

**ANTENAS INTELIGENTES EN LOS SISTEMAS DE COMUNICACIONES  
MOVILES**

**ANDRÉS LEONARDO GONZÁLEZ GÓMEZ**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRONICA  
ESPECIALIZACION EN TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2010**

**ANTENAS INTELIGENTES EN LOS SISTEMAS DE COMUNICACIONES  
MOVILES**

**ANDRÉS LEONARDO GONZÁLEZ GÓMEZ**

**Monografía**

**Director**

**FABIO ALONSO GUZMÁN SERNA.**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRONICA  
ESPECIALIZACION EN TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2010**

## CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	12
2. JUSTIFICACION	13
3. ANTECEDENTES	14
4. OBJETIVOS	15
4.1.OBJETIVO GENERAL	15
4.2.OBJETIVOS ESPECIFICOS	15
5. MARCO TEORICO	16
5.1.LAS COMUNICACIONES MOVILES EN LA SOCIEDAD	16
5.2.EL ESPECTRO ELECTROMAGNETICO	16
5.2.1. Frecuencias de transmisión	17
5.3.MODOS DE TRANSMISION	18
5.3.1. Clasificación de sistemas de radiocomunicación móvil	19
5.4.ONDAS ELECTROMAGNETICAS	19
5.4.1. Polarización electromagnética	20
5.4.2. Rayos y frentes de onda	21
5.5.RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA	22
5.5.1. Densidad de potencia e intensidad de campo	22
5.5.2. Impedancia característica del espacio libre	24
5.6.ATENUACION Y ABSORCION DE ONDAS	25
5.6.1. Atenuación	25
5.6.2. Absorción	25
5.7.PROPIEDADES ÓPTICAS DE LAS ONDAS DE RADIO	26
5.7.1. Refracción	26
5.7.2. Reflexión	28
5.7.3. Difracción	30
5.7.4. Interferencia	32
5.8.PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS	32
5.8.1. Ondas terrestres	33
5.8.2. Ondas espaciales	33
5.8.3. Ondas celestes	36
5.9.PÉRDIDAS EN EL ESPACIO LIBRE	36
5.9.1. Margen de desvanecimiento	37
5.10.    PROPAGACIÓN EN UN AMBIENTE MÓVIL Y PORTÁTIL	38

5.11.	ANTENAS	39
5.11.1.	Principio de operación de las antenas	42
5.11.2.	Parámetros de antenas	42
5.12.	ECUACIONES DE MAXWELL	49
5.12.1.	Condiciones de frontera de un conductor	52
5.12.2.	Condiciones de frontera en aislantes	52
5.13.	PARAMETROS DE RADIACION	52
5.13.1.	Relaciones de potencia en una antena transmisora	61
5.13.2.	Principio de reciprocidad	62
5.13.3.	Zonas de campo de antena	62
5.14.	SISTEMAS CELULARES DE RADIOTELEFONÍA MÓVIL	63
5.14.1.	Características del canal en comunicaciones móviles	63
5.14.2.	Técnicas de acceso	65
5.14.3.	Subdivisión de celdas	66
5.14.4.	Transferencia de llamada	67
5.15.	PROPAGACION EN LAS COMUNICACIONES MOVILES	69
5.15.1.	Pérdidas de propagación	70
5.15.2.	El modelo de Okumura-Hata	72
5.15.3.	Interferencias en los sistemas celulares	73
A.	Interferencia cocanal	73
B.	Interferencia de canal adyacente	75
5.16.	EL SISTEMA GSM	75
5.16.1.	Arquitectura del sistema GSM	76
A.	La estación móvil (MS)	77
B.	Subsistema de estación base (BSS)	78
C.	Subsistema de red y conmutación (NSS)	80
D.	Subsistema de operación y mantenimiento (OSS)	82
5.16.2.	Funcionamiento del sistema GSM	83
5.17.	EL SISTEMA GPRS	83
5.17.1.	Arquitectura del sistema GPRS	84
5.17.2.	Funcionalidades del sistema GPRS	86
5.18.	EL SISTEMA IS-95	87
5.18.1.	Características básicas del sistema IS-95	87
5.18.2.	Principios básicos de los sistemas celulares CDMA	88
5.18.3.	Funcionamiento del sistema IS-95	91
5.19.	EL SISTEMA UMTS	92
5.19.1.	Arquitectura del sistema UMTS	93
5.19.2.	Infraestructura de red UMTS	95
6.	ANTENAS INTELIGENTES	97
6.1.	INTRODUCCION	97
6.2.	ANTENAS INTELIGENTES EN LAS REDES WIRELESS	98
6.3.	PRINCIPALES BENEFICIOS DE LAS ANTENAS INTELIGENTES	99
6.4.	LA TECNOLOGIA DE ANTENAS INTELIGENTES	100

