectoria se derivan principalmente del perfil de retardo de potencia (*PDP Power Delay Profile*), que se expresa como la potencia relativa en el receptor y es una función respecto a un tiempo de retardo fijo de referencia. Dichos perfiles son encontrados por medidas de promedio instantáneas sobre un área local para determinar un perfil promedio a pequeña escala, es decir, son un promedio temporal o espacial de medidas consecutivas de respuestas al impulso recolectadas y promediadas sobre un área local, y que dependen de la resolución temporal del pulso de prueba y del canal multitrayectoria. En la práctica, se realizan múltiples medidas de esta clase sobre áreas locales en busca de establecer un rango estadístico de los parámetros de un canal multitrayectoria, para luego ser utilizados sobre áreas a gran escala en el diseño de sistemas de comunicaciones móviles (terrestres y satelitales).

La dispersión temporal para sistemas de amplia cobertura, como en macroceldas en sistemas móviles terrestres, su valor es bastante elevado, pero al considerar megaceldas en sistemas satelitales, debido al gran ángulo de elevación entre el usuario y el satélite hace que esta dispersión sea menor. En la tabla 1 se pueden apreciar valores típicos de dispersión temporal para distintos entornos de propagación.

Tabla 3.1: Dispersión temporal

Entorno	Dispersión temporal RMS, $\tau_{RMS}$ [ $\mu$ s]
Indoor	0.01-0.05
Móvil satelital	0.04-0.05
Área abierta	<0.2
Macrocela suburbana	<1
Macrocela urbana	1-3
Macrocela en área <i>montañosa</i>	3-10

Tomado de: Saunders, Simon R.. Antennas and propagation for wireless communication systems. West Sussex: John Wiley & Sons, 1999. p. 243.

De ésta tabla se destaca que en entornos montañosos se presenta uno de los peores casos y tal vez el más crítico, asunto relevante para la región andina donde las principales ciudades se han construido rodeadas de colinas y sobre terreno irregular. Esta característica dispersiva en el tiempo afecta directamente la *tasa de transmisión de datos*, y que en comparación con un entorno satelital, deberá ser menor si no se utilizan técnicas especiales para reducir la ISI. Esto será aún más complejo de controlar dado el nuevo concepto de movilidad planteado por UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*), donde los terminales de usuario deberán estar equipados con tecnología que permita su adaptación al entorno de propagación donde éste se encuentre. En relación con los valores mostrados en la Tabla 1 (rangos establecidos por entorno), se puede agregar que la frecuencia de la portadora es otra variable relacionada con la dispersión temporal y que a medida que ésta se incrementa los valores de dispersión se reducen, una ventaja en los sistemas móviles 3G y 4G donde sus bandas de operación se han establecido por arriba de 1 GHz.

### **3.7 Estadística aplicada para modelar el desvanecimiento del canal**

Debido a las características variables de los fenómenos de propagación de la señal por el canal de radio, es necesaria la aplicación de técnicas estadísticas para su modelado.

En canales móviles, la función de densidad de probabilidad (p.d.f: *probability density function*) *Rayleigh* (o distribución *Rayleigh*) es la más usada ya que describe la naturaleza estática de la variación temporal de la envolvente recibida de una señal en desvanecimiento plano, o la envolvente de una componente individual de multitrayectoria. Otra distribución utilizada es conocida como *Rice*, y se usa para describir el desvanecimiento de la envolvente cuando hay una componente de señal estacionaria dominante (rayo directo).

Para el análisis de sistemas con antenas inteligentes, las distribuciones de probabilidad de las componentes multitrayectoria son importantes al realizar simulaciones en condiciones específicas de señal y canal, al igual que las consideraciones estadísticas de todos los fenómenos relacionados.

Por lo general, la respuesta al impulso del canal (o canales múltiples) puede ser experimentada como un filtro receptor de ancho de banda finito; el cual podría no dar buenos resultados sobre la respuesta temporal. Por ello, se pueden tomar procesos dispersivos con retardos similares y sumarlos dentro de una ventana discreta; dado que la resolución del sistema no estará habilitada para distinguir entre el caso discreto y el continuo.

El estudio de los efectos a pequeña escala en sistemas inalámbricos terrestres y satelitales están desarrollando modelos apropiados para estos sistemas y canales inalámbricos en diferentes entornos, como túneles, edificios, zonas boscosas y terreno irregular, en banda ancha y banda angosta, permitirán la mejora de las actuales interfaces aire, incrementando su capacidad y la calidad del servicio ofrecido a los usuarios. La aplicación de los conceptos de desvanecimiento a pequeña escala junto con el desarrollo de sistemas basados en arreglos de antenas, como el

caso de sistemas inteligentes, y la aplicación de técnicas de conformación de haz para el control de la interferencia co-canal, presentan una de las principales perspectivas de desarrollo futuro de sistemas inalámbricos de alta capacidad.

El perfeccionamiento de una solución en sistema inteligente está atado a las características particulares de cada sistema y del entorno de propagación. En dicha línea, el procesado espaciotemporal cobra importancia dadas las particularidades dinámicas de los entornos y la movilidad de los usuarios que generan canales múltiples.

La ventaja de las soluciones desarrolladas para sistemas 3G y 4G es la frecuencia de operación, pues dadas sus elevadas posiciones dentro del espectro radioeléctrico, se tiende a minimizar el tiempo de retraso de la señal (tiempo coherente).

Otra ventaja de estos sistemas de banda ancha, es la creciente y casi unificada tendencia a su desarrollo sobre tecnologías de espectro expandido como CDMA, lo que garantiza un mejor comportamiento sobre canales multitrayectoria en consideraciones de tiempos de dispersión y tiempos coherentes, además de las ventajas específicas de DS-SS-SS-SS en cuanto a la reducción en la estimación de parámetros del canal y de la geometría de los arreglos de antenas en sistemas inteligentes.

## CAPITULO 4

### ARRAY DE ANTENAS EN COMUNICACIONES MOVILES.

#### 4.1 Introducción.

En el capítulo 1 se estudio a la antena como una fuente puntual, en este capítulo se expondrá el comportamiento de la agrupación de estas fuentes puntuales conocidas como arreglos (*arrays*). Este enfoque es de gran valor ya que el patrón de cualquier antena puede ser considerada como producida por *array* de fuentes puntuales.

Las agrupaciones de antenas son estudiadas especialmente en ciertas aplicaciones donde se requieren características de radiación que no pueden lograrse con un solo elemento; sin embargo, con la combinación de varios de ellos se consigue una gran flexibilidad que permite obtenerlas. Estas agrupaciones pueden realizarse combinando, en principio, cualquier tipo de antena.

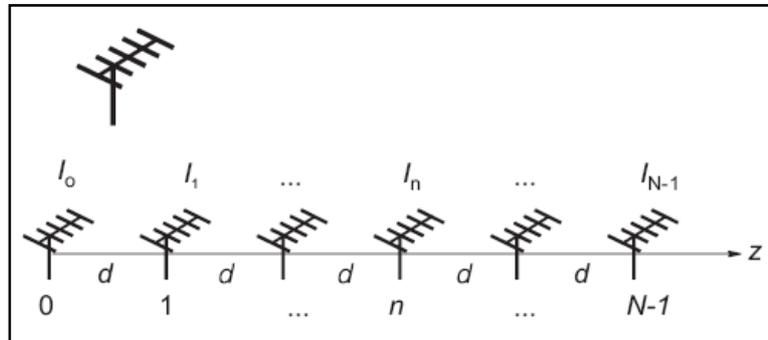


Fig.4.1 Array.

\* Fuente: CARDAMA, Angel. Antenas, España, UPS, 1998. pg.172.

Un *array* de antenas está formado por un conjunto de N antenas iguales que radian o reciben simultáneamente. La distancia entre los elementos es típicamente del orden de la longitud de onda  $\lambda$ . El diagrama de radiación del conjunto se obtiene como la interferencia de los campos radiados por cada una de las antenas, mientras que en recepción la señal es una combinación lineal de las señales que capta cada antena.

Es posible sintetizar diagramas arbitrarios controlando las amplitudes y fases de la alimentación de cada antena mediante divisores de potencia y desfases variables.

Los arreglos son conocidos también como baterías de antenas, estos arreglos o baterías son utilizados para obtener mejores características de radiación, los más utilizados son los arreglos lineales, generalmente.

#### **4.2 Definición de Arreglos de Antenas.**

Un arreglo de antenas es un conjunto de antenas simples, generalmente iguales y orientadas en la misma dirección, las cuales son acomodadas en una disposición física determinada, relativamente cercanas una respecto de la otra, además, cada antena es manejada por un mismo sistema de separación (o combinados) de la señal y son capaces de concentrar la radiación en direcciones deseadas.

Un arreglo implica nuevos factores y conceptos. Se compone de más de un elemento, pero el elemento básico es generalmente el dipolo. A veces el elemento básico se hace más largo o más corto que una media onda, pero la desviación no es generalmente grande.

Un elemento parasito es a veces colocado para que produzca máxima radiación durante la transmisión desde su conductor asociado. Cuando opera refuerza la energía que viene desde el conductor a través de sí mismo, el elemento parasito es llamado director. Si un elemento parasito es colocado y causa la máxima radiación de energía en una dirección lejos de sí mismo y a través del elemento conductor, ese elemento parasito es llamado reflector

Si todos los elementos en el arreglo son conductores, el arreglo es llamado arreglo conductor. Si uno o más elementos son parásitos, el sistema entero usualmente es considerado como un arreglo parásito. Los arreglos con varios elementos se clasifican con frecuencia según su directividad. Un arreglo direccional irradia en direcciones opuestas a lo largo de la línea de la radiación máxima. Un arreglo Unidireccional irradia solamente en una dirección.

Los arreglos se pueden describir con respecto a sus patrones de radiación y a los tipos de elementos de los cuales se hagan. Sin embargo, es de utilidad para

identificarlos, su colocación física de los elementos y la dirección de la radiación con respecto a estos elementos.

Un arreglo colineal es uno en el que todos los elementos descansan en línea recta sin radiación al final del arreglo. La dirección de máxima radiación es perpendicular al eje de los elementos. Un arreglo End-Fire es uno en el cual la dirección principal de la radiación es a lo largo del plano del arreglo y perpendicular a los elementos. La radiación esta desde el fin del arreglo, es por esta razón que el arreglo es llamado como un arreglo de fin.

Suele suceder que un sistema utiliza a veces las características de más de una de los tipos mencionados anteriormente. Por ejemplo, algunos de los elementos pueden ser colineales mientras que otros pueden ser paralelos.

Tales arreglos se refieren a menudo como un Arreglo de la Combinación o Arreglo de Ordenes. Puesto que ocurre la radiación máxima perpendicularmente al plano del arreglo.

### **4.3 Elementos de un arreglo**

Un arreglo de antenas, además de las antenas que lo conforman, está hecho de diferentes elementos que, en conjunto, logran el comportamiento deseado para ese arreglo.

La estructura general de un arreglo consta, entre otros, de los siguientes elementos:

- **Red de alimentación:** provee a los diferentes atenuadores la energía para que, luego de ser modificada, sea radiada. Los acopladores que envían la energía para una u otra dirección tienen que tener acople de impedancias y deben estar aislados para evitar alguna reflexión que se pueda dar debido al coeficiente de reflexión que tienen los elementos del arreglo.
- **Variadores de fase:** modifican la fase de la señal recibida desde la red de alimentación.

- **Un procesador digital de señales:** realiza los cálculos necesarios para establecer la atenuación y la fase de cada elemento del arreglo según se necesite el patrón de radiación.
- **Antenas:** elemento de interfaz entre un circuito eléctrico y el espacio físico que genera ondas electromagnéticas a partir de una señal proveniente del circuito y viceversa.

#### 4.4 Definición de Términos en Arreglos de Antenas.

**4.4.1 Posición de la Fase.** Componentes reflejados y refractados de la onda propagada crean efectos de refuerzo y cancelación. En ciertos puntos distantes del transmisor, algunos de los componentes de la onda satisfacen el espacio. Deterioran o mejoran la recepción en estos puntos. Si los diversos componentes llegan un punto dado en la misma fase, agregan, haciendo una señal más fuerte disponible. Si llegan fuera de fase, cancelan, reduciendo la fuerza de la señal.

**4.4.2 Patrón de Radiación:** Los efectos semejantes a los descritos en el párrafo anterior pueden ser producidos en el punto en que transmite. Considerar los patrones de radiación de la siguiente figura. Ver la demostración de A, una vista sin obstáculo de un solo dipolo. En los dipolos de la figura B, mostrados como puntos 1 y 2, son perpendiculares al plano de la página. Se espacian en  $\frac{1}{4}$  longitud de onda ( $\lambda$ ) de la frecuencia de funcionamiento.

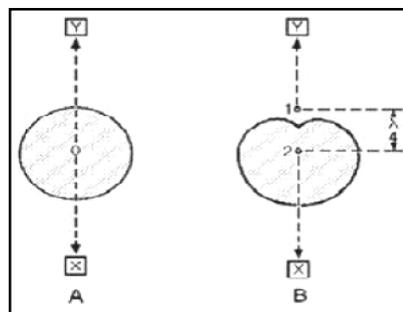


Fig.4.1.2 Posición en fase de la antena en el espacio.

\* Basado: GUITAL C; MUÑOZ E. Arquitectura de un modelo de redes wireless aplicando antenas smart, Chile, 2002, <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2006/bmfci968a/>

Continuando con la demostración B de la figura 4.1: el patrón de radiación de cualquier antena 1 o 2, funcionando sola, sería uniforme en todas las direcciones en

este plano, según lo visto en la figura A. Se supone que la corriente está alimentando a ambas antenas por el mismo transmisor de una manera tal que el retraso de la antena 2 con respecto a la antena 1 es de 90 grados. La energía que irradia de la antena 1 hacia la recepción de la localización X alcanzará la antena 2 después de  $\frac{1}{4}$  ciclo de la operación. La energía de ambas antenas se sumará y la propagación hacia X será fuerte. La radiación de la antena 2 hacia la recepción de la localización Y alcanzará la antena 1 después de  $\frac{1}{4}$  ciclo. La energía en la antena 1 era  $\frac{1}{4}$  ciclo detrás de la antena 2, por lo tanto, la radiación de la antena 1 hacia la recepción del punto Y será exactamente  $180^\circ$  fuera de fase con el de la antena 2. Consecuentemente, los campos de radiación cancelarán y no habrá radiación hacia el eje Y.

En la recepción de la señal lejos de la línea de la radiación, las diferencias de fase ocurren entre 0 y 180 grados, produciéndose variaciones de energía en esa dirección. El efecto total es mostrado por el patrón de radiación en la figura B. La relación física de la fase causada por el espaciamiento de  $\frac{1}{4} \lambda$  entre los dos elementos, así como la fase de las corrientes en los elementos, ha actuado para cambiar el patrón de radiación de las antenas individuales.

**4.4.3 Posición en Fase de los Elementos:** Cuando dos elementos de media onda ( $\frac{1}{2}\lambda$ ) están conectados directamente, sus corrientes están en fase, este efecto es igual al de una antena de onda completa (ver figura 4.2 A). La corriente en la primera longitud de  $\frac{1}{2} \lambda$  es exactamente  $180^\circ$  fuera de fase, con la segunda longitud de  $\frac{1}{2} \lambda$ . Esto es contrario de la condición deseada. En la figura 4.2, las flechas indican la dirección del flujo actual en la antena.

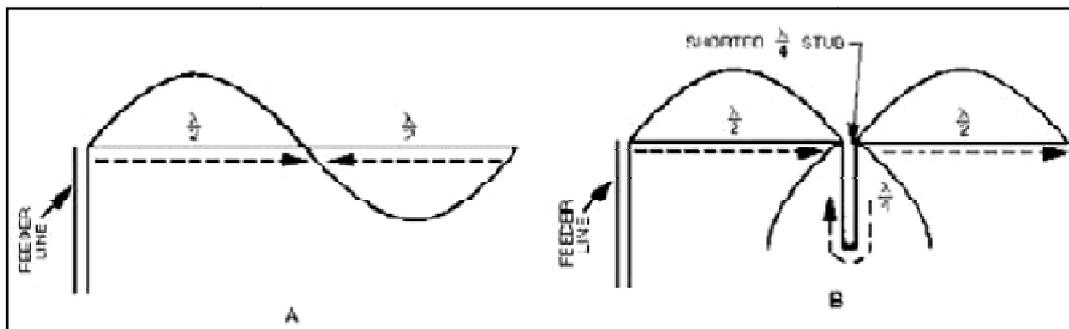


Fig.4.2 Posición en fase de elementos conectados.

\* Fuente: GUITAL C; MUÑOZ E. Arquitectura de un modelo de redes wireless aplicando antenas smart. Chile. 2002. <http://cvbertesis.uach.cl/tesis/uach/2006/bmfciq968a/>

Cuando los dos elementos son conectados por un cortocircuito de  $\frac{1}{4}$  longitud de onda, como se muestra en la figura 4.2 B, el recorrido de la corriente es de abajo de un lado de la antena y sube al otro. Recorre una distancia de  $\frac{1}{2} \lambda$  en sí mismo. Cuando la corriente alcanza el segundo elemento, está con la fase deseada. Debido a que la corriente es igual y opuesta a la corriente del lado contrario, los campos se cancelan y ninguna radiación es transmitida.