6.4.1. Sistemas de conformador de haces fijos (Fixed Beamforming networks)	102
6.4.2. Sistemas de conformador de haces conmutados (Switched Beam Systems)	108
6.4.3. Sistemas de conformador de haces adaptativos (Adaptive Antenna Systems)	109
6.5. CALIBRACIÓN DE LOS ARREGLOS	110
6.6. CONFORMACIÓN DEL HAZ DE DOWNLINK PARA SISTEMAS CDMA ( <i>Acceso múltiple por división de código</i> )	111
6.7. PRINCIPALES ALGORITMOS	113
6.7.1. Basados en la señal de referencia	113
6.7.2. Algoritmo con referencia espacial	116
6.8. SIMULACION DE UN ALGORITMO ADAPTATIVO PARA ANTENAS INTELIGENTES	117
6.9. SIMULACION DEL BEAMFORMING EN ANTENAS INTELIGENTES PARA UN ENTORNO CDMA	122
6.10. ANTENAS INTELIGENTES CON APLICACIÓN EN SDMA	129
6.11. APLICACIÓN DE ANTENAS INTELIGENTES A UMTS	131
6.11.1. Comparación de dos tecnologías distintas de antenas inteligentes en UMTS	133
6.12. ANTENAS INTELIGENTES EN LAS REDES DE SENSORES	137
7. BREVE EVOLUCIÓN CRONOLÓGICA Y ALGUNAS APLICACIONES	141
7.1. MARTIN COOPER LLEGA CON BUENAS VIBRACIONES	141
7.2. MEJORAN ANTENAS INTELIGENTES CALIDAD DE LA COMUNICACIÓN (EL NORTE, NOVIEMBRE 30, 1998)	142
7.3. ANTENAS INTELIGENTES (EL DÍA, DICIEMBRE 27, 2003)	142
7.4. SIEMENS CONSIGUE TRANSMITIR DATOS POR COMUNICACIONES MÓVILES A 1 GBPS (COMUNICACIONES WORLD, DICIEMBRE 16, 2004)	144
7.5. NAVINI NETWORKS Y ULTRANET2GO ANUNCIAN EL LANZAMIENTO COMERCIAL DE BANDA ANCHA INALÁMBRICA PERSONAL EN MÉXICO (JUNIO 29, 2005)	145
7.6. LA UPV DISEÑA ANTENAS ACCESIBLES Y BARATAS PARA VER TELEVISIÓN VÍA SATÉLITE EN AUTOMÓVILES (ELMUNDO.ES, NOVIEMBRE 01, 2008)	146
7.7. UN PROYECTO PARA OPTIMIZAR LAS TRANSMISIONES TELEFÓNICAS, DE RADIO Y TELEVISIÓN (NOVIEMBRE 9, 2009)	147
CONCLUSIONES	149
REFERENCIAS	150
BIBLIOGRAFIA	153

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Espectro electromagnético de frecuencias.	17
Figura 2: Espectro electromagnético de longitudes de onda.	18
Figura 3: Polarización a) Lineal, b) Elíptica y c) Circular	20
Figura 4: Onda electromagnética.	21
Figura5: Onda Plana. Rayos Ra, Rb, Rc, Rd y frente de onda ABCD.	22
Figura 6: Frente de onda y rayos producidos por una fuente puntual.	22
Figura 7: Absorción atmosférica de las ondas electromagnéticas.	26
Figura 8: Refracción en una frontera plana entre dos medios.	27
Figura 9: Reflexión electromagnética en una frontera plana entre dos medios.	28
Figura 10: Reflexión en superficie semiáspera.	30
Figura 11: Difracción de ondas electromagnéticas.	31
Figura 12: Suma lineal de dos vectores con distintos ángulos de fase.	32
Figura 13: Modos de propagación de ondas.	33
Figura 14: Propagación de ondas terrestres.	34
Figura 15: Propagación de ondas espaciales.	34
Figura 16: Horizonte de radio.	35
Figura 17: Capas ionosféricas.	37
Figura 18: Multitrayectoria en un ambiente móvil.	38
Figura 19: Desvanecimiento rápido.	39

Figura 20: Algunos tipos de antenas.	40
Figura 21: Mecanismo de radiación.	42
Figura 22: a) Antena Hertz, b) y c) Monopolo y su correspondiente altura efectiva, d) y e) Dipolo y su correspondiente longitud efectiva.	44
Figura 23: Definición de radián.	53
Figura 24: Patrón de radiación.	54
Figura 25: a) Grafica Polar, b) Grafica lineal y c) Grafica logarítmica de la misma antena.	55
Figura 26: Representación de un campo con polarización vertical.	58
Figura 27: Representación de polarización circular y elíptica.	58
Figura 28: Modelo de medición de patrones co-polar y cros-polar.	59
Figura 29: Relaciones de potencia en una antena transmisora.	61
Figura 30: Principio de reciprocidad de antenas.	62
Figura 31: Intensidad de campo. Media típica.	64
Figura 32: Técnicas de acceso: a. FDMA, b. TDMA y c. CDMA.	66
Figura 33: Subdivisión de celdas.	66
Figura 34: Proceso de transferencia de llamada.	67
Figura 35: Tipos de transferencia en función de los elementos que participan.	68
Figura 36: Efecto ping-pong, por sucesivas transferencias de llamada.	69
Figura 37: Potencia recibida en un terminal en movimiento.	70
Figura 38: Pérdidas de propagación según la distancia.	71
Figura 39: Interferencia cocanal.	74
Figura 40: Interferencia de canal adyacente.	75

Figura 41: Diagrama de bloques del sistema GSM.	76
Figura 42: Arquitectura de red del sistema GSM.	77
Figura 43: Elementos de la estación móvil.	77
Figura 44: Subsistema de estación base.	79
Figura 45: Ubicación del sistema BSS.	79
Figura 46: Subsistema de red y conmutación.	81
Figura 47: Arquitectura lógica de GPRS.	85
Figura 48: Principio de funcionamiento de los sistemas CDMA.	89
Figura 49: Funcionamiento de la estación base en el enlace descendente.	90
Figura 50: Funcionamiento de la estación base en el enlace ascendente.	90
Figura 51: Arquitectura UMTS.	94
Figura 52: Bloque UTRAN.	94
Figura 53: Infraestructura de red UMTS.	96
Figura 54: Lóbulo de radiación de una antena inteligente	99
Figura 55: Incidencia de una onda plana sobre una antena.	100
Figura 56: Radiación de energía.	101
Figura 57: Matriz de Butler con 4 elementos.	103
Figura 58: Diagrama de radiación.	104
Figura 59: Matriz de Butler con 8 elementos.	105
Figura 60: Matriz de Butler con 16 elementos.	106
Figura 61: Esquema simplificado de una red de haces conmutados.	108
Figura 62: Sistema de arreglo adaptativo.	109



Figura 63: Conformación de haces en el downlink.	111
Figura 64: Efecto multi-trayectoria.	112
Figura 65: Ponderaciones en un arreglo lineal de 4 antenas con diferentes algoritmos.	119
Figura 66: Error cuadrático medio del sistema de antena lineal con diferentes algoritmos.	120
Figura 67: Seguimiento de la señal deseada.	121
Figura 68: Diagrama de flujo del sistema de antenas inteligentes.	123
Figura 69: Representación de los ángulos de arribo de los usuarios deseados e interferentes.	124
Figura 70: Ingreso de datos para la simulación del patrón de radiación.	125
Figura 71: Respuesta del Algoritmo estadísticamente óptimo.	126
Figura 72: Respuesta del Algoritmo LMS.	127
Figura 73: Respuesta del Algoritmo RLS.	127
Figura 74: Patrón de radiación en forma polar de lo diferentes algoritmos.	128
Figura 75: Grafico del criterio PRD.	129
Figura 76: Valores medios de C/I (enlace ascendente).	134
Figura 77: Diagrama de bloques del receptor de la estación base y lazo de generación de la referencia.	135
Figura 78: Diagramas de radiación conformados de un array de 10 elementos y diferentes dispersiones angulares.	136
Figura 79: Ilustración de la ganancia de antena isotrópica y antena dirección con control de potencia.	137
Figura 80: Incremento de la capacidad gracias a las antenas inteligentes.	138
Figura 81: Antena inteligente con micro switch.	138
Figura 82: Topología de la red simulada.	139

Figura 83: Rendimiento promedio en función del tiempo de simulación. 140

Figura 84: Retraso extremo a extremo respecto a identificador de paquete para D802.15.4 y 802.15.4. 140

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Designación de banda CCIR.	17
Tabla 2: Clasificación de las antenas.	41
Tabla 3: Frecuencias, usos y tipos de antenas.	41
Tabla 4: Ecuaciones de Maxwell.	50
Tabla 5: Relaciones fundamentales.	51
Tabla 6: Expresiones del modelo matemático de Okumura-Hata.	73
Tabla 7: Características de los sistemas.	74
Tabla 8: Características del sistema IS-95.	88
Tabla 9: Desfase de cada elemento en matriz de Butler de 4 antenas.	103
Tabla 10: Desfase de cada elemento en matriz de Butler de 8 antenas.	105
Tabla 11: Desfase de cada elemento en matriz de Butler de 16 antenas.	107
Tabla 12: Extensión del rango en un sistema CDMA.	113
Tabla 13: Técnicas de beamforming estadísticamente óptimo.	117
Tabla 14: Parámetros del escenario simulado.	139

## RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

**TITULO:** ANTENAS INTELIGENTES EN LOS SISTEMAS DE COMUNICACIONES MOVILES  
**AUTOR:** ANDRÉS LEONARDO GONZÁLEZ GÓMEZ  
**FACULTAD:** ESPECIALIZACION EN TELECOMUNICACIONES  
**DIRECTOR:** FABIO ALONSO GUZMÁN SERNA

### RESUMEN

Esta monografía se realizó en base a una extensa documentación y clasificación de información recolectada de diferentes fuentes como libros, revistas y gran variedad de artículos. Material disponible en la biblioteca ó en las bases de datos de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga. La primera parte del documento reúne gran cantidad de conceptos y definiciones relacionados con la teoría electromagnética, tales como: ondas electromagnéticas, la forma en la que se propagan, frecuencias de transmisión, sistemas de radiocomunicación, etc. entre otros temas fundamentales a la hora de hablar de comunicaciones móviles. El tema siguiente es el de Antenas, su clasificación, sus ecuaciones y parámetros básicos para caracterizarlas; argumentos necesarios para hacer notar el protagonismo de este elemento en las comunicaciones inalámbricas.

Antes de entrar en el tema central de la monografía se hace una breve descripción (a modo de ejemplo de comunicación móvil) de la telefonía celular y sus diferentes generaciones a lo largo de su evolución. Una vez definidos los conceptos necesarios para facilitar el estudio de las antenas inteligentes, se abarca el tema a profundidad. Empezando con la definición, los beneficios y la forma en que funcionan, para luego pasar a describir las posibles configuraciones que se conocen actualmente de esta tecnología, siendo *la técnica de haz conmutado* la que mayor nivel de "inteligencia" presenta y más ventajas ofrece. También se describe la parte algorítmica, basada en complejos métodos numéricos de análisis matemático y encargada de la inteligencia del sistema. Para complementar esta parte se incluyen notables investigaciones que se han desarrollado por parte de diferentes universidades en Latino América y Europa.

Para terminar el documento se resume una pequeña evolución cronológica y se mencionan algunas de las más destacadas aplicaciones en las que está siendo involucrada la tecnología de antenas inteligentes

**PALABRAS CLAVES:** Antenas inteligentes, Comunicaciones Móviles, Ondas Electromagnéticas, Arreglos de Antenas

## GENERAL SUMMARY OF WORK OF DEGREE

**TITLE:** ANTENAS INTELIGENTES EN LOS SISTEMAS DE  
COMUNICACIONES MOVILES  
**AUTHOR:** ANDRÉS LEONARDO GONZÁLEZ GÓMEZ  
**FACULTY:** ESPECIALIZACION EN TELECOMUNICACIONES  
**DIRECTOR:** FABIO ALONSO GUZMÁN SERNA

### ABSTRACT

This monograph was conducted based in an extensive documentation and classification of information gathered from various sources like books, magazines and a variety of papers. Available all these in the library of the Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga sectional, or in its databases.