**4.4.4 Directividad:** La directividad de una antena o de un arreglo puede ser determinada observando su patrón de radiación. En un arreglo que propaga una cantidad dada de energía, la radiación es totalmente diferente según la dirección. Los elementos del arreglo pueden ser como un grupo de antenas alimentadas desde una fuente común, con diferentes direcciones. Por otro lado, los elementos podrían ser organizados con el propósito de que la radiación fuera enfocada en una sola dirección, sin aumentar la potencia en el transmisor, la cantidad de radiación en una dirección dada sería mayor, esto debido a que la energía de entrada no tiene ningún aumento, esta directividad creciente se alcanza a expensas de un aumento en otras direcciones.

**4.4.5 Directividad e Interferencia:** En muchos usos, la directividad aguda es deseable aunque no exista la necesidad de hacerlo. En la figura siguiente los transmisores 1 y 2 están enviando la información a los receptores 1 y 2 respectivamente a lo largo de las trayectorias demostradas por las flechas sólidas. La distancia entre el transmisor 1 y el receptor 1 o entre el transmisor 2 y el receptor 2 es corta y no requiere una transmisión de alta potencia. Las antenas de los transmisores propagan bien en todas las direcciones. Sin embargo, el receptor 1 toma algunas de las señales del transmisor 2, y el receptor 2 toma algunas de las señales del transmisor 1, como se muestra por las flechas segmentadas. Se acentúa este efecto si las antenas de recepción interceptan energía igualmente bien en todas las direcciones (omnidireccionales).

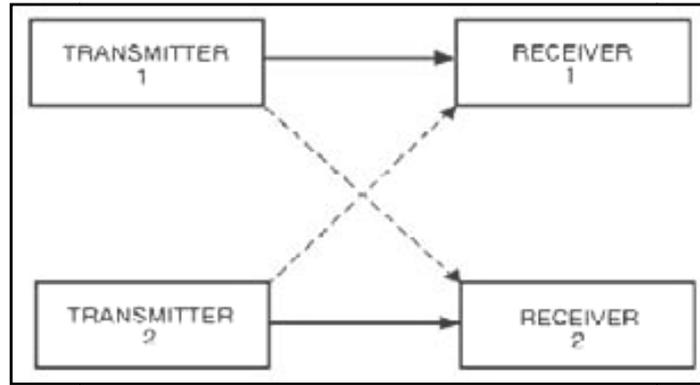


Fig.4.3 Directividad e interferencia.

\* Fuente: GUITAL C; MUÑOZ E. Arquitectura de un modelo de redes wireless aplicando antenas smart, Chile, 2002, <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2006/bmfcig968a/>

El uso de antenas direccionales es una solución para el problema antes mencionado. Las señales se emiten a lo largo de las trayectorias de las flechas sólidas y proporcionan una radiación muy baja a lo largo de las trayectorias de las flechas segmentadas, de esta forma, es posible seleccionar la señal deseada mientras que discrimina contra el resto de las señales. Este mismo acercamiento se puede utilizar para superar otros tipos de interferencia irradiada. En tales casos, la prevención de la radiación en ciertas direcciones es más importante que produciendo mayor aumento en otras direcciones.

A modo de ejemplo se analizará la siguiente figura.

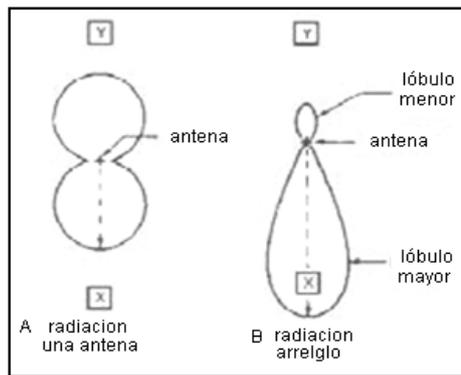


Fig.4.4 Antena única versus arreglo.

\* Fuente: GUITAL C; MUÑOZ E. Arquitectura de un modelo de redes wireless aplicando antenas smart, Chile, 2002, <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2006/bmfcig968a/>

La figura 4.4 A: representa el patrón relativo de campo-fuerza para una sola antena horizontalmente polarizada. La figura 4.4 B demuestra el patrón de radiación horizontal para un arreglo. Para el caso de la figura A se observa que ésta irradia bastante en la dirección deseada hacia la recepción del punto X. Irradia igualmente

hacia Y, aunque no se desea ninguna radiación en esta dirección. La antena en la figura B irradia fuertemente hacia X, pero muy poco en la dirección del punto Y, que da lugar a una operación más satisfactoria.

El patrón de la figura B: tiene radiación concentrada en dos lóbulos. La intensidad de la radiación en un lóbulo es considerablemente más fuerte que en el otro. El lóbulo hacia el punto X es el lóbulo principal, el otro, lóbulo es de menor importancia.

#### **4.5 Clasificación de los Arreglos.**

Los arreglos de antenas en general es posible clasificarlos de dos formas posibles, la primera es según la distribución geométrica que ocupen los elementos del arreglo, en segundo lugar, según el tipo de excitación que se les dé a cada uno de de los elementos.

En la siguiente figura se puede apreciar de mejor forma la clasificación y subclasificación de los tipos de arreglos descritos anteriormente.

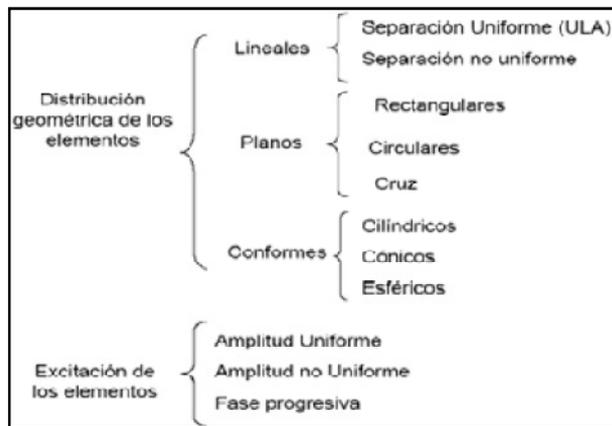


Fig.4.5 Clasificación de los Arreglos.

Con el propósito de entender el comportamiento de las antenas en agrupaciones se detallara el arreglo lineal, especialmente.

#### 4.5.1 Arreglos Lineales.

Se considera un arreglo de antenas lineal, como la más simple de la clasificación según la geometría de los elementos y tratando de simplificar los algoritmos para dar una mejor interpretación física a esta técnica, se mostrará como ejemplo una red de  $N$  elementos.

Un arreglo lineal uniforme es aquel en el que los elementos que lo conforman son alimentados con corriente de igual magnitud, con un desfase uniforme y progresivo a lo largo de la línea. Además los elementos están igualmente separados a lo largo de una línea recta.

En la figura siguiente se muestra un ejemplo de un arreglo lineal horizontal simple puesto en fase de  $N$  elementos de antena espaciados una distancia  $d$ , donde la longitud de onda es  $\lambda$  y la constante de propagación es  $k = 2\pi/\lambda$ . Se consideran las fases de la señal a lo largo del plano  $A-A'$ , en donde existe un ángulo  $\theta_0$  que es con respecto a un arreglo normal.

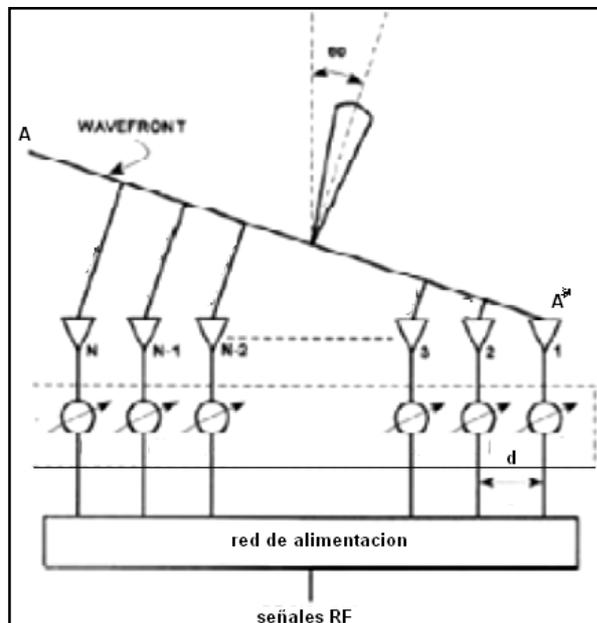


Fig.4.6 Antena única vs. Arreglo.

\* Fuente: GUITAL C; MUÑOZ E. Arquitectura de un modelo de redes wireless aplicando antenas smart, Chile, 2002, <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2006/bmfcig968a/>

La fase progresiva entre los elementos adyacentes es  $\beta$ , con la fase de la señal de la antena 2 está retrasado con respecto del elemento 1 con un ángulo de fase de  $kd \cos$

$\theta_0 + \beta$ . Similarmente, se puede ver que el elemento N-esimo se retrasará del elemento 1 por  $N(\Delta p + \beta)$  donde  $\Delta p = kd \cos \theta_0$ .

Si la diferencia de fase de elementos adyacentes es más de  $2m\pi$ , donde  $m$  es un número real entero, las ondas se agregan en fase para formar un haz resultante.

#### **4.5.1.1 Factor de Arreglo.**

Un arreglo de elementos (antena) idénticos con una magnitud idéntica y cada uno con una fase progresiva se conoce como un arreglo uniforme. Su factor de arreglo puede ser obtenido considerando los elementos como fuentes puntuales, dando:

$$AF = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)\psi}$$

$$\psi = kd \cos \theta + \beta$$

El valor del factor de arreglo está en función del número de elementos y de su arreglo geométrico, magnitudes relativas, fases relativas y espaciamiento. Cada arreglo tiene su propio factor de arreglo. Puesto que el factor de arreglo es independiente de las características direccionales de los elementos de la radiación, puede ser formulado sustituyendo los elementos actuales por fuentes isotrópicas puntuales. Una vez que haya sido derivado el factor de arreglo, el campo total del arreglo esta dado por:

$$E(\text{total}) = [E(\text{elemento solo como punto de referencia})] \times [\text{factor de arreglo}]$$

La radiación máxima se puede orientar en cualquier dirección para formar un arreglo de exploración. Asumiendo que la radiación máxima del arreglo está orientada a un ángulo  $\theta_0$  ( $0^\circ \leq \theta_0 \leq 180^\circ$ ), la excitación de fase,  $\beta$  se debe ajustar dando:

$$\psi = kd \cos \theta + \beta \Big|_{\theta=\theta_0} = kd \cos \theta + \beta = 0$$

$$\therefore \beta = -kd \cos \theta$$

El principio básico de la exploración electrónica es controlando la fase progresiva entre los elementos de la antena para enfocar la radiación máxima en cualquier dirección deseada.

El análisis hecho hasta serán de gran importancia para el desarrollo del siguiente capítulo, donde se representaran varios diagramas de radiación del campo eléctrico usando las formulas antes expuestas como las formulas que se obtienen a partir de estas.

#### **4.6 Arreglos Omnidireccionales y Direccionales.**

##### **4.6.1 Antena Omnidireccional en Comunicaciones Móviles.**

Desde los primeros días de las comunicaciones móviles, ha habido la simple antena dipolo, que irradia y recibe igualmente bien en todas las direcciones para encontrar a sus usuarios; siendo esto adecuado para los ambientes simples de RF donde no existe un conocimiento específico acerca del paradero de los usuarios de la red, la principal desventaja de éste elemento es que no es capaz de enfocar sus señales para un acercamiento del abonado, solo alcanzando a usuarios deseados con un porcentaje pequeño de la energía total enviada en el ambiente.

Dada esta limitación, las estrategias omnidireccionales procuran superar desafíos ambientales simplemente alzando el nivel de la energía de las señales difundidas. En una situación de usuarios numerosos e interferencias, esto crea una situación desfavorable en las señales desconocidas de usuarios provenientes de la misma célula u otra colindante, las que pueden considerarse como interferencias.

En aplicaciones de *uplink*, es decir desde el usuario a la estación base, las antenas omnidireccionales no ofrecen ningún aumento preferencial para las señales de usuarios móviles. En otras palabras, los usuarios tienen que competir sobre la energía de la señal. También, este único elemento no puede rechazar selectivamente las señales que interfieren con las de usuarios en servicio y no tiene ninguna capacidad multidireccional espacial de mitigación o de igualación. Estrategias omnidireccionales impactan directamente y adversamente sobre el espectro de frecuencia, limitando la reutilización de esta misma.

Estas limitaciones fuerzan a diseñadores de sistema y a planificadores de redes de trabajo de idear soluciones cada vez más sofisticadas y costosas. Estos últimos años, las limitaciones de la tecnología acerca del uso de este tipo de antena en cuanto a la calidad, la capacidad, y la cobertura de sistemas inalámbricos han incitado a una evolución en el diseño y rol fundamental en un sistema inalámbrico.

#### **4.6.2 Antena Direccional en Comunicaciones Móviles.**

Una sola antena se puede también construir para tener ciertas direcciones preferenciales fijas de transmisión y recepción. Como una alternativa al método particular de agregar nuevos sitios transmisores, muchas torres de antena convencionales dividen su área de cobertura o sectorizan en células. Un área  $360^\circ$  está dividida a menudo en tres subdivisiones  $120^\circ$ , cada una cubierta por al menos un método de transmisión. De igual forma para todas las células, las antenas del sector proporcionan un aumento creciente sobre un rango restringido de azimut con respecto a una antena omnidireccional. Esto es referido comúnmente como un aumento de la ganancia de la antena y no se debe confundir con el incremento de procesos asociados a los sistemas inteligentes de antena (*Smart Antennas*).

Mientras que las antenas sectorizadas o direccionales multiplican el uso de canales, no logran superar las desventajas principales de difusión con respecto a una antena omnidireccional estándar, como por ejemplo la interferencia co-canal.

#### **4.7 Arreglo de Antenas en Fase.**

Una antena de arreglo en fase es un grupo de antenas que, cuando se conectan, funcionan como una sola antena cuyo ancho de haz y dirección (o sea, patrón de radiación) puede cambiarse electrónicamente sin tener que mover físicamente ninguna de las antenas individuales. La ventaja principal de las antenas de arreglo de fase es que eliminan la necesidad de girar en forma mecánica los elementos de la antena.

En esencia, un arreglo de fase es una antena cuyo patrón de radiación puede ajustarse o cambiarse electrónicamente. La aplicación principal de arreglo de fase es en radares, donde los patrones de radiación deben ser capaces de cambiar rápidamente para seguir un objeto en movimiento. En este tipo de arreglo, las fases relativas de las señales respectivas que alimentan las antenas varían de una manera tal que el patrón de radiación eficaz del arreglo se refuerza en una dirección deseada y se suprime en direcciones no deseadas.

Las amplitudes relativas y los efectos de interferencia constructiva y destructiva entre las señales irradiadas por las antenas individuales, determinan el patrón de radiación eficaz del arreglo. La Puesta en Fase del arreglo se puede utilizar para señalar un patrón de radiación fijo, o para explorar rápidamente en azimut o la elevación. Cuando los arreglos en fase se utilizan en sonar, se llama el *beamforming*.

La desventaja de este sistema es lo costoso que resulta su implementación, debido a la necesidad de muchos desplazadores de fase de microonda y de sus señales de control. Además del costo del desplazador de fase, los arreglos en fase necesitan generalmente de un amplificador de bajo ruido en cada elemento y una energía de 1 amp. en cada elemento para transmitir. El mercado actual de arreglos de fase se está convirtiendo en televisión vía satélite para los vehículos.

Un arreglo en fase con los elementos espaciados igualmente es el más fácil de analizar y forma la base para la mayoría de los diseños del arreglo. En la figura siguiente se ilustra esquemáticamente un arreglo lineal, la alimentación de la red y el espacio entre ellas es  $d$ , es el más simple y sigue siendo ampliamente utilizado, controlando la fase y la amplitud de la excitación a cada elemento, según lo representado, se puede controlar la dirección y la forma del lóbulo irradiado por el arreglo. La excitación de la fase, controla el ángulo,  $\theta$ , en el arreglo en fase de la señal.

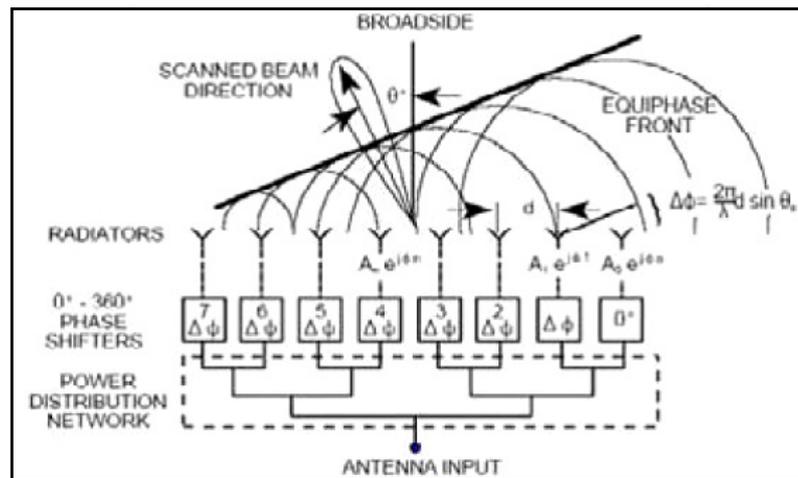


Fig.4.7 Representación de un Arreglo de fase lineal.