The first part of the document brings together a wealth of concepts and definitions related to electromagnetic theory, such as electromagnetic waves, way of spread, transmission frequencies, radiocomunications systems, etc. among other essentials issues when talking about mobile communications. The next topic is the antennas, classification its, their equations and basic parameters to characterize them; arguments necessary to note the prominence of this element in wireless communications.

Before entering in the main theme of the monograph has been made a brief cellular telephony description (like example of mobile communications), and their different generations during their evolution.

After defining the concepts necessary to facilitate the study of smart antennas, the topic is covered in depth. Starting with the definition benefits and how they work, then is describe the possible configurations that are currently known in this technology, being the switched beam technique the higher level of "intelligence" and that offer more benefits. It also describes the algorithms' part, based on complex numerical methods of mathematical analysis and it is charge of the intelligence in the system. To complement this part are include researches that have been developed by some universities in Latin America and Europe.

For finally the paper has been summarized development chronologically, and is talked about some of the applications in that are being involved the smart antennas technology.

**KEY WORDS:** Smart antennas, Mobile Communications, Electromagnetics Waves, Antennas Arrays.

## 1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento en el número de usuarios de servicios móviles, ha obligado a las compañías proveedoras, a incrementar su capacidad para mejorar la cobertura, el ancho de banda y la calidad de los servicios ofrecidos. Estos servicios, especialmente los de características multimedia, demandan altas tasas binarias lo cual, junto con el aumento en el número de usuarios, provoca un significativo incremento en el tráfico que se transmite por las redes.

Es evidente que los operadores se enfrentan a la creciente demanda de capacidad para servicios de voz y de datos. Aunque la nueva tecnología 3G ofrece tasas de datos más altas y el doble de capacidad de voz en comparación con 2G y sus antecesores, su rendimiento real sigue siendo susceptible a interferencias.

Todo esto ha motivado el desarrollo de investigaciones en el campo de las antenas y de la propagación con el fin de reforzar estos aspectos y mejorar la calidad de la señal tanto en el equipo receptor como en el transmisor, consolidando así la utilidad de los sistemas de comunicaciones móviles y sus servicios.

Las antenas inteligentes, son una de las tecnologías que se proyectan como de alta capacidad en sistemas móviles y que reducen eficientemente la multi-trayectoria y la interferencia cocanal. Dichas antenas, logran todo esto focalizando la radiación solo en la dirección deseada y ajustándose a los cambios de tráfico en el medio. Y es tal vez la gran cantidad de tráfico, la mayor dificultad a la hora de implementar antenas inteligentes en los sistemas de comunicaciones móviles.

La evolución de poderosos procesadores digitales y los avances en el desarrollo de software para los sistemas de comunicaciones móviles, han hecho posible el uso de antenas inteligentes en este tipo de comunicaciones.

Este trabajo pretende hacer un breve estudio y recopilar información, sobre la tecnología de antenas inteligentes, su aparición en la historia, evolución y los beneficios que han traído para el desarrollo de las telecomunicaciones.

## **2. JUSTIFICACION**

La creciente demanda de servicios de comunicaciones y la necesidad de mejorar no solo la cobertura sino también la calidad de dichos servicios, han sido el principal aliento para adelantar investigaciones en el campo de las antenas inteligentes, que surgen como una muy buena alternativa para afianzar los aspectos mencionados, trayendo mejoras tanto en la transmisión como en la recepción.

El aumento del número de usuarios en los sistemas de comunicaciones móviles ha provocado la necesidad de aumentar su capacidad. Con la llegada de las nuevas tecnologías y servicios de última generación que requieren gran ancho de banda, es indispensable buscar alternativas que permitan aumentar la capacidad del sistema tanto como sea posible.

### 3. ANTECEDENTES

ArrayComm, fundada por Martin Cooper padre del teléfono móvil, figura como una de las primeras compañías que inicio la investigación sobre antenas inteligentes de la mano con el desarrollo de las tecnologías inalámbricas. [1]

En 1998, el director del departamento de investigación en comunicaciones inalámbricas de Laboratorios Bell anuncia la salida al mercado de las antenas inteligentes y expresa la posibilidad de que estas mejoren la calidad y aumenten la capacidad en transmisión. [2]

Ya para el 2003 la utilización de las antenas inteligentes en la telefonía móvil permitía dar servicio a un mayor número de usuarios con los mismos recursos, la tercera generación. [3]

Desde entonces los estudios sobre antenas inteligentes se han venido intensificando, con diversos experimentos y pruebas que varían entre las distintas formas de construcción de antenas, arreglos en redes de antenas y materiales usados para la fabricación de las mismas.

Y en el año 2009, la empresa Televés presento, en “ANGA la feria del cable, satélite y multimedia” que se celebro en la ciudad Alemana de Colonia del 26 al 28 de mayo, la DAT HD. La primera antena inteligente desarrollada específicamente para la Televisión Digital Terrestre y la futura televisión de alta definición. [4]



## **4. OBJETIVOS**

### **4.1 OBJETIVO GENERAL**

Documentar y exponer el funcionamiento, implementación y estado del arte de la tecnología de antenas inteligentes.

### **4.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Documentar la evolución cronológica de los sistemas de comunicaciones móviles y de las antenas inteligentes.
- Investigar las implementaciones de las antenas inteligentes en los dispositivos móviles.
- Enunciar las ventajas y desventajas de las antenas inteligentes empleadas en los sistemas móviles.
- Analizar las diferentes investigaciones, simulaciones y demás proyectos relacionados con las antenas inteligentes en las redes móviles.