\* Fuente: GUITAL C; MUÑOZ E. Arquitectura de un modelo de redes wireless aplicando antenas smart, Chile, 2002, <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2006/bmfcig968a/>

#### 4.8 Arreglos de Antenas Adaptativas.

Los arreglos de antenas consideran que una señal deseada y una señal de interferencia llegan a partir de diferentes direcciones. Los lóbulos de radiación de un arreglo son configurados para adecuar requisitos de señales combinadas, viniendo de elementos diferentes. El vector de peso  $W_i$ , mostrado en la siguiente figura, es el responsable para el ajuste y actualización de las fases de los elementos del arreglo.

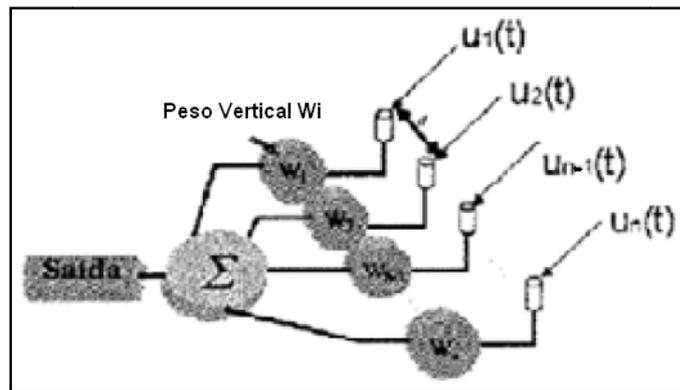


Fig.4.8 Concepto de un arreglo adaptativo.

\* Fuente: GUITAL C; MUÑOZ E. Arquitectura de un modelo de redes wireless aplicando antenas smart, Chile, 2002, <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2006/bmfcig968a/>

El Arreglo Adaptativo es un sistema en que los elementos de la antena pueden adaptar sus patrones de radiación a cualquier cambio en su ambiente. Para alcanzar esto, el sistema utiliza una variedad de nuevos algoritmos de procesamiento de la

señal para localizar con eficacia las señales de interés para de ésta forma reducir al mínimo, dinámicamente, la interferencia, y de maximizar la recepción prevista de la señal.

Aumentando la complejidad del procesamiento de señales del arreglo es posible alcanzar un desempeño más elevado que los sistemas de haz conmutado. como se mencionó en el capítulo 2 que con el ayuda de algoritmos de control, es posible estimar la dirección de llegada de la señal, DOA, y también optimizar los pesos de los elementos, suprimiendo así las interferencias y concentrando la radiación en una dirección hacia el usuario. MUSIC o ESPRIT son ejemplos de algoritmos para la determinación de DOA en arreglos, por otro lado, LMS y RLS son algoritmos eficientes para la estimación de los pesos de las señales de llegada en el arreglo. Con estos algoritmos el lóbulo puede ser estrechado, con eso mejorar el reuso de frecuencia en una célula, rechazar la interferencia y maximizar la relación señal a ruido (S/N).

Las figuras siguientes son un ejemplo de sistemas de arreglo adaptativos, que proporciona aumento óptimo del lóbulo de radiación hacia la señal de interés, mientras que simultáneamente identifica las señales que interfieren para reducirlas al mínimo.

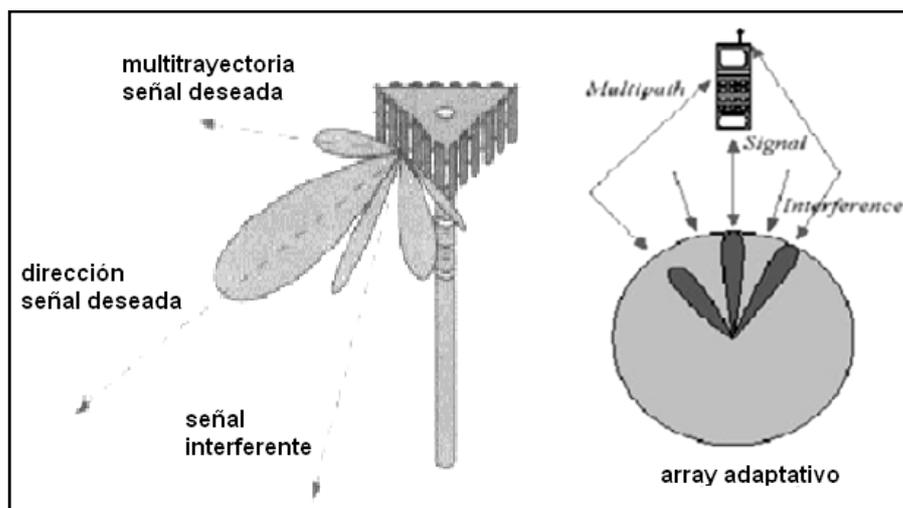


Fig.4.8.1 Concepto de un arreglo adaptativo.

\* Fuente: GUITAL C; MUÑOZ E. Arquitectura de un modelo de redes wireless aplicando antenas smart, Chile, 2002, <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2006/bmfcig968a/>

Al comparar las ventajas de un arreglo adaptante a la de un sistema conmutado, debe ser observado que la complejidad de los algoritmos y del hardware necesarios es mucho más grande para los sistemas adaptantes; además, para producir un sistema completamente adaptante de antena existe dicha complejidad y los algoritmos eficientes y el proceso de la señal numérica que deben ser usados en conjunto.

Para el siguiente capítulo se harán necesarios los diagramas de radiación de los arreglos estudiados para poder comparar con los diagramas de radiación de los sistemas inteligentes y los diagramas de las antenas elementales. Por este motivo la siguiente sección de este capítulo se refiere a *arrays* de fuentes puntuales isotrópicas, estas se analizará primero para luego generalizar el análisis para *array* de antenas largas por medio del principio de multiplicación de los patrones de radiación.

#### 4.9 Arrays de dos antenas isotrópicas.

Para entender el comportamiento de las antenas isotrópicas agrupadas, consideraremos la situación cuando el array está compuesto de dos de estas fuentes puntuales; seguidamente se presentan algunos casos que involucran 2 antenas isotrópicas, estos casos analizan el comportamiento del campo eléctrico en los arrays de fuentes isotrópicas.

##### Caso 1: Dos antenas isotrópicas con igual Amplitud y Fase.

Situadas las 2 antenas a una distancia  $d$ , localizadas simétricamente con respecto al origen de las coordenadas (figura 4.9. izq.).

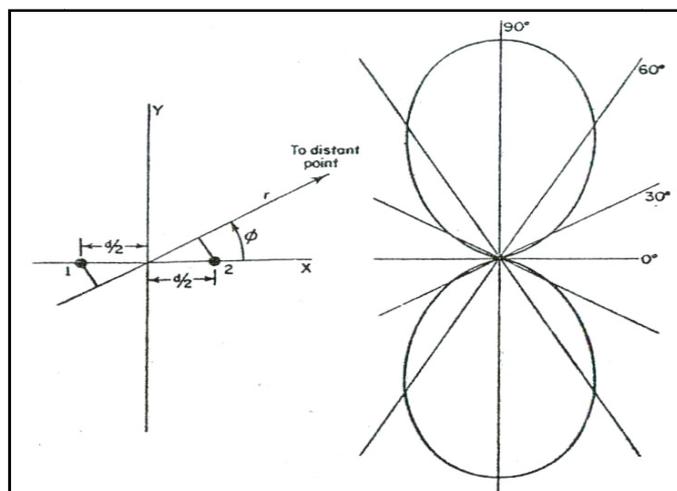


Fig. 4.9 Sistema de dos antenas isotrópicas.

\* Basado: CONSTANTINE A Balanis. Antenna Theory Analysis and Design, EEUU, WILEY Jhon & son, 1982.

El ángulo  $\Phi$  es considerado antihorario desde el eje x positivo. El origen de las coordenadas es tomado como referencia para la fase; en un punto distante en la dirección de  $\varphi$ , el campo de la fuente 1 es retardado por  $(\frac{1}{2})dr \cos \Phi$ , mientras que la fuente 2 es adelantada por  $(\frac{1}{2})dr \cos \Phi$ . Donde  $dr$  es la distancia entre las fuentes expresada en radianes.

$$dr = \frac{2\pi d}{\lambda}$$

El campo total (sección 1.4.2) a una distancia larga  $r$  en la dirección  $\Phi$  es:

**Ecuación 4.1:** 
$$E = E_0 e^{-i\frac{\psi}{2}} + E_0 e^{+i\frac{\psi}{2}}$$

$$\psi = dr \cos \Phi$$

$$E = 2E_0 \frac{e^{+i\frac{\psi}{2}} + e^{-i\frac{\psi}{2}}}{2}$$

$$E = 2E_0 \cos \frac{\psi}{2}$$

Por lo tanto el campo total representa la siguiente ecuación:

**Ecuación 4.2:** 
$$E = 2 E_0 \cos \left( \frac{dr}{2} \cos \Phi \right)$$

Para normalizar la ecuación 4.2, esto se trata de hacer que su máximo valor sea la unidad ( $2E_0 = 1$ ), suponiendo además que  $d = \frac{1}{2} \lambda$ , entonces  $dr = \pi$ . Introduciendo esto en la ecuación 4.2, tenemos:

**Ecuación 4.3:** 
$$E = \cos \left( \frac{\pi}{2} \cos \Phi \right)$$

El patrón de campo  $E$  vs.  $\Phi$ , expresado por la ecuación anterior es ilustrado en la figura 4.7 en la parte derecha. Este diagrama es una figura bidireccional en forma de un ocho con su máximo en el eje  $y$ .

El mismo patrón de radiación puede también ser obtenido localizando la fuente 1 en el origen de las coordenadas y la fuente 2 a una distancia  $d$  a lo largo del eje positivo  $x$ . entonces el campo de la fuente 1 es la referencia y el campo de la fuente 2 en la dirección  $\Phi$  esta adelantado por  $dr \cos \Phi$ . Así se obtiene el total del campo a una distancia larga  $r$  siendo un vector suma de los campos:

$$E = E_0 + E_0 e^{+i\frac{\psi}{2}} = E_0 (1 + e^{i\psi}) = 2 E_0 e^{i\psi} \left( \frac{e^{i\frac{\psi}{2}} + e^{-i\frac{\psi}{2}}}{2} \right)$$

**Ecuación 4.4:** 
$$E = 2 E_0 e^{i\psi} \cos \frac{\psi}{2} = \cos \frac{\psi}{2} \neq \frac{\psi}{2}$$

Donde el factor coseno da la variación del campo  $E$  normalizado y el exponencial o el factor ángulo da la variación de la fase con respecto a la fuente 1.

**Caso 2: Dos Antenas Isotrópicas con Igual Amplitud y Fase contraria.**

Este caso es muy similar al caso anterior la diferencia es que las dos fuentes están en fase opuesta. Para su análisis, la localización de las fuentes pueden ser de la misma forma que en la figura 4.7 izq. Entonces el campo total en la dirección de  $\Phi$  a lo largo de la distancia  $r$  es:

**Ecuación 4.5:** 
$$E = E_0 e^{+i\frac{\psi}{2}} - E_0 e^{-i\frac{\psi}{2}}$$

**Ecuación 4.6:** 
$$E = 2jE_0 \operatorname{sen} \frac{\psi}{2} = 2jE_0 \operatorname{sen} \left( \frac{dr}{2} \cos \Phi \right)$$

Esta ecuación a diferencia del la ecuación 4.2, involucra se factor seno y un operado  $j$  que indica la inversión de fase de una de las fuentes. En el caso 2 resulta desfasado  $90^\circ$  el campo total comparado con las fuentes del caso 1.

Normalizando y con  $d = \frac{1}{2} \lambda$  se tiene el campo total:

**Ecuación 4.7:** 
$$E = \operatorname{sen} \left( \frac{\pi}{2} \cos \Phi \right)$$

El diagrama de campo dado por 4.7 es mostrado en la figura 4.10:

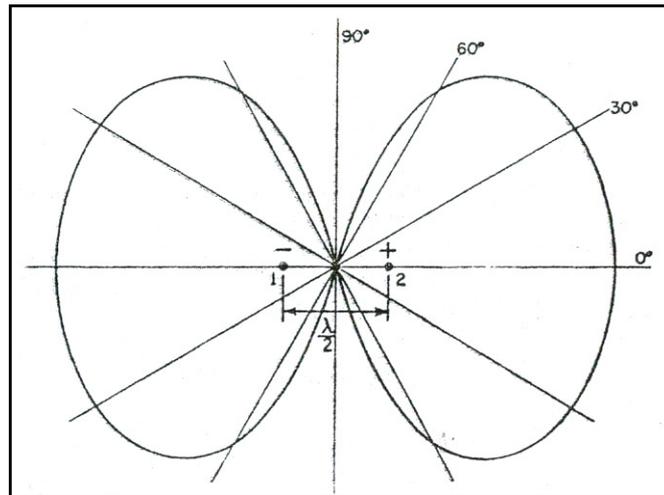


Fig. 4.10 Radiación de 2 antenas isotrópicas defasadas.

\* Basado: CONSTANTINE A Balanis. Antenna Theory Analysis and Design. JOHN WILEY & SON 1982.

El diagrama anterior es relativamente un 8 grande con el máximo campo en la misma dirección de la línea de las antenas (eje x).

Estas dos fuentes, en este caso es conocido un arreglo *end-fire* y las dos fuentes del caso 1 forman un arreglo llamado arreglo *broadside*.

### Caso 3: Dos antenas isotrópicas con igual Amplitud y Fase en cuadratura.

Las dos fuentes pueden ser colocadas como en la figura 4.9 izq. Tomando el origen de las coordenadas como la referencia de fase. La fuente 1 esta retardado 45° y la fuente 2 adelantado 45°. Entonces en el campo total en la dirección  $\Phi$  a lo largo de la distancia  $r$ , esta dado en la siguiente ecuación:

**Ecuación 4.7:** 
$$E = E_0 e^{-i\frac{\psi}{2} + \frac{\pi}{4}} + E_0 e^{-i\frac{\psi}{2} + \frac{\pi}{4}}$$

**Ecuación 4.8:** 
$$E = 2 E_0 \cos\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} \cos \Phi\right)$$

Normalizando la ecuación 4.8 y con  $d = \frac{1}{2} \lambda$ ; el patrón de radiación del campo así encontrado es representado en la figura 4.11.

**Ecuación 4.9:** 
$$E = \cos\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{2} \cos \Phi\right)$$

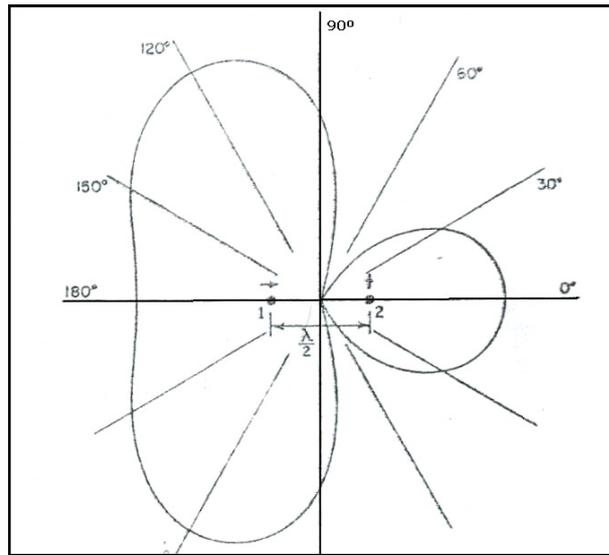


Fig. 4.11 Radiación de 2 antenas isotrópicas defasadas 45°.  
 \* Basado: CONSTANTINE A Balanis. Antenna Theory Analysis and Design, EEUU, WILEY Jhon & son, 1982.

La figura 4.9 muestra que la mayor concentración de radiación esta en los cuadrantes II y III. Para la distancia entre antenas de  $d = \frac{1}{2} \lambda$ , si esta distancia se la modifica a  $d = \frac{1}{4} \lambda$ , con cálculos similares se obtendrá el campo de la ecuación 4.10 y su radiación se muestra en la figura 4.12.