## **5. MARCO TEORICO**

### **5.1 LAS COMUNICACIONES MOVILES EN LA SOCIEDAD**

De manera gradual la sociedad se ha venido familiarizando con la movilidad, que día a día emerge ante ella; la forma como se pueden hacer las compras, consultar las transacciones bancarias, pagar servicios públicos, los procesos de aprendizaje, entre otros, son claras evidencias de ello. Todo esto afecta directamente cada aspecto de la sociedad, modificando su forma de vida. [5]

En unos pocos años los cambios han sido reveladores, los teléfonos móviles y el internet pasaron a ser necesidades básicas y hoy en día cuentan con millones de usuarios en todo el mundo; las empresas modificaron su forma de operación gracias a las tecnologías de la información y las comunicaciones, aumentado su competitividad y desempeño; y las investigaciones aprovechan toda esta tecnología para potencializar sus estudios. Además, todo esto hace que el acceso a la información sea hoy más fácil, rápido y económico. [6]

En esta década podemos decir que los adelantos en cuestiones de tecnología han sido muchos, pero parece que los que están por venir son muchos más, producto de la convergencia entre informática, comunicaciones y electrónica. Y en todo este entorno las comunicaciones móviles han estado y seguirán estando presente de forma protagónica, porque la movilidad en la comunicación y en la provisión de información es una necesidad para la población y genera un gran aporte al desarrollo de la sociedad. [7]

### **5.2 EL ESPECTRO ELECTROMAGNETICO**

El objetivo de todo sistema de comunicaciones es transferir información de un lugar a otro, entre dos o más estaciones. Para tal fin se convierte la información original en energía electromagnética, y se propaga: en forma de voltaje o corriente a través de un conductor o hilo metálico, como ondas luminosas a través de una fibra óptica, o como ondas de radio emitidas al espacio libre. Dicha energía se distribuye en un intervalo de frecuencias. La frecuencia hace referencia al número de veces que se repite un movimiento periódico y su unidad básica es el hertz (Hz). [8]

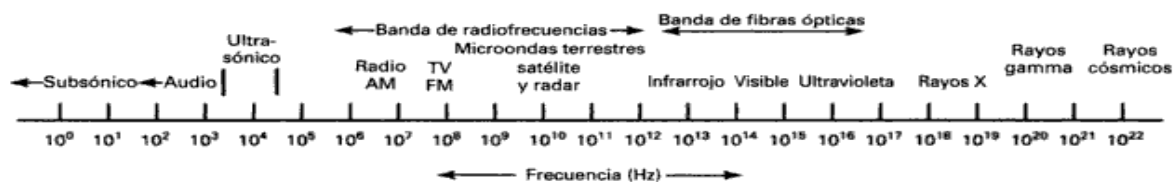


Figura 1: Espectro electromagnético de frecuencias.<sup>1</sup>

### 5.2.1 Frecuencias de transmisión

El espectro de frecuencias se divide en subsecciones o bandas, con sus respectivos nombres y límites. El espectro de radiofrecuencias (RF) se divide en bandas de frecuencias más angostas, y algunas de esas bandas se subdividen en diversos tipos de servicios. *El comité consultivo internacional de radio (CCIR)*, presenta la siguiente tabla para la designación de bandas.

Número de banda	Intervalo de frecuencias*	Designación
2	30 Hz–300 Hz	ELF (frecuencias extremadamente bajas)
3	0.3 kHz–3 kHz	VF (frecuencias de voz)
4	3 kHz–30 kHz	VLF (frecuencias muy bajas)
5	30 kHz–300 kHz	LF (bajas frecuencias)
6	0.3 MHz–3 MHz	MF (frecuencias intermedias)
7	3 MHz–30 MHz	HF (frecuencias altas)
8	30 MHz–300 MHz	VHF (frecuencias muy altas)
9	300 MHz–3 GHz	UHF (frecuencias ultra altas)
10	3 GHz–30 GHz	SHF (frecuencias super altas)
11	30 GHz–300 GHz	EHF (frecuencias extremadamente altas)
12	0.3 THz–3 THz	Luz infrarroja
13	3 THz–30 THz	Luz infrarroja
14	30 THz–300 THz	Luz infrarroja
15	0.3 PHz–3 PHz	Luz visible
16	3 PHz–30 PHz	Luz ultravioleta
17	30 PHz–300 PHz	Rayos X
18	0.3 EHz–3 EHz	Rayos gamma
19	3 EHz–30 EHz	Rayos cósmicos

\* $10^0$ , hertz (Hz);  $10^3$ , kilohertz (kHz);  $10^6$ , megahertz (MHz);  $10^9$  gigahertz (GHz);  $10^{12}$ , terahertz (THz);  $10^{15}$ , petahertz (PHz);  $10^{18}$  exahertz (EHz)

Tabla 1: Designación de banda CCIR.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Tomado de: Sistemas de Comunicaciones Electrónicas, Wayne Tomasi, Cuarta Edición, Pág. 4.

<sup>2</sup> Tomado de: Sistemas de Comunicaciones Electrónicas, Wayne Tomasi, Cuarta Edición, Pág. 6.

La longitud de onda son las unidades para medir la distancia que ocupa un ciclo de una onda electromagnética ó una inversión de onda completa en el espacio. Este tipo de unidades son más usadas cuando se manejan ondas de radio. [8]

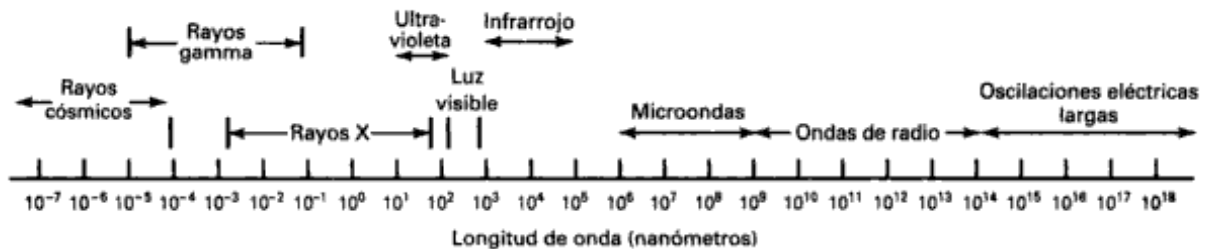


Figura 2: Espectro electromagnético de longitudes de onda. <sup>3</sup>

### 5.3 MODOS DE TRANSMISION

#### Simplex (SX)

Las transmisiones solo se hacen en una dirección. Una estación puede ser un transmisor o un receptor pero no ambos a la vez. Por ejemplo: la emisión de radio y televisión. [8]