**Ecuación 4.10:** 
$$E = \cos \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{4} \cos \Phi \right)$$

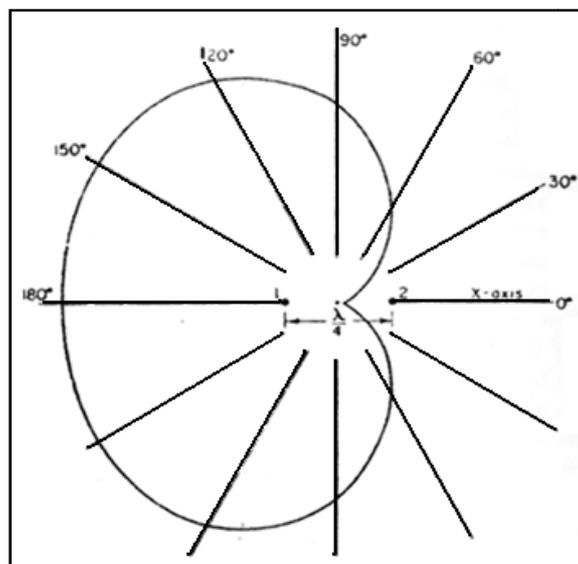


Fig. 4.12 Radiación de 2 antenas isotrópicas defasadas 45°, - .  
 \* Basado: CONSTANTINE A Balanis. Antenna Theory Analysis and Design, EEUU, WILEY Jhon & son, 1982.

La manera de generalizar estos casos es suponiendo que las fuentes mantienen su igualdad en amplitud pero con la fase diferente  $\delta$ . La diferencia de fase total  $\psi$  entre los campos de las fuentes 1 y 2 a una distancia  $r$  en la dirección  $\Phi$  es:

**Ecuación 4.11:** 
$$\psi = dr \cos\Phi + \delta$$

Tomando como referencia de fase la antena 1, el signo positivo de la ecuación 4.11 indica que la fuente 2 esta adelantada en fase por un ángulo  $\delta$ , un signo menos podría ser usado para indicar un retarde de fase. Si, en vez de tomar el punto 1 como referencia se toma el centro del *array*, la fase del campo de la fuente 1 a una distancia  $r$  es dado por  $-\frac{\psi}{2}$ , mientras que de la fuente 2 es  $+\frac{\psi}{2}$ .

Entonces el campo total con las condiciones anteriores, seria:

**Ecuación 4.12:** 
$$E = E_0 (e^{i\frac{\psi}{2}} + e^{-i\frac{\psi}{2}}) = 2 E_0 \cos \frac{\psi}{2}$$

Entonces un campo normalizado de dos fuentes isotrópicas de igual magnitud con fase arbitraria, resulta:

**Ecuación 4.13:** 
$$E = \cos \frac{\psi}{2}$$

Donde  $\psi$  está dado por la ecuación 4.11. Como se dijo este es un caso que abarca los casos anteriores reemplazando a  $\delta$  por  $0^\circ$ ,  $180^\circ$  y  $90^\circ$  respectivamente.

#### 4.10 Multiplicación de Patrones de Radiación.

Los arreglos de antenas pueden ser muchos por lo que analizar todos los posibles casos se vuelve una tarea imposible, es mucho más eficiente presentar una herramienta que se puede utilizar para obtener los diagramas de radiación de dichos arreglos, por medio de los diagramas básicos y de otros arreglos más sencillos. Este método se llama multiplicación de configuraciones, y consiste simplemente en una multiplicación gráfica de los diagramas por separado.

Existen dos situaciones que se puede tener: realizar un arreglo con antenas isotrópicas, o también se puede realizar un arreglo con antenas reales [2].

#### 4.10.1 Con Antenas Isotrópicas.

La multiplicación de configuraciones con antenas isotrópicas reside en ir obteniendo diagramas de arreglos con menor número de elementos o diagramas más sencillos hasta obtener las configuraciones con todos los elementos del arreglo y finalmente proceder a la multiplicación plano por plano. Para entender de una mejor manera, se analizará un ejemplo sencillo. Como ejemplo se utilizará un arreglo de 8 fuentes isotrópicas en condición *broadside*, este ejemplo ya se realizó anteriormente en el caso 1, el objetivo ahora es demostrar que con la multiplicación de configuraciones se llega al mismo diagrama de configuración antes encontrado.

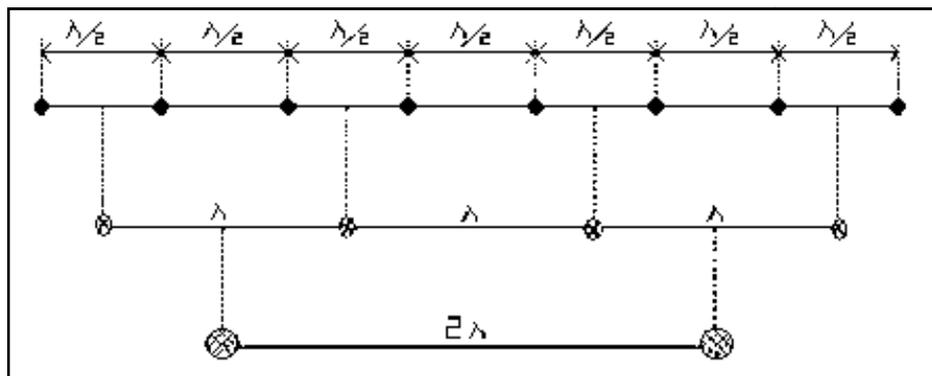


Fig. 4.13 Arreglo de 8 elementos isotrópicos en condición *broadside*.

\* Fuente: CARDAMA, Ángel. Antenas, España, UPS, 1998.

De las ocho antenas isotrópicas que se tiene, se formará un arreglo virtual de cuatro, y de este a su vez se formará un arreglo de 2 antenas.

Como primer paso se considera al arreglo de 2 elementos separados  $d=\lambda/2$  que tiene un patrón de radiación como la figura 4.9, luego se tiene dos elementos separados  $d=\lambda$ , cuyo campo E definido por la ecuación siguiente y su diagrama es la figura 4.15.

#### Ecuación 4.14:

[2] Jordan Edgar C, Fundamentos de antenas.

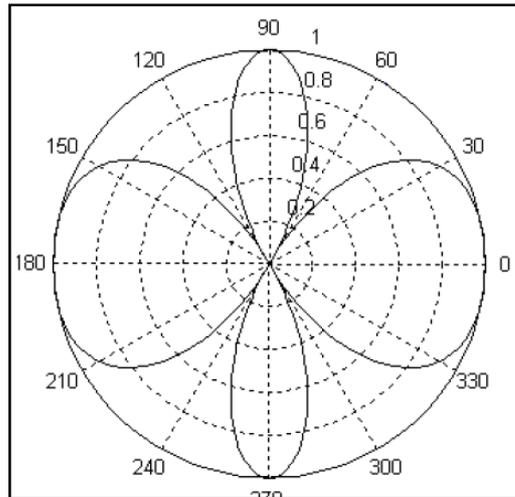


Fig. 4.15 Radiación de 2 antenas isotrópicas,  $d = \lambda$ .

Por último se tiene un arreglo de dos antenas separadas una distancia igual a  $2\lambda$  cuyo campo radiado con su diagrama de radiación son los siguientes.

**Ecuación 4.15:**

$$E = \cos(2\pi \cos\Phi)$$

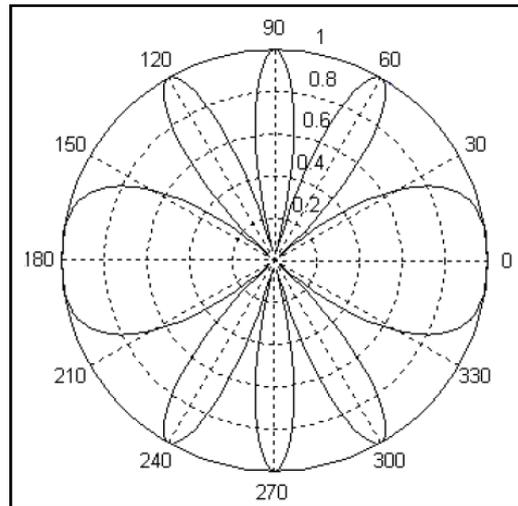


Fig. 4.16 Radiación de 2 antenas isotrópicas,  $d = 2\lambda$ .

Finalmente, al multiplicar gráficamente los tres diagramas de radiación antes obtenidos se tiene la respuesta (ecuación 4.16) que es el diagrama del arreglo *broadside* (Fig. 4.9 derecha.).

**Ecuación 4.16:**

$$E = \cos\left(\frac{\pi}{2} \cos\Phi\right) * \cos(\pi \cos\Phi) * \cos(2\pi \cos\Phi)$$

### 4.10.2 Con Antenas Dipolo Reales

De forma similar se puede multiplicar las configuraciones usando antenas dipolo real, este proceso obviamente se vuelve más complicado para arreglos grandes, a continuación se da una explicación más detallada para obtener la configuración total del arreglo.

Primero, se dispone de un arreglo de dos dipolos centrados con respecto al eje z y alineados con el eje y, como se muestra en la figura:

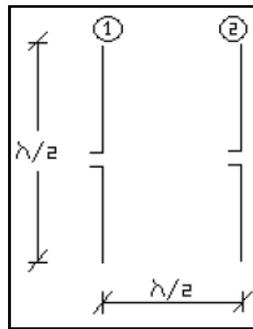


Fig. 4.16.1: 2 antenas dipolo

La posición de un dipolo debe ser centrado en un sistema de coordenadas rectangulares con la misma orientación del arreglo. Entonces se dibuja la configuración del dipolo en los tres planos. Para obtener la configuración en todos los planos se procede hacer girar el diagrama primero en el eje de la antena, en este caso es sobre el eje z, haciendo esto se obtiene que el plano x-z presente una forma de 8, mientras que en el plano z-y presente una radiación omnidireccional.

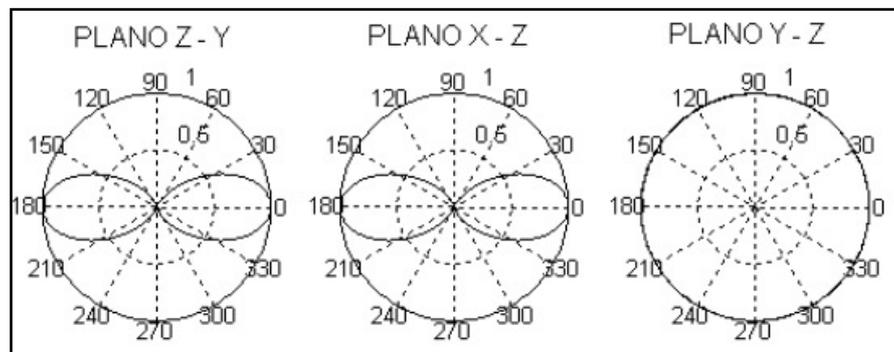


Fig. 4.17 Diagrama de 2 antenas isotrópicas sobre el eje z.

Luego a todas las antenas isotrópicas se las ubica en un sistema de coordenadas rectangulares.

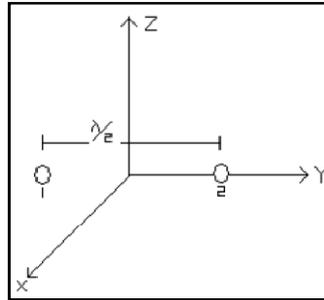


Fig. 4.17.1: ubicación de 2 antenas dipolo

El diagrama de este arreglo isotrópico en todos los planos se consigue haciendo girar la radiación en el eje del arreglo, en este se caso se tiene que para el plano x – z un círculo, y para el plano x – y una figura de ocho sería como la siguiente figura:

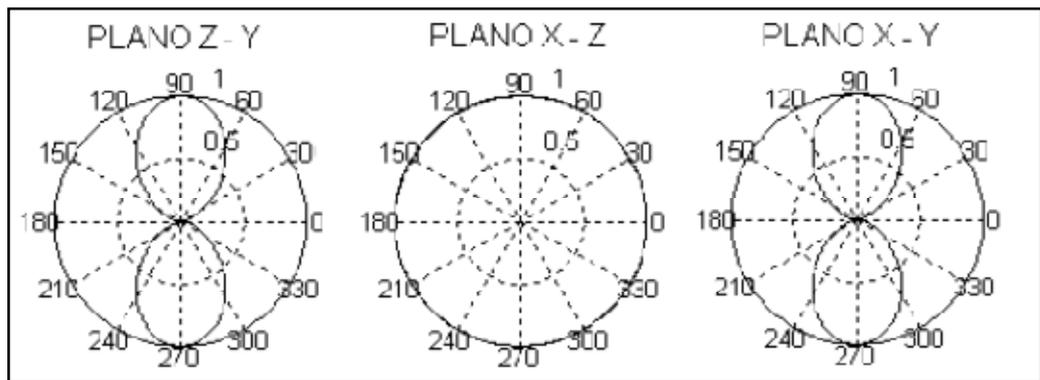


Fig. 4.18 Diagrama de 2 antenas isotrópicas sobre el eje x-z.

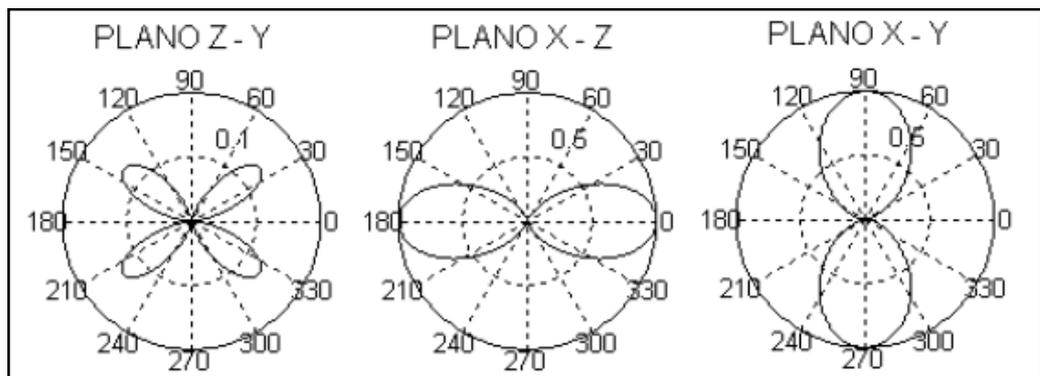


Fig. 4.19 Multiplicación de Diagramas.

Finalmente se procede a multiplicar las configuraciones plano a plano (diagramas con los dipolos – diagramas con fuentes isotrópicas), luego de realizar esto se puede

determinar cuales representan a los planos principales, estos planos serán los que alcanzan mayor radiación.

El plano  $z - y$  se descarta en este caso debido a que la radiación no llega a ser máxima, los otros dos planos serían los planos principales, debido a que el dipolo se encuentra ubicado físicamente paralelo al eje  $z$ , el plano H sería el plano  $x-y$ , y por consiguiente el plano  $x-z$  corresponde al plano E.

La multiplicación de patrones de radiación como se explico es una técnica sin mucha complejidad, si se tiene el campo eléctrico normalizado; los conceptos expuestos en este capítulo utiliza el software antenas, que es el encargado de ilustrar diagramas de radiación, tanto de las antenas individuales como cuando forman agrupaciones inteligentes.

## CAPITULO 5

### CUADRO COMPARATIVO ENTRE ANTENAS CONVENCIONALES Y ANTENAS INTELIGENTES CON SUS JUSTIFICACIONES.

#### 5.1 Introducción

En principio, para presentar comparaciones entre las antenas convencionales e inteligentes, se debe reconocer que las antenas inteligentes no son más que sistemas o agrupaciones de antenas elementales; como se explico en capítulos anteriores, estas antenas elementales son una base de información muy importante para el estudio de muchos otros tipos de antenas. Entre éstas, el radiador isotrópico es el 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 mismas antenas elementales, sino también para el resto de antenas existentes.

#### 5.2 Planteamiento de la comparación.

La herramienta de ayuda para encontrar las diferencias entre los elementos radiantes es el software-antenas\*. Teniendo en cuenta la particularidad mencionada en la sección anterior; la comparación se lo hará proponiendo ciertos valores como: la frecuencia de operación, el número de antenas, etc. Y estos se tratarán de mantener a la hora de obtener los diagramas de los diferentes tipos de antenas ofrecidos en el software. El software antenas muestra patrones de radicación para los siguientes tipos de antenas:

- Opción 1: Antenas Dipolo
- Opción 2: Arreglos Isotrópicos
- Opción 3: Arreglos LES (*Linear Equally Spaced*) isotrópicos
- Opción 4: Arreglos LES reales
- Opción 5: Antenas inteligentes.

Dentro de la opción 4 existen cuatro subopciones:

\* –Software que obtiene patrones de radicación a partir de ciertos valores introducidos. su funcionamiento detalla el capítulo 6

- Antenas centradas en el eje Z – alineadas en el eje Y
- Antenas centradas en el eje Z – alineadas en el eje Z
- Antenas centradas en el eje Y – alineadas en el eje Y
- Antenas centradas en el eje Y – alineadas en el eje Z

De igual manera la opción 5 tiene 3 subopciones:

- sistemas de haz conmutado
- sistemas de haz fijo
- sistema inteligente (adaptativo)

Los diagramas de las subopciones de la opción 4 serán analizadas en conjunto con los demás diagramas, en cambio, con respecto a la opción 5 solo el diagrama del sistema de haz fijo será comparado, ya que, el sistema de haz conmutado es variante en tiempo real y al igual que el sistema adaptativo requiere datos del DOA y la dirección de las señales interferentes, por lo tanto se considera que no pueden ser comparados con sistemas que no usan estos datos.

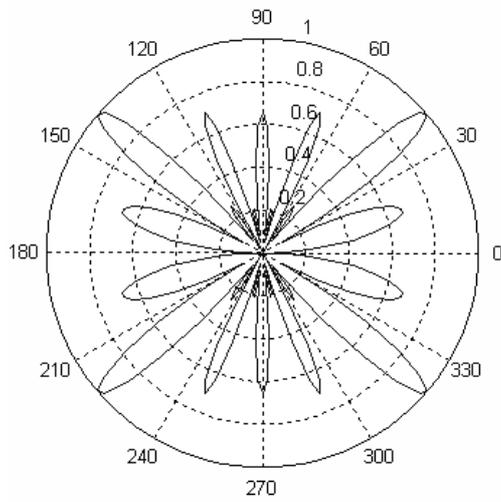
Los datos que son comunes y con los que se encontraran los patrones de radiación son:

- Frecuencia de operación (Fr-op) = 800 MHz
- Altura de la antena (H) = 1 m.
- Número de antenas (#) = 8 (dato no valido para la opción 1 y 2)
- Distancia entre las antenas (d) = 0.5 m. (dato no valido en la opción 1)
- La variable de comparación será el campo eléctrico, con la misma intención de tener datos semejantes para todas las opciones del software, se obtendrá el cálculo del campo a los 30°.

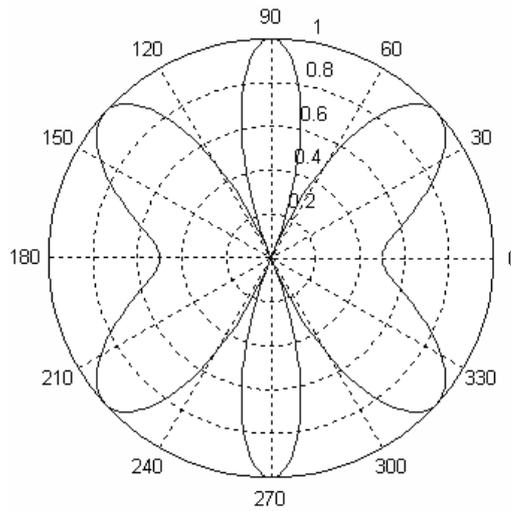
### **5.3 Diagramas de Radiación en Análisis.**

Entonces con estas características se obtendrán los diagramas de cada uno de los tipos de sistemas propuestas en el software antenas.

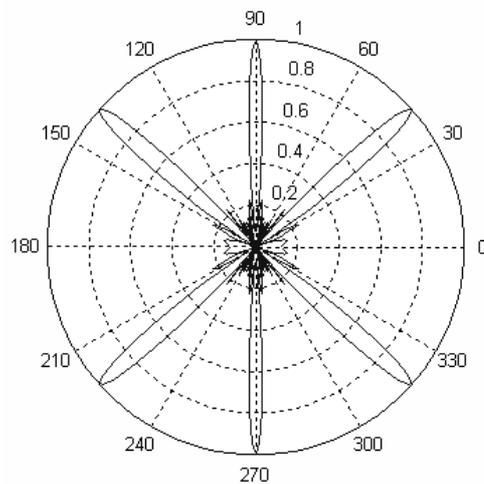
### Patrón de Radiación – Antena Dipolo



### 2. Patrón de Radiación - Arreglo Isotrópico formado por 2 elementos.

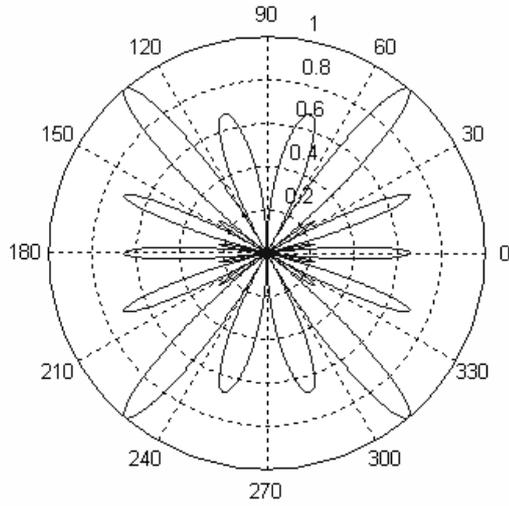


### 3. Patrón de Radiación - Arreglos LES Isotrópico

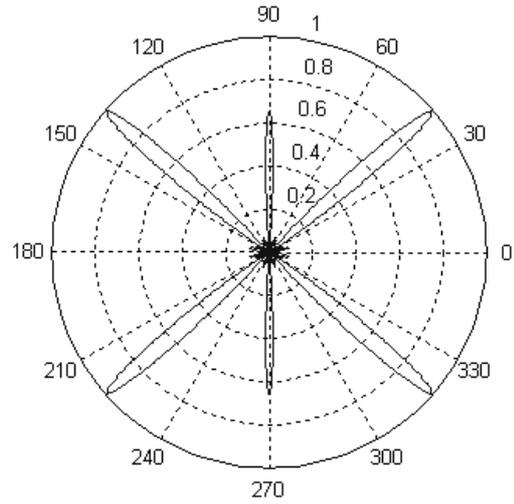


**4. Patrón de Radiación - Arreglos LES Isotrópico**

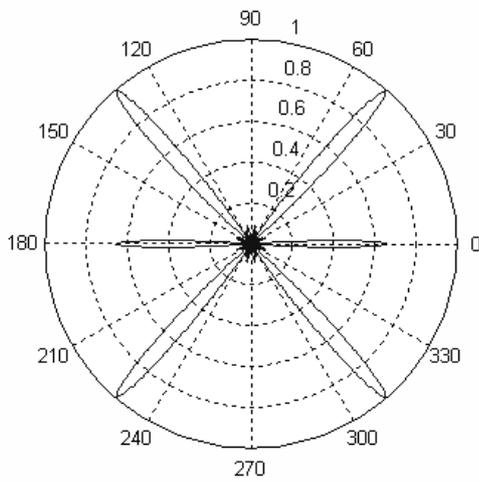
Antenas centradas en el eje Z –  
alineadas en el eje Y



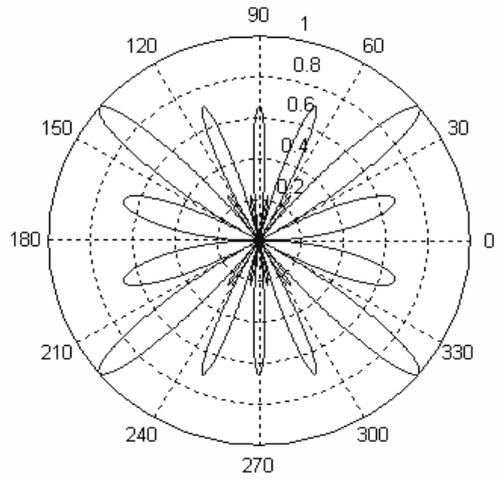
Antenas centradas en el eje Y –  
alineadas en el eje Y



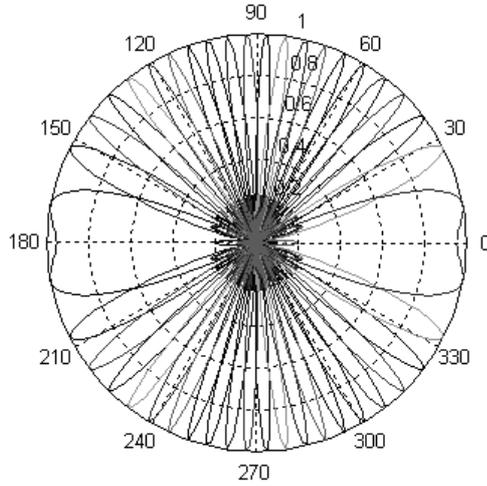
Antenas centradas en el eje Z –  
alineadas en el eje Z



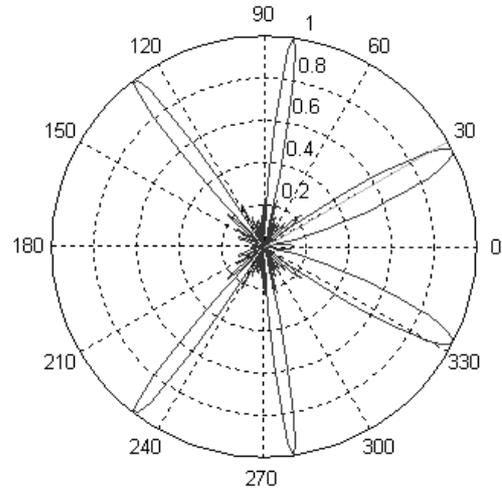
Antenas centradas en el eje Y –  
alineadas en el eje Z



**5. Patrón de Radiación – Sistema Haz fijo. Conmutado.**



**6. Patrón de Radiación - Sistema Haz**



Según los diagramas anteriores y usando los cálculos del campo eléctrico en el Simulador Antenas con los datos antes propuestos obtenemos los valores del campo en cada sistema (tabla 5.1):

Tipos de Antenas		fr - op (MHz)	H (m)	# de antenas	d (m)	ángulo E (°)	E	
Antenas Convencionales	Antena Dipolo	800	1	1	-	30	0.118	
	Arreglos Isotrópicos	800	1	2	0.5	30	0.884	
	Arreglos LES Isotrópicos	800	1	8	0.5	30	0.181	
	Arreglos LES Reales	centrada en eje z - alineadas en el eje y	800	1	8	0.5	30	0.42
		centrada en eje z - alineadas en el eje z	800	1	8	0.5	30	0.525
		centrada en eje y - alineadas en el eje y	800	1	8	0.5	30	0.002
		centrada en eje y - alineadas en el eje z	800	1	8	0.5	30	0.011
	<b>Smart</b>	Sistema haz fijo	800	1	8	0.5	30	1
Sistema haz conmutado		800	1	8	0.5	30	0.89	
<b>Antenna</b>	Sistema haz adaptativo	800	1	8	0.5	30	0.88	

Tabla 5.1: Cuadro Comparativo entre antenas Basado en valores del Campo Eléctrico obtenidos en el software antenas.

El valor del campo E esta normalizado es decir no tiene unidades considerando la unidad como valor máximo. Dicho esto se puede considerar los valores del campo presentados en la tabla 5.1; los valores de E para las 4 opciones primeras (incluidas las subopciones de la op. 4) son valores bajos, indicando que la radiación en la dirección de 30° es prácticamente nula, hay que tomar en cuenta el valor del campo del arreglo isotrópico de 2 elementos es de 0.884 es un valor que demuestra la existencia de radiación aceptable pero al revisar la figura 2 que representa su patrón de radiación, este posee lóbulos muy amplios que es una característica poco admitido en comunicaciones móviles y especialmente en este proyecto que trata de sistemas inteligentes con lóbulos muy directivos.

Otra característica que se busca según la tecnología de antenas inteligentes es llegar a más usuarios con la mejor calidad esto significa que los diagramas de radiación deben poseer varios lóbulos muy directivos y con su máxima radiación.

Para la comparación de esta característica usaremos en el software antenas la opción de contar los lóbulos principales de los diagramas anteriores.

	<b># Lóbulos principales</b>
Antena Dipolo	4
Arreglos Isotrópicos	6
Arreglos LES Isotrópicos	5
Arreglos LES Reales	4
	6
	6
	4
Sistema haz fijo	38
Sistema haz conmutado	6

Tabla 5.2: Comparación del # de lóbulos principales.

Indudablemente el sistema de haz fijo ofrece una radiación con el mayor número de lóbulos máximos de radiación, esto es aceptable, ya que este sistema es diseñado justamente con ese objetivo, como se explico en el capítulo 2.

Como un ejemplo del Patrón de Radiación del Sistema Adaptativo supondremos los siguientes datos necesarios para obtener el diagrama ofrecido por el software antenas.

- Frecuencia de operación (Fr-op) = 800 MHz
- Número de antenas (#) = 8
- Distancia entre las antenas (d) = 0.5 m.
- Dirección del usuario, DOA de llegada (°) = 30°
- Dirección de señales interferentes (°) = 10°, 90°, 245°.

El sistema ofrece para la señal del usuario (30°) un lóbulo de mayor radiación, tratando de ubicar las señales interferentes en nulos de radiación como lo representa la siguiente figura.

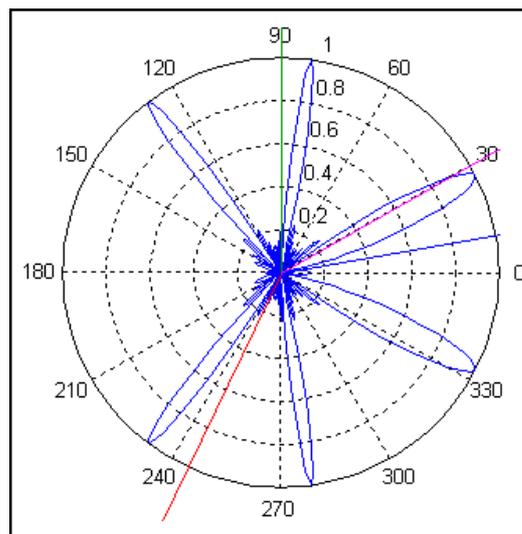


Fig 5.1 Diagrama de radiación del sistema adaptativo.

Sin duda la característica principal de este sistema es la variación de la fase de alimentación de forma inteligentes según las condiciones que ofrecen las redes de comunicaciones actuales en los cuales existe una demanda de servicios en crecimiento y por lo tanto existen varias fuentes interferentes, el sistema adaptativo lidia con estas desventajas de la red de comunicaciones.

En este capítulo ya se ha hecho uso del software demostrativo, ya que, es una herramienta útil para obtener información de los sistemas radiantes. Sin embargo, para un mejor aprovechamiento de esta herramienta, el capítulo siguiente posee detalles sobre su uso y la manera como obtener los patrones de radiación y realizar los cálculos que ofrece el software.

## CAPÍTULO 6

### SOFTWARE DEMOSTRATIVO DE LAS VENTAJAS DE ANTENAS INTELIGENTES.

#### 6.1 Introducción

El campo de antenas es muy extenso y al realizar un sistema para el análisis y simulación es necesario delimitar las opciones y alcance del mismo, posteriormente se detalla todas las características del sistema y cálculos que puede realizar.

Un objetivo de este proyecto es el de demostrar las características de radiación de los sistemas inteligentes mediante un simulador o *software*, entonces se presenta el *software* antenas que es una herramienta practica ya que, este simulador se enfoca en la obtención de diagramas de radiación de antenas básicas y el cálculo de las variables más importantes, con miras a la introducción a la nueva tecnología de antenas inteligentes.

La forma de obtener los resultados y de presentar las respuestas se realiza de una forma amigable y entendible por el usuario, la utilización de ventanas y ayuda en el momento que se requiera es una característica importante para el usuario.

El conocimiento teórico es importante ya que sin este no se podría tener una comprensión adecuada de los resultados, ni tampoco se utilizaría con plenitud las características que presenta el sistema. Este proyecto ofrece una gran parte de este conocimiento requerido en capítulos anteriores especialmente en los capítulos 1,2 y 4.

El presente capítulo muestra los gráficos de las ventanas de introducción de datos y obtención de resultados, con esto se facilitará el uso del programa.

## **6.2 Simulador de Diagramas de radiación “Antenas”**

Uno de los objetivos principales de este proyecto es la presentación de una herramienta didáctica para estudiantes, por lo que, se ha escogido el simulador llamado Antenas ya que, en este software los estudiantes tendrán derecho a mejorarlo y actualizarlo pues será entregado como parte de este proyecto, con todo y sus códigos fuentes. La fácil accesibilidad al código fuente puede resultar en una ventaja o desventaja ya que el usuario accidentalmente puede alterar el programa lo que involucraría un funcionamiento erróneo del sistema. Por otra parte es positivo el tener la posibilidad de acceder al código fuente para realizar modificaciones que aporten en el mejoramiento o corrección del sistema. Por este motivo es primordial que su modificación sea realizada con usuarios que dominen la programación matlab. (Este programa nos da muchas ventajas ya que es un programa de cálculo matemático que permite trabajar mucho más fácil y con una gama más amplia de posibilidades, razón adicional por la que se ha decidido utilizar esta herramienta.)

Esta herramienta de simulación tiene un uso actual y futuro, pudiendo ser complementada posteriormente o se pueden añadir más tipos de antenas, arreglos o tecnología de antenas inteligentes mejor desarrolladas.

El simulador Antenas hace énfasis en las antenas básicas; en la obtención de sus diagramas de radiación y cálculo de las variables más importantes, y la introducción a la nueva tecnología de antenas inteligentes.

Todos los cálculos y resultados que se pueden obtener mediante la utilización del sistema simulador, son considerados más importantes y útiles en el diseño real de antenas, la predicción del diagrama de radiación es una parte fundamental en el diseño, tales diagramas son aprovechados como base para obtener los diferentes valores útiles para el aprendizaje de antenas.

El gráfico de radiación que se obtiene en el simulador Antenas, permite el cálculo de valores de campo y dirección de acuerdo al requerimiento del usuario, características de zoom son importantes ya que se puede obtener un diagrama ampliado y trabajar

con este independientemente y el simulador cuenta con esta característica en cada bloque de análisis.