#### Semidúplex (HDX, de half duplex)

Las transmisiones se pueden hacer en ambas direcciones, una estación puede ser transmisora y receptora, pero no al mismo tiempo. Por ejemplo: los radios que usan botones para hablar (PTT, de push to talk), como los que usan las empresas de seguridad y la policía. [8]

#### Duplex total (FDX, de Full duplex)

Las transmisiones se pueden hacer en ambos sentidos al mismo tiempo. Las estaciones pueden transmitir y recibir de forma simultánea, sin embargo, la estación a la que se transmite también debe ser de la que se recibe. Por ejemplo: el sistema telefónico normal. [8]

#### Duplex total/general (F/FDX, de full/full duplex)

<sup>3</sup> Tomado de: Sistemas de Comunicaciones Electrónicas, Wayne Tomasi, Cuarta Edición, Pág. 7.

Las transmisiones se pueden hacer en ambos sentidos y las estaciones pueden recibir o transmitir de forma simultánea, pero no necesariamente entre las dos mismas estaciones, en cualquier momento de la comunicación puede intervenir

una tercera estación o cualquier otra que haga parte de una determinada red de estaciones. Este tipo de transmisiones son casi de uso exclusivo para comunicaciones de datos, por ejemplo: el servicio postal de Estados Unidos funciona de esta forma, dúplex total/general. [8]

### 5.3.1 Clasificación de sistemas de radiocomunicación móvil

En un enlace de radiocomunicación móvil uno o ambos terminales pueden estar en movimiento o fijos en determinado lugar. En la mayoría de los casos, la estación base esta fija, y los terminales móviles pueden ser vehículos en tierra, barcos, aviones, satélites, teléfonos móviles o computadores portátiles.

Y según el modo de transmisión se puede hablar de una clasificación de estos sistemas:

**Radiófonos:** son radios que permiten la comunicación en ambos sentidos, proporcionan alrededor de 40 canales y no son muy privados en la comunicación. [9]

**Sistemas de radiobúsqueda:** los usuarios portan receptores personales y cada receptor reacciona solo a señales dirigidas únicamente hacia él por un operador. Un tono audible alerta al usuario. [9]

**Sistemas de radio móvil por paquetes:** transmiten a varios dispositivos en el mismo canal sin interferir con otros transmisores, gracias a técnicas de acceso múltiple. Su principal ventaja es que no dependen de topologías fijas, son fáciles de establecer y pueden trabajar sin necesidad de un operador. [9]

**Sistemas de radiotelefonía:** incluyen los sistemas de radiotelefonía móvil tradicionales así como también los nuevos sistemas celulares. [9]

## 5.4 ONDAS ELECTROMAGNETICAS

En la mayoría de los sistemas de comunicaciones es imposible interconectar físicamente dos equipos con cable o alguna guía de onda, especialmente cuando los transmisores o receptores son móviles, por esta razón se suele usar el espacio libre o la atmosfera terrestre como medio de transmisión.

Cuando las ondas se transmiten por el espacio libre se habla de *propagación de radiofrecuencia (RF)*. Las ondas electromagnéticas se propagan, en el espacio libre, como la luz: en línea recta y a 300.000.000 de metros por segundo.

Para propagar las ondas de radio por la atmosfera terrestre se necesita irradiar la energía desde la fuente y luego debe ser capturada en el lado de recepción, la irradiación y la captura de energía son funciones de las antenas. [10]

#### 5.4.1 Polarización electromagnética

Una propiedad muy importante de las ondas electromagnéticas es la polarización, esta propiedad describe la orientación del campo eléctrico E. [11]

Las ondas electromagnéticas contienen un campo eléctrico y uno magnético, que están ubicados perpendicularmente entre sí.

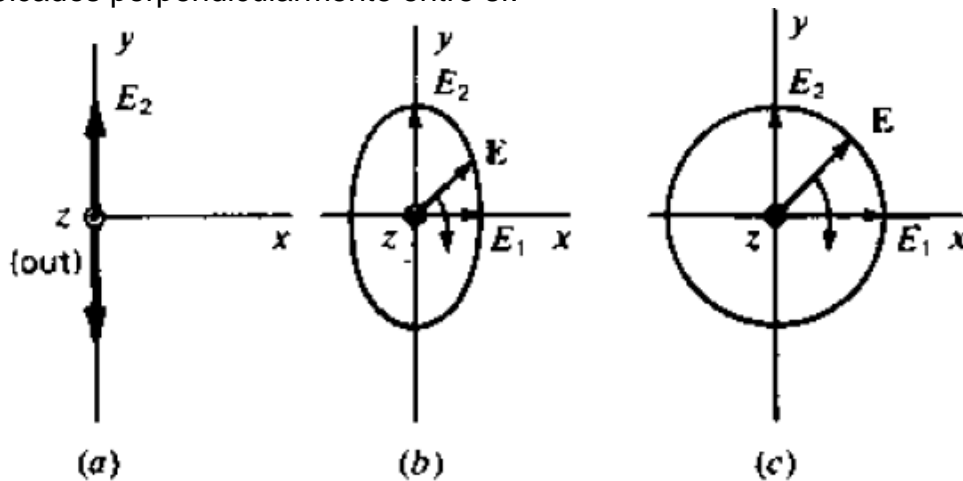


Figura 3: Polarización a) Lineal, b) Elíptica y c) Circular.<sup>4</sup>

Por ejemplo una onda plana que viaja hacia fuera de la pagina (Figura 3 (a)), en la dirección z positiva, con el campo eléctrico todo el tiempo en la dirección y. Esta onda se dice que posee polarización lineal (en la dirección y) y se representa como [11]:

$$E_y = E_2 \sin(\omega t - \beta z)$$

En general, la orientación del vector de campo eléctrico con respecto a la superficie de la tierra, define el tipo de polarización.