En todo sistema de radiación es indispensable conocer la dirección en la que se produce la máxima radiación y de igual manera el o los ángulos para los cuales el campo es mínimo o nulo. Todos los gráficos que se obtengan contarán con esta opción.

Cálculos adicionales también se presentan como alternativa si es necesario conocer el campo en una dirección determinada o la dirección en la que se tiene un valor de campo. Variables electromagnéticas básicas se puede obtener también en cada ventana de análisis, completando de esta manera las características más importantes del sistema presentado.

Una opción adicional es la posibilidad de escoger el color y tipo de línea con la cual se graficará el diagrama de radiación, la personalización del resultado obtenido puede ser útil cuando se requiera de comparación entre antenas.

El botón de ayuda se despliega en cada ventana y permite acceder a una lista de todos los temas disponibles con un resumen teórico que puede ser útil el momento de realizar una simulación específica.

A sabiendas de que en la actualidad existen diversos tipos de antenas, arreglos y nuevas tecnologías es decir una gama bien amplia; el simulador antenas de importancia únicamente aquellas que se consideran base para el entendimiento de tecnologías más desarrolladas. A continuación se presenta las diferentes opciones de este simulador.

### 6.3 Pantalla Principal

Esta pantalla tiene seis opciones que permiten acceder a todas las posibilidades de simulación que se presenta en este proyecto, a continuación se realizará un modelo con cada una de éstas.

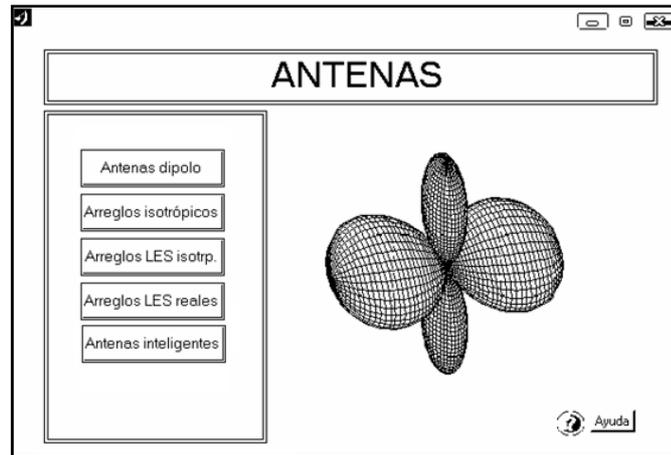


Fig. 6.1: Pantalla principal del simulador

### 6.4 Opcion 1: Antenas Dipolo

Como primera opción de análisis, antenas despliega a la antena dipolo, el diagrama de radiación de esta antena depende principalmente de la frecuencia de operación y la longitud del dipolo.

La utilización de la antena dipolo es muy común en la actualidad para sistemas sencillos, ya que, se considera como una antena elemental básica además es primordial para el entendimiento de radiación de otras antenas.

Esta opción presenta dos formas de obtener el patrón de radiación de la antena dipolo. Pudiendo acceder al diagrama de acuerdo a las características conocidas por el usuario.

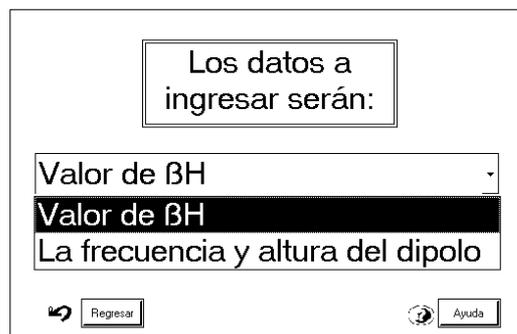


Fig 6.2: Pantalla de opciones – antena dipolo

Esta ventana permite decidir los datos que se ingresarán para el cálculo y presentación del diagrama de radiación para antenas del tipo dipolo. Se tiene dos opciones de ingreso: el valor de  $\beta H$  o el valor de la frecuencia y longitud del dipolo. La primera opción hace referencia a la constante de fase  $\beta$  y longitud del dipolo, es conveniente señalar en este punto que  $\beta$  tiene una proporcionalidad una proporcionalidad inversa con la longitud de onda  $\lambda$  y la longitud del dipolo  $H$  tiene valores proporcionales a la longitud de onda  $\lambda$ . (El capítulo 5 muestra diagramas de antenas con diferentes longitudes)

$$\beta = 2 * \pi * f / c$$

#### **a) Valor de $\beta H$**

Este tipo de ingreso presenta una ventana, en la misma se hace necesario el ingreso del valor  $\beta H$  para obtener el diagrama de radiación. Es posible cambiar el valor ingresado cuando el usuario así lo requiera, lo que permite comparar diversos diagramas de acuerdo al valor ingresado.

Para mejor visualización se dispone de una opción de zoom que muestra en una nueva ventana únicamente el gráfico del diagrama de radiación, la cual puede ser utilizada según los deseos del usuario.

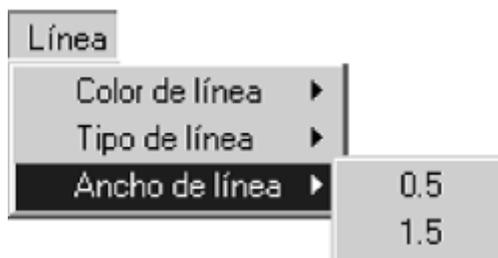
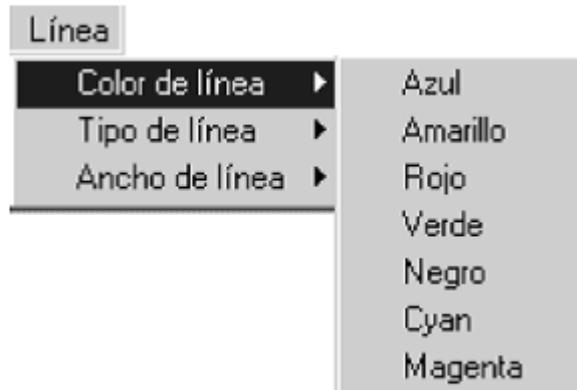
La variable  $\beta H$  que será introducida por el usuario debe ser un valor numérico y positivo. Si se introduce un valor no válido se presenta un mensaje de error y la opción de cambiar el valor introducido.

Existen algunos menús en la ventana principal de estos al iniciar el programa únicamente se tiene activos los siguientes: Línea, Ir a: así como también los botones de acceso: ayuda, pulsar para graficar. Los menús: Máximos, Ceros y Calcular se habilitan cuando se ha introducido un valor válido para el valor de  $\beta H$  y luego de pulsar el botón de acceso pulsar para graficar, en este instante también se habilita el botón de acceso cambiar.

En la ventana principal se presenta los siguientes menús:

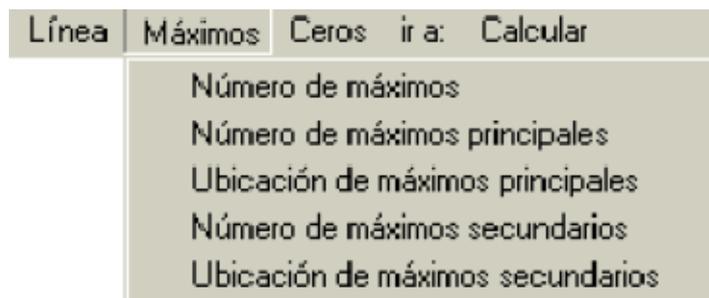


El menú **Línea** permite variar algunos aspectos en la presentación del gráfico, al hacer clic sobre este menú se disponen algunas opciones las cuales tienen a su vez submenús como se puede observar a continuación:



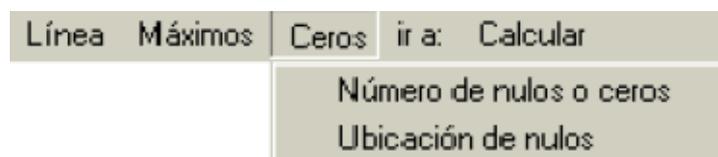
Cada una de estas subopciones, se obtiene una presentación final más aceptable para el usuario y personalizar de esta manera los gráficos obtenidos.

El menú **Máximos** es una alternativa muy interesante para obtener el número y la ubicación de todos los máximos que el gráfico obtenido presenta. Dentro de este menú, existen submenús alternativos como se muestra a continuación:



La ubicación de los máximos tanto principales como secundarios se presenta en una lista, al seleccionar una dirección se gráfica la ubicación relativa al punto origen (ubicación de la antena).

El menú **Ceros** presenta el número y ubicación de los nulos de radiación, como será comprensible por el usuario los ceros se refieren a los puntos donde se considera la mínima radiación, pero en muchas ocasiones no es nula. El menú Ceros presenta los siguientes submenús:



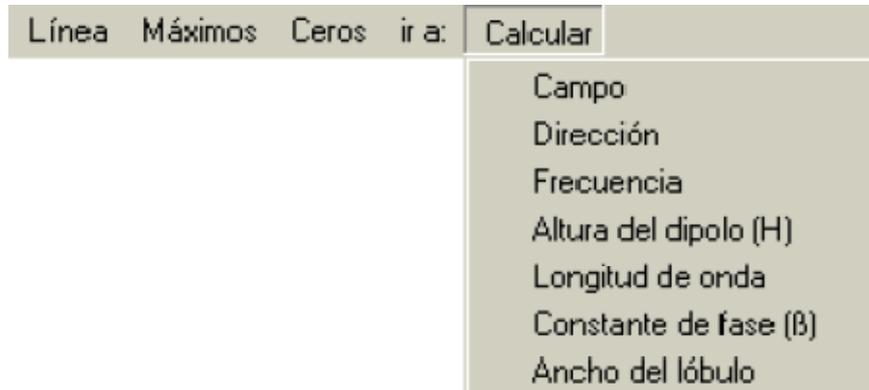
El menú **Ir a:** es una opción que es útil para regresar a ventanas anteriores. En esta se presentan los siguientes submenús:



El submenú **Ventana datos a ingresar** permite regresar al punto donde se exige por parte del programa ingresar una de dos alternativas de ingreso de datos para elaborar el gráfico (valor de  $\beta H$  o frecuencia y longitud del dipolo).

El submenú **Ventana principal**, lleva al usuario a la ventana general de antenas donde se ubican todas las posibles alternativas que presenta el software.

El menú **calcular** es posiblemente una de las herramientas más útiles, ya que da la posibilidad de obtener las más importantes variables para el estudio de radiación de antenas. Este menú presenta los siguientes submenús:



Es importante conocer las restricciones que se presentan al momento de utilizar cada una de estas opciones de cálculo:

Al escoger la alternativa de calcular el **campo** es necesario introducir una dirección angular, pudiendo estar en grados o en radianes según el requerimiento del usuario. Al escoger cualquiera de los modos de introducción de los datos, solo se admite el ingreso de números. Puede tenerse un número asignado a una variable literal en dicho caso el programa presenta en el casillero el valor correspondiente a dicha letra.

La introducción de un valor incorrecto es detectada y se devuelve un mensaje de error para el usuario.

Al pulsar el botón de acceso **Pulsar para calcular** se obtiene el valor de campo en la dirección introducida. Como complemento se obtiene el equivalente de la dirección introducida en grados o radianes. Para una visualización mejor se grafica una recta en la dirección introducida.

En la alternativa **Dirección** el usuario debe ingresar el valor del campo, el programa devolverá la dirección en grados para el campo ingresado. El valor del campo debe ser un número real positivo menor o igual a uno. Se puede obtener más de una

dirección dependiendo del diagrama de radiación, al escoger una dirección se grafica mediante una línea recta dicha dirección.

Al escoger la opción **Frecuencia** se abre una nueva ventana la cual requiere el ingreso de un valor para la altura del dipolo, este valor debe ser positivo y menor que 50 metros se considera un valor irrealizable cualquier valor mayor a este, sin embargo se permite la opción de ignorar esto y de todas maneras realizar el cálculo.

La alternativa **Altura del dipolo (H)** calcula la longitud del dipolo y muestra una nueva ventana en la que se requiere como dato la frecuencia que debe ser un número real positivo.

Las opciones de calcular **Longitud de onda** y **Constante de fase** presentan una nueva ventana, en esta se debe introducir el valor de la altura o de la frecuencia según la decisión del usuario.

Al escoger **Ancho del lóbulo** se obtiene el número de lóbulos principales y el ancho en grados del mismo.

#### **b) La frecuencia y altura del dipolo**

Este modo de cálculo requiere de dos variables: la frecuencia de operación y la longitud del dipolo. Estos valores deben ser números reales positivos, no existe valor límite para la altura, el programa obtiene el gráfico para cualquier valor positivo introducido, pero es importante notar que existen valores irrealizables.

El funcionamiento de cada una de estas alternativas de menús es similar a las ya explicadas anteriormente. Diferiendo en las variables que debe introducir el usuario, para estas variables se admite cualquier valor positivo únicamente con propósitos de estudio, es importante tener en cuenta que el valor de la altura debe estar de acorde con la realidad. Las unidades para la frecuencia son: Megahertz (MHz) y para la longitud los metros (m).

A modo de ejemplo, se selecciona la opción frecuencia y altura del dipolo, ya que es más completa y muestra las mismas características que la primera. Para éste primer ejemplo de simulación se analizará todas las posibilidades de cálculo que existen dentro del software, para los ejemplos posteriores se dará énfasis únicamente a las ventanas principales.

La siguiente pantalla es:

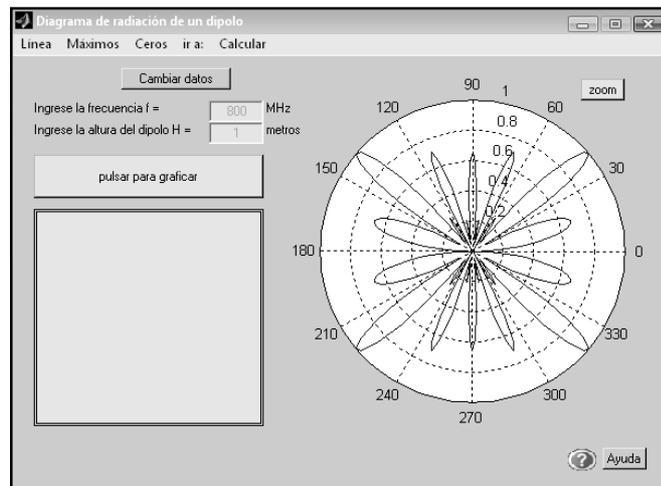


Fig. 6.3: Pantalla del gráfico y cálculo.

Al desplegar los menús superiores se tienen algunas opciones de cálculo. En las siguientes figuras se observa los resultados obtenidos para el ejemplo propuesto.

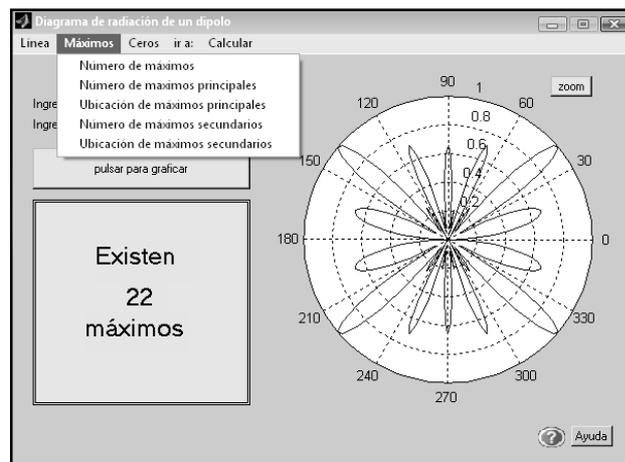


Fig. 6.4: Pantalla del menú – máximos

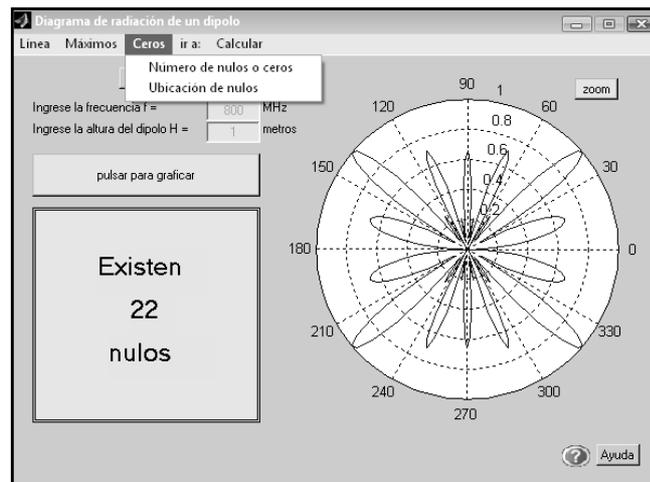


Fig. 6.5: Pantalla del menú – ceros

Estas dos pantallas (6.4 y 6.5) son informativas, muestran tanto el número total de ceros, máximos y mínimos de radiación con sus respectivas ubicaciones en grados.

Dando un clic en el menú **Ir a** puede regresar a la pantalla principal o cambiar los datos en la pantalla de antenas dipolo.

El menú calcular, da la posibilidad de analizar matemáticamente algunos parámetros importantes de este tipo de antenas, vea el gráfico siguiente:

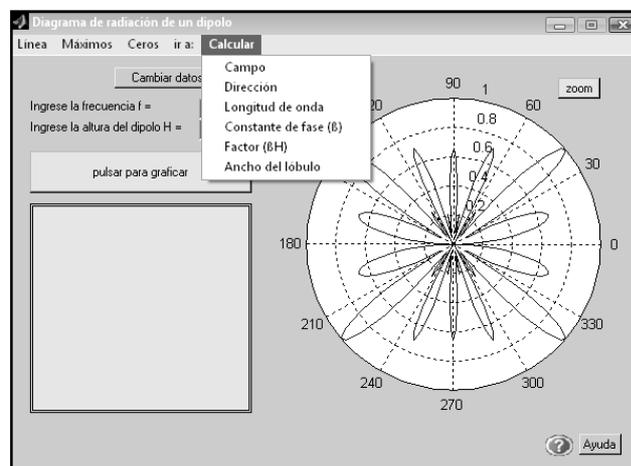


Fig. 6.6: Pantalla del menú - cálculo

Cada una de estas opciones desplegarán pantallas diferentes, pues los resultados numéricos de cada una de ellas necesitan otros datos que debe ingresar el usuario; por ejemplo, para el cálculo del campo a un ángulo de  $40^\circ$  su valor es 1 (valor normalizado).

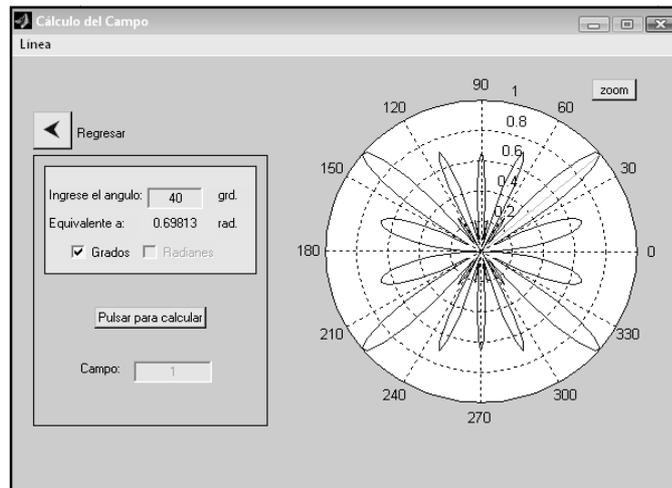


Fig. 6.7: Pantalla para el cálculo del valor del campo a un cierto

En la figura 6.7 se observa que para realizar el cálculo del campo se ha remplazado a la ventana principal por lo que se hace necesario tener un botón que permita retornar a esta ventana, dicho botón se encuentra ubicado en la parte superior izquierda y se llama **regresar**. Se presenta también la opción de **zoom**, éste botón ubica el diagrama de radiación en una nueva ventana en la cual se puede visualizar con mayor detalle.

Al seleccionar el resto de opciones de cálculo se obtienen ventanas independientes de respuesta como se muestra en la siguiente figura.

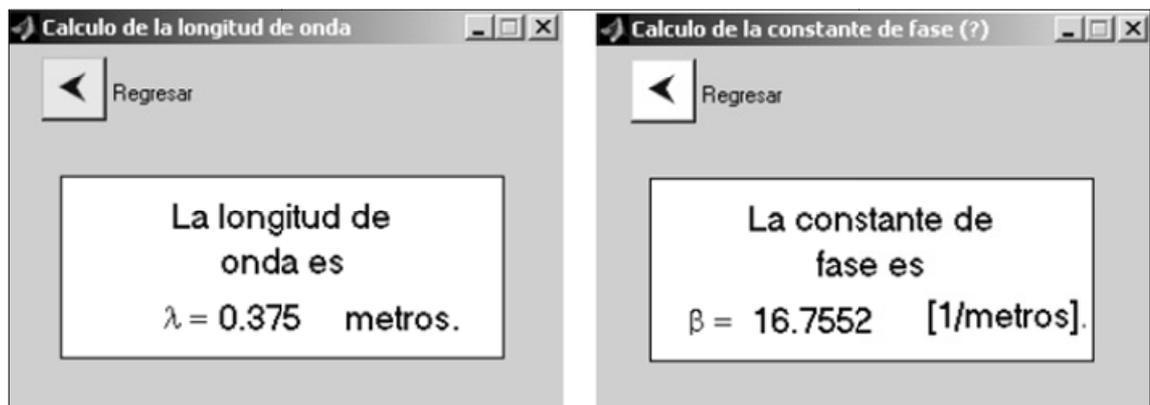


Fig. 6.7.1: Pantalla para el cálculo del valor de  $\lambda$  y  $\beta$ .

## 6.5 Segunda Opción: Arreglos Isotropicos

Al seleccionar esta opción se tiene una ventana en la que se muestra la disposición física de las antenas isotrópicas, son dos antenas separadas una distancia ( $d$ )

alimentadas por una corriente eléctrica desfasada una de la otra por (a) grados, y el valor absoluto de la una corriente es múltiplo del valor absoluto de la otra.

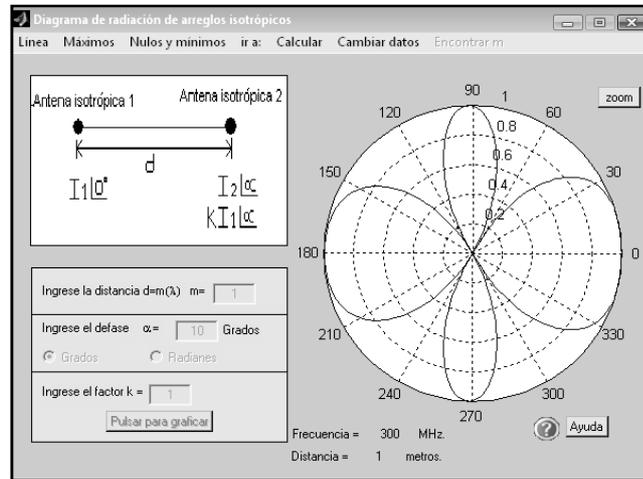


Fig. 6.8: Pantalla principal – arreglos isotrópicos.

En este caso se deben ingresar tres valores requeridos para obtener el diagrama de radiación de este arreglo. Los valores a ingresar son la distancia en múltiplos de la longitud de onda, el desfase en grados o radianes según el requerimiento del usuario y el factor k que define el factor de proporcionalidad de una corriente respecto a la otra.

Los submenús de esta opción son similares al visto en la opción uno. Algo que vale recordar es la diferencia entre nulos y mínimos. Un nulo es un valor muy cercano a cero es decir un punto en el que se anula la radiación para una distancia muy pequeña, y un mínimo es un valor para el cual existe un campo siguiente mayor y uno anterior también mayor, es decir existe un mínimo pero el valor de campo es finito diferente a cero. A continuación se muestra gráficamente la diferencia entre un mínimo y un nulo.

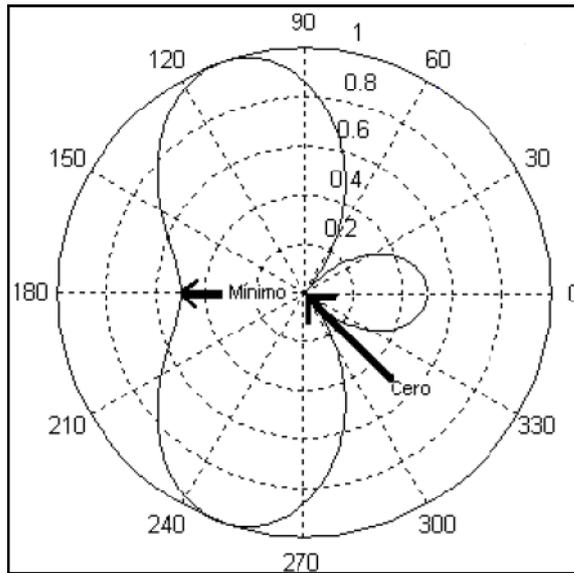


Fig. 6.8.1: Mínimos y nulos de radiación.

## 6.6 ARREGLOS LES (*Linear Equally Spaced*) ISOTRÓPICOS

Al existir una infinidad de posibles arreglos realizables con diferentes elementos de antena, se analizará en esta parte aquellos tipos de arreglos equidistantes denominados arreglos LES cuya característica principal es que todas las antenas están igualmente espaciadas entre si y además su disposición física es en línea recta.

Al escoger esta opción en la pantalla principal de antenas, se presenta una ventana con tres nuevas opciones que son: Arreglos, Arreglos Broadside y Arreglos Endfire.



Fig. 6.9: Pantalla de opciones del menú – arreglos

**a) Arreglos:** Esta alternativa permite obtener el diagrama de radiación para un arreglo lineal con características arbitrarias es decir cualquier tipo de arreglo. Es necesario introducir cuatro parámetros que son: Número de antenas, el desfase entre

cada antena, la frecuencia de operación en MHz y la distancia de separación entre cada antena.

El número máximo de antenas permitido es 50 y esto es únicamente con propósitos didácticos, el valor ingresado debe ser un número real positivo entero menor que 50.

El desfase debe ser ingresado en radianes y puede ser cualquier número real, el programa devuelve un valor equivalente en grados para conocimiento del usuario.

Se admite cualquier valor real positivo como dato para la variable frecuencia, se devuelve un mensaje de error si se introduce un número negativo.

La distancia de separación entre cada antena debe ser un número real positivo menor que diez, se ha impuesto este valor como máximo únicamente con propósitos de estudio.

**b) Arreglos Broadside:** Los arreglos broadside tienen un desfase igual a cero en cada elemento del arreglo, además la distancia de separación entre cada antena es  $d = \lambda/2$  se han definido en mayor detalle en el capítulo cuarto, para obtener el diagrama de radiación se necesita únicamente ubicar el número de antenas que conformarán el arreglo, este valor debe ser un número real positivo menor o igual a 40. Este límite se debe a que mientras mayor es el número de antenas el gráfico se vuelve mucho más complejo y además en la realidad no se utilizaría una cantidad tan grande de antenas, con propósitos de estudio es útil observar el comportamiento de la radiación del arreglo mientras se aumenta la cantidad de elementos.

**c) Arreglo Endfire:** Otro de los arreglos muy utilizado son los Endfire, las características principales de este tipo de arreglo son que tienen una distancia de separación entre antenas  $d = \lambda/4$  y el desfase entre las corrientes que alimentan a cada elemento es  $\alpha = -\beta d = -90^\circ$ . Para realizar el diagrama de radiación se requiere únicamente el ingreso de un dato que es la cantidad de elementos que conformarán el arreglo, debe ser un número real positivo. No se ha puesto un limitante ya que el software trata de comprobar los resultados aproximados que se tendrían, sin embargo

hay que tener claro que un número excesivo de elementos para el arreglo podría ser irrealizable o muy difícil y con poco sentido.

## 6.7 ARREGLOS LES (Linear Equally Spaced) REALES

Al utilizar esta opción se hace necesario definir la configuración que tendrá el arreglo para lo cual el software presenta una nueva ventana con cuatro posibles opciones.

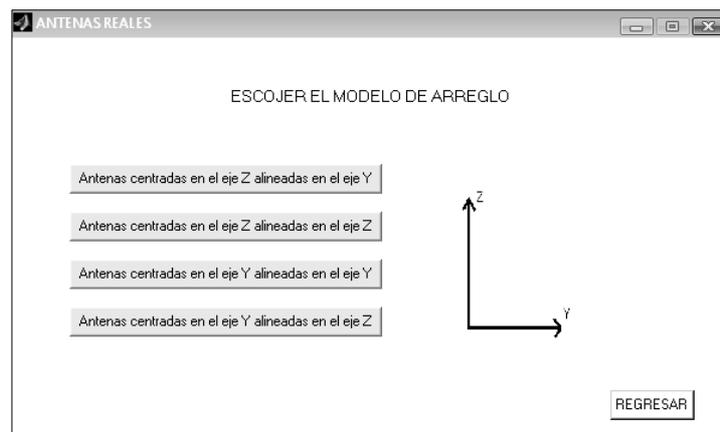


Fig. 6.10 Pantalla para diferentes arreglos LES reales.

Las cuatro características de arreglos reales:

- Antenas centradas en el eje z alineadas en el eje y
- Antenas centradas en el eje z alineadas en el eje z
- Antenas centradas en el eje y alineadas en el eje y
- Antenas centradas en el eje y alineadas en el eje z

Representan antenas que conformarán un arreglo ubicadas en forma consecutiva o colineal y pueden alinearse sobre el eje (y) o el eje (z). Después de elegir una de las configuraciones presentadas es necesario ingresar algunos parámetros como: la altura de las antenas, distancia de separación, número de antenas, desfase y frecuencia de operación para el arreglo elegido:



Fig. 6.11: Pantalla para ingreso de datos.

Por ejemplo si introducimos los siguientes datos:

Altura de las antenas:	1 [m]
Distancia de separación:	0.35 [m]
Número de antenas:	5
Desfase:	20°
Frecuencia:	300 [MHz]

Obtendremos los siguientes diagramas:

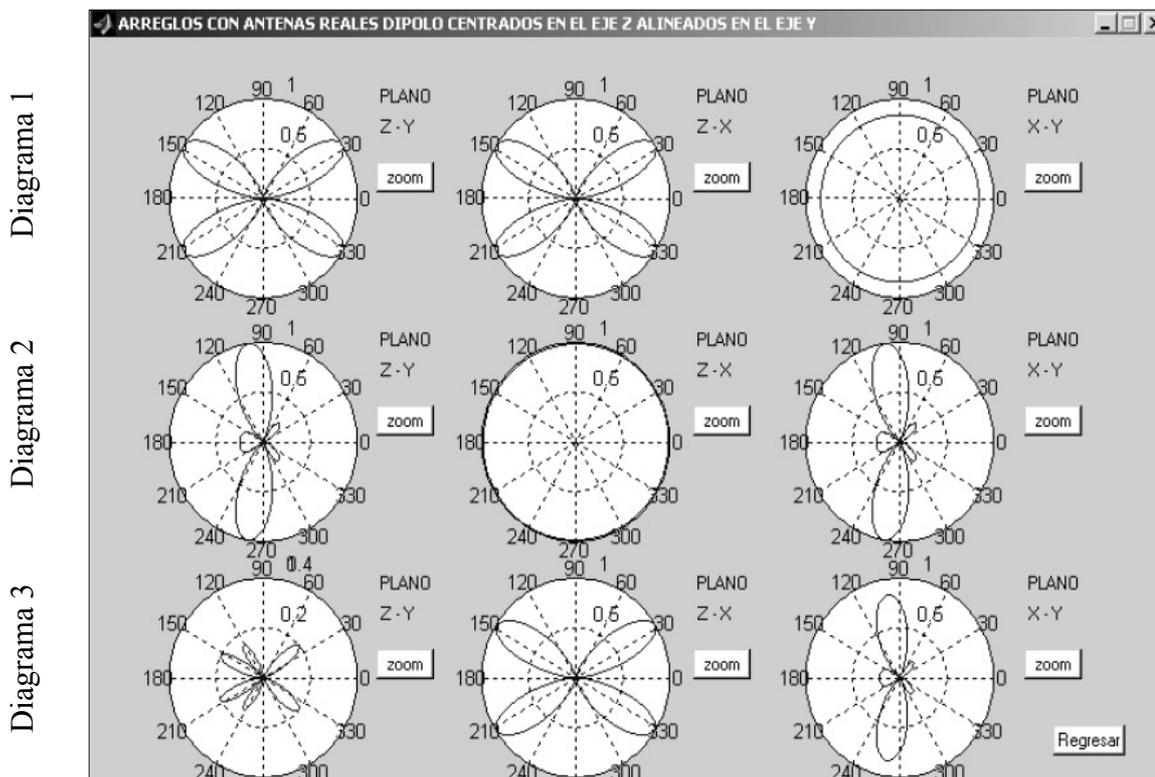


Fig. 6.12. Presentación de diagramas de arreglos LES reales.

Diagrama 1:

Es la representación del diagrama de radiación en los tres planos para una antena dipolo de longitud = 1m, frecuencia de operación = 300 [MHz].

Diagrama 2:

Se observa el diagrama de radiación en los tres planos para un arreglo isotrópico de 5 elementos.

Diagrama 3:

Los diagramas representan la multiplicación de configuraciones plano a plano entre la primera y la segunda fila de los diagramas de radiación.

## 6.8 ANTENAS INTELIGENTES

Las tres principales formas de simulación se presenta en la figura 6.13. El usuario puede acceder a cada una de ellas y explorar todas las características. La única recomendación es que debe revisar todas las configuraciones antes descritas ya que, este tipo de antenas están basadas en la comprensión de las anteriores, no siendo requisito exclusivo para acceder a la siguiente pantalla.