**Polarización lineal:** la polarización permanece constante. La *polarización horizontal* y la *polarización vertical* son dos formas de polarización lineal.

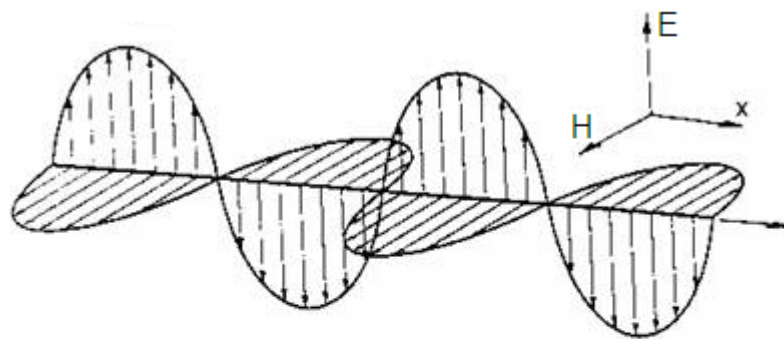
<sup>4</sup> Tomado de: Antennas, John Kraus, Segunda Edición, Pág. 71.

**Polarización horizontal:** el campo eléctrico se propaga en dirección paralela a la superficie terrestre.

**Polarización vertical:** el campo eléctrico se propaga en dirección perpendicular a la superficie terrestre.

**Polarización circular:** el vector de polarización gira  $360^\circ$  durante el recorrido de la onda, y la intensidad de campo es igual en todos los ángulos.

**Polarización elíptica:** la intensidad de campo varía con cambios en la polarización.



E	Campo eléctrico
H	Campo magnético
x	Dirección de propagación

**Figura 4: Onda electromagnética. Autor**

#### 5.4.2 Rayos y frentes de onda

Los conceptos de *rayos* y *frentes de onda* se usan para ilustrar los efectos de la propagación de las ondas electromagnéticas, esta ilustración se hace necesaria porque dichas ondas son invisibles.

Un *rayo* es una línea trazada para mostrar la dirección relativa en la que se propaga la onda. Un *frente de onda* ilustra la unión de puntos de igual fase en rayos que se propagan desde la misma fuente. [8]





Figura 5: Onda Plana. Rayos Ra, Rb, Rc, Rd y frente de onda ABCD. <sup>5</sup>

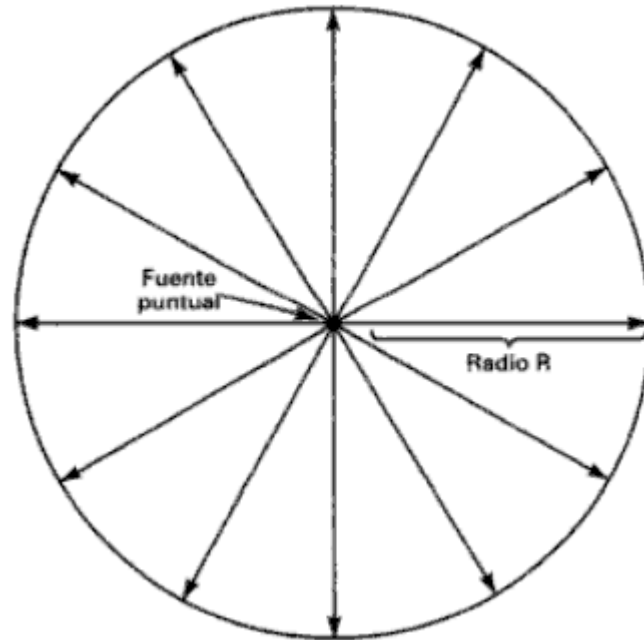


Figura 6: Frente de onda y rayos producidos por una fuente puntual. <sup>6</sup>

## 5.5 RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

### 5.5.1 Densidad de potencia e intensidad de campo

La rapidez con que la energía (representada por las ondas electromagnéticas) atraviesa una superficie dada en el espacio libre se le conoce como *densidad de potencia*. Entonces densidad de potencias es energía, por unidad de tiempo y por unidad de área, se expresa en watts por metro cuadrado. La intensidad de campo hace referencia a la intensidad de los campos eléctrico y magnético de una onda electromagnética que se propaga por el espacio libre. La intensidad de campo eléctrico se expresa en volts por metro, y la del campo magnético en amperes por metro. [12]

<sup>5</sup> Tomado de: Sistemas de Comunicaciones Electrónicas, Wayne Tomasi, Cuarta Edición, Pág. 348.

<sup>6</sup> Tomado de: Sistemas de Comunicaciones Electrónicas, Wayne Tomasi, Cuarta Edición, Pág. 349.