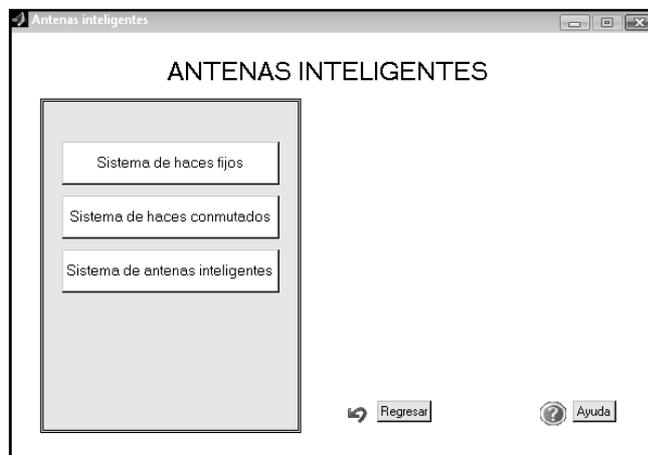


Fig. 6.13. Pantalla principal de sistemas inteligentes.

La primera opción manda a visualizar la pantalla de ingreso de datos necesarios para el cálculo del patrón de radiación para este sistema.

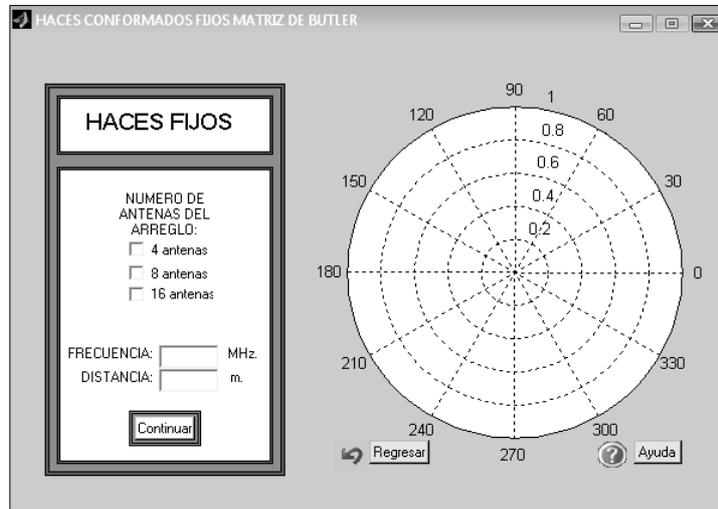


Fig. 6.14. Pantalla de ingreso de datos – hace fijos.

Dependiendo del número de antenas escogidas entre las tres opciones, se obtendrá los diagramas en cada uno de los puertos, según la configuración de Butler mencionado en el capítulo 2. Se puede realizar cálculos de algunos parámetros como en casos anteriores (ver figura 6.15).

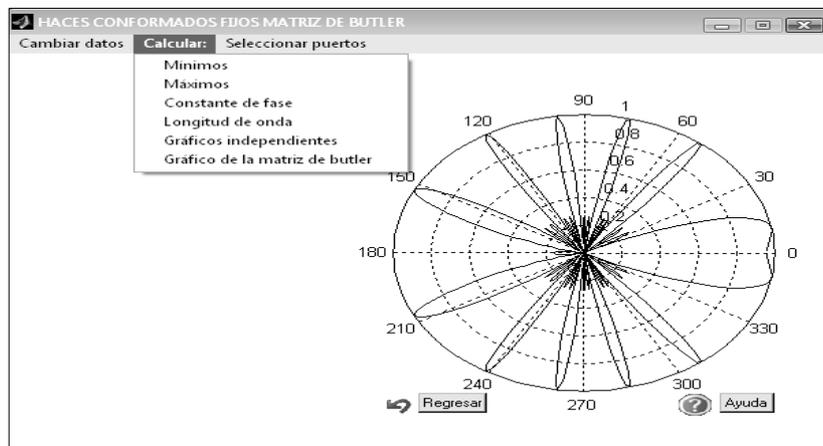


Fig. 6.15. Pantalla de cálculos disponibles – hace fijos.

En el simulador los sistemas de haz conmutado también poseen la misma pantalla de introducción del número de elementos ejecutantes y de la frecuencia de operación para luego proceder a obtener una pantalla similar a la siguiente:

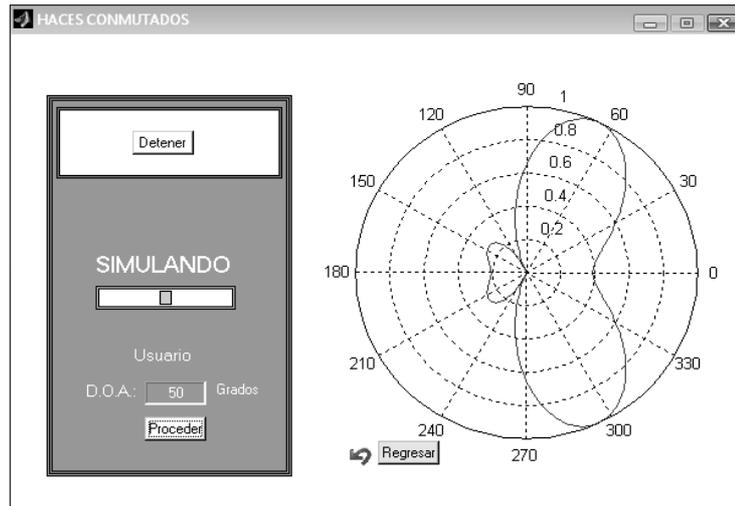


Fig. 6.16. Pantalla de simulación – hace conmutados.

La configuración del diagrama de radiación de este sistema es variante periódicamente en el tiempo como se explicó en el capítulo de antenas inteligentes, es por esto, que su mejor comprensión se obtiene con el uso del software desarrollado.

La última opción es el sistema de antenas adaptativas que, al ingresar en esta, se visualiza la siguiente pantalla:

Fig. 6.17. Pantalla principal – antenas

Los valores que tiene que ingresar el usuario son: número de elementos del arreglo, distancia entre elementos, D.O.A de la señal deseada, frecuencia y el D.O.A para las señales interferentes que se requieran, pudiendo ser éstas máximo cinco como motivo de estudio, pues estas señales realmente pueden ser muy numerosas dependiendo del la complejidad del medio donde se encuentre el arreglo.

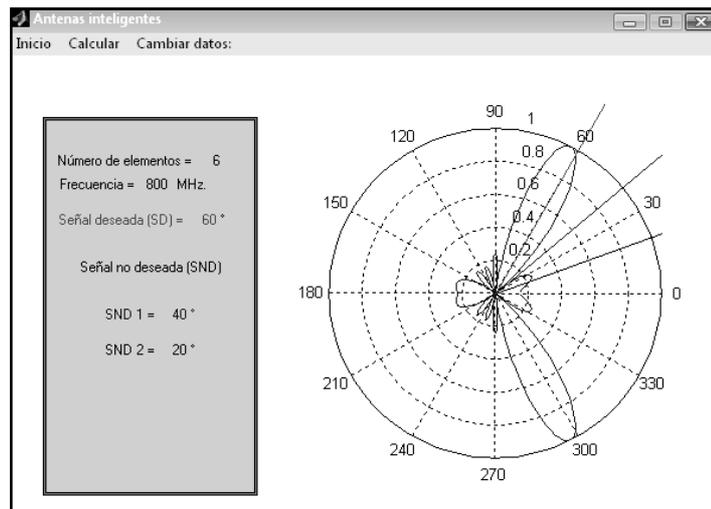


Fig. 6.18. Pantalla de respuesta – antenas

Al ir familiarizando con el simulador se dará cuenta el usuario de varios botones dispuestos en ciertas pantallas, como es el caso del botón **ayuda**, el cual presenta información alternativa sobre la teoría de las antenas analizadas en el software; una pantalla de ayuda es la siguiente:

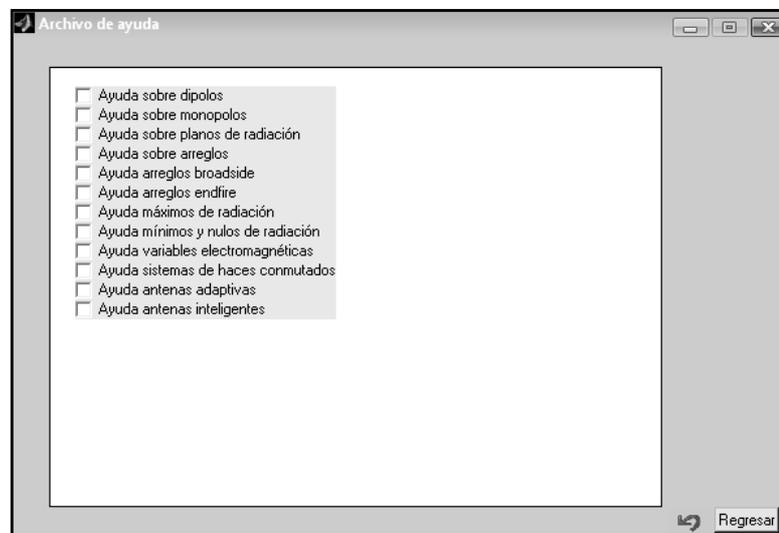


Fig. 6.19. Pantalla de opción de Ayudas.

Una opción para una visualización plena de los resultados del simulador son las opciones del menú **línea**, el cual presenta opciones para diferenciar las líneas de respuesta, ya sea, en su grosor o color, esto es muy solicitado en sistemas donde se debe visualizar varios puertos a la vez. Además, si al momento de introducir los valores en ciertas pantallas y estos son incorrectos, se muestra un mensaje de error

para que el usuario pueda corregir los mismos y continuar con la simulación. En algunos casos se pueden simular con valores no realizables ganando con esto más destreza en la descripción de patrones de radiación.

## CONCLUSIONES

1. Gracias a la capacidad de focalizar el lóbulo principal hacia la dirección de proveniencia de las señales y asignar los lóbulos secundarios en dirección de las señales ramales, las antenas inteligentes pueden proporcionar un mayor alcance o bien, un consumo menor de potencia a la hora de transmitir una señal.
2. Es claro que la implementación de una antena inteligente es muy costosa como también lo es que el aumento en el alcance puede disminuir la cantidad de estaciones base necesarias para cubrir cierta área y con esto, las antenas inteligentes, pueden significar un ahorro a la compañía encargada de las telecomunicaciones en un país o región.
3. Las antenas inteligentes forman parte de una tecnología de última generación, que se están dando a conocer especialmente en telefonía celular, actualmente.
4. Por el gran interés de una buena comunicación en tiempo real y por la complejidad de las antenas inteligentes, se requiere de procesadores muy avanzados y rápidos, y por ende costosos, para que sean capaces de detectar la dirección de llegada de la señal, generar el patrón de radiación más apropiado y realizar la comunicación en tiempos mínimos.
5. Las técnicas de cálculo de DoA y *beamforming* utilizadas por las antenas inteligentes, logran reducir de manera esencial los problemas de comunicación causados por interferencias, dando así una mayor confiabilidad a la hora de la transmisión y recepción de señales.
6. De los tres tipos de antenas inteligentes descritos en este trabajo, las antenas de haz adaptivo son las más avanzadas, proporcionando mejores características a la hora de captar las diferentes señales entrantes y evitar la interferencia; pero a la vez, este tipo de antenas es el más complejo y su implementación es la más costosa.

7. El prototipo que hemos descrito es innovador en nuestro medio puesto que existen sistemas para el análisis de antenas pero dada su condición de software no libres tienen un precio considerablemente alto debido a que son desarrollados con tecnología extranjera. El mérito de este simulador es que es desarrollado en un software libre (matlab 6.1) y los estudiantes interesados tendrán acceso a su código fuente.

Conscientes de que no obstante este sistema es muy versátil y fácil de operar, sería susceptible de mejoras que permitan nuevas y útiles aplicaciones, Por ejemplo, se podría pensar en pasar la presentación de los diagramas a tres dimensiones; esta característica fue pretendida realizar y por motivos como los de tener conocimientos avanzados en la programación de Matlab y disponer de un tiempo adicional al dado para esta tesis, creemos conveniente que esta característica sea tomada en cuenta en futuros proyectos de análisis de antenas, cabe recalcar que actualmente el software presenta los diagramas en cortes bidireccionales útiles para la visualización de las características de una antena.

## **RECOMENDACIONES**

Con base en la investigación realizada y las conclusiones obtenidas, se presentan las siguientes recomendaciones:

1. Que los países en vías de desarrollo, como Ecuador, empiecen a implementar estas tecnologías, para mejorar la calidad de las telecomunicaciones y por consiguiente coadyuvar en el desarrollo del país.
2. Realizar tanto la actualización de este proyecto como otros proyectos de graduación que amplíen y complementen el software presentado en este estudio.

## BIBLIOGRAFÍA

### Referencias Bibliográficas:

- CARDAMA, Ángel. Antenas, España, UPS, 1998.
- CONSTANTINE A Balanis. Antenna Theory Analysis and Design, EEUU, WILEY Jhon & son, 1982.
- HAYT William; Teoría Electromagnética, España, McGraw-Hill, 2006.
- JORDAN, Eduard C. Ondas Electromagnéticas y Sistemas Radiantes, España, Paraninfo, 1983
- KRAUS, John D. Antennas, Mexico, McGraw-Hill, 1988.
- KRAUS, John D, MARHEFKA Ronald J. Antennas for all Applications, Mexico, McGraw-Hill, 2002.
- KRAUS, John D, MARHEFKA, R. Antennas for all Apolications, EEUU, McGraw Hill Higher Education, 2002.
- LIBERTI, Joseph C. Smart Antennas for Wireless Communications, EEUU, IEEE, 1999.
- LIBERTI, Joseph C, RAPPAPORT T.S. Smart Antennas for Wireless Communications: IS-95 and Third Generation CDMA Applications, Prentice Hall, EEUU, 1999.
- WAYNE, Tomasi, Sistemas de comunicaciones electrónicas, México, Prentice Hall Hispanoamericana S.A., 1996.

**Referencias Electrónicas:**

- ALBORNOZ Rafael. Antenas Inteligentes, Venezuela, 2004, [http://lant.ing.uc.edu.ve/FILES/ANTENAS%20INTELIGENTES-8a-\(SEC\).pdf](http://lant.ing.uc.edu.ve/FILES/ANTENAS%20INTELIGENTES-8a-(SEC).pdf)
- DERNERYD Anders, JOHANNISSON B. Sistemas adaptivos para antenas de estaciones base, 1999, [http://www.ericsson.com/ericsson/corpinfo/publications/review/1999\\_03/files/es1999033.pdf](http://www.ericsson.com/ericsson/corpinfo/publications/review/1999_03/files/es1999033.pdf)
- ESPINOSA Perla, VILLARROEL Carlos. Proposición y simulación de un algoritmo adaptativo para sistemas de antenas inteligentes, Chile, 2007 <http://www.scielo.cl/pdf/ingeniare/v15n3/art15.pdf>
- FERNÁNDEZ Oscar. Caracterización del canal radio en plataformas espaciales, Francia, 2001, [http://www.coit.es/pub/ficheros/ono\\_d2b16590.pdf](http://www.coit.es/pub/ficheros/ono_d2b16590.pdf)
- GARCÍA Laura, SIERRA Manuel. Antena impresa para estaciones base de UMTS, España, 2001, [http://w3.iec.csic.es/URSI/articulos\\_modernos/articulos\\_villaviciosaodon\\_2001/articulos/120.pdf](http://w3.iec.csic.es/URSI/articulos_modernos/articulos_villaviciosaodon_2001/articulos/120.pdf)
- MARTINEZ Ramos J, VEGA J, RUIZ S. Software para calculo de patrones de radiación de arreglos lineales de antenas, México, 2001, <http://exa.unne.edu.ar/depar/areas/informatica/SistemasOperativos/cie2001109.pdf>
- MARTÍNEZ Ramón, RODRÍGUEZ Osorio, DE HARO ARIET Leandro, CALVO Miguel, Definición de un interfaz de simulación enlace-sistema para antenas adaptativas, España, [http://w3.iec.csic.es/ursi/articulos\\_modernos/articulos\\_gandia\\_2005/articulos/CMo5/404.pdf](http://w3.iec.csic.es/ursi/articulos_modernos/articulos_gandia_2005/articulos/CMo5/404.pdf)

- MEDINA Alberto B, Antenas satelitales alta ganancia, Chile, 2008, [http://apa.fach.cl/temas/electr\\_telecom/antenas.pdf](http://apa.fach.cl/temas/electr_telecom/antenas.pdf)
- MOYA Mariano, ALMENAR Vicen, FLORES Santiago J., Corral Juan L. Análisis y simulación de antenas inteligentes para sistemas Dect y gsm en entornos indoor, España, [http://w3.iec.csic.es/ursi/articulos\\_modernos/articulos\\_zaragoza\\_2000/ursi2000/trabajos/ms0111.pdf](http://w3.iec.csic.es/ursi/articulos_modernos/articulos_zaragoza_2000/ursi2000/trabajos/ms0111.pdf)
- ORTEGA Patricio, ENRIQUEZ Oscar, MORALES Juan. Estudio de antenas inteligentes y principales aplicaciones en sistemas de telefonía móvil, Ecuador, 2005, <http://ciecfie.epn.edu.ec/JIEE/historial/XIXJIEE/34Antenas%20Corr.pdf>