*Densidad de Potencia:*

$$P = E \times H \quad (\text{Watts}/\text{m}^2)$$

$P$  = densidad de potencia (watts por metro cuadrado)

$E$  = intensidad rms del campo eléctrico (volts por metro)

$H$  = intensidad rms del campo magnético (amperes por metro)

Esta expresión también se conoce como el *vector de Poynting*. [12]

Teniendo en cuenta que el vector de *Poynting* hace referencia a la densidad de potencia, la potencia total que cruza una determinada superficie cerrada puede obtenerse mediante la integración de la componente normal del vector de *Poynting* sobre toda la superficie. [12]

$$P = \oiint_S \mathbf{W} \cdot d\mathbf{s} = \oiint_S \mathbf{W} \cdot \hat{\mathbf{n}} \cdot da$$

$P$  = Potencia instantanea ( $W$ )

$\hat{\mathbf{n}}$  = Vector unitario, normal a la superficie

$da$  = Area infinitesimal, de la superficie cerrada ( $\text{m}^2$ )

La intensidad de campo hace referencia a la potencia radiada por la antena por unidad de “ángulo solido” [12]. Dicha intensidad es un parámetro de campo lejano y se puede obtener multiplicando la densidad de la radiación por el cuadrado de la distancia. Matemáticamente se puede expresar como [12]:

$$U = r^2 W_{rad}$$

$U$  = Intensidad de radiacion.

$W_{rad}$  = Densidad de radiacion ( $W/\text{m}^2$ )

La intensidad de radiación también se relaciona con el campo eléctrico de la zona lejana de la antena [12].

$$U(\theta, \phi) = \frac{r^2}{2\eta} |E(r, \theta, \phi)|^2 \cong \frac{r^2}{2\eta} \left[ |E_\theta(r, \theta, \phi)|^2 + |E_\phi(r, \theta, \phi)|^2 \right]$$
$$\frac{1}{2\eta} \left[ |E_\theta(\theta, \phi)|^2 + |E_\phi(\theta, \phi)|^2 \right]$$

$E_\theta(r, \theta, \phi)$  = Zona lejana, Intensidad de campo electrico de la antena.

$E_\theta, E_\phi =$  Zona lejana, compo electrico componentes de la antena.  
 $\eta =$  Impedancia intrinseca del medio.

Entonces el patrón de potencia es una medida de la intensidad de radiación. La potencia total se obtiene integrando la intensidad de radiación [12].

$$P_{rad} = \oiint_{\Omega} U d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} U * \text{sen}\theta * d\theta * d\phi$$

### 5.5.2 Impedancia característica del espacio libre

La impedancia característica de un medio de transmisión sin perdidas equivale a la raíz cuadrada de la relación de su permeabilidad magnética entre su permitividad eléctrica.

Ecuación de la impedancia característica del espacio libre es [10]:

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

$Z_S =$  impedancia carcterística del espacio libre (ohms)

$\mu_0 =$  permeabilidad magnética del epespacio libre;  $1.26 * 10^{-6} H/m$

$\epsilon_0 =$  permitividad eléctrica del espacio libre;  $8.85 * 10^{-12} F/m$

Al sustituir valores en la ecuación:

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

## 5.6 ATENUACION Y ABSORCION DE ONDAS

Cuando las ondas se propagan por el espacio vacío y por la atmosfera terrestre, se dispersan y resulta una reducción de la densidad de potencia, esto se conoce como *atenuación*.

La atmosfera terrestre no es un vacío absoluto, contiene partículas que absorben energía electromagnética y generan pérdida de potencia que se conoce como *perdida por absorción*. [10]

### 5.6.1 Atenuación

A medida que se aleja un frente de onda de la fuente, el campo electromagnético irradiado se dispersa, las ondas se alejan cada vez mas entre sí, entonces la cantidad de ondas por unidad de área es menor. Por este motivo no existe perdida ni disipación de potencia irradiada, la onda solo se extiende y disminuye la *densidad de potencia*, esto se suele llamar *atenuación de la onda* y se expresa en función del logaritmo común de la relación de densidades. [10]

$$\gamma_a = 10 \log \frac{P_1}{P_2}$$

### 5.6.2 Absorción

Cuando una onda electromagnética se propaga a través de la atmosfera terrestre, se transfiere energía de la onda a los átomos y moléculas de los compuestos atmosféricos. Después de absorbida, la energía se pierde para siempre causando atenuación en las intensidades de voltaje y campo magnético, y una reducción de densidad de potencia.

En una atmosfera normal, la absorción de las ondas electromagnéticas depende de su frecuencia, y es insignificante a frecuencias menores a los 10GHz. La absorción no depende de la distancia a la fuente de radiación, sino más bien de la distancia total que la onda se propaga a través de la atmosfera. La lluvia y la neblina, absorben más energía que una atmosfera normal. [10]

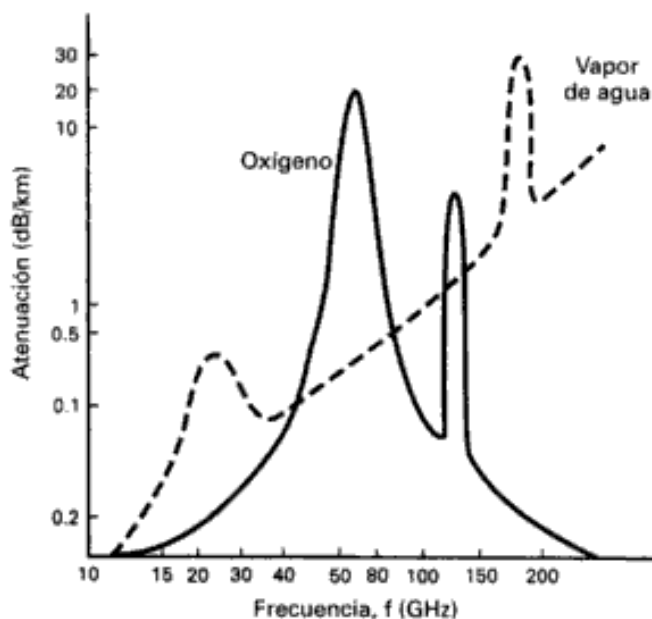


Figura 7: Absorción atmosférica de las ondas electromagnéticas.<sup>7</sup>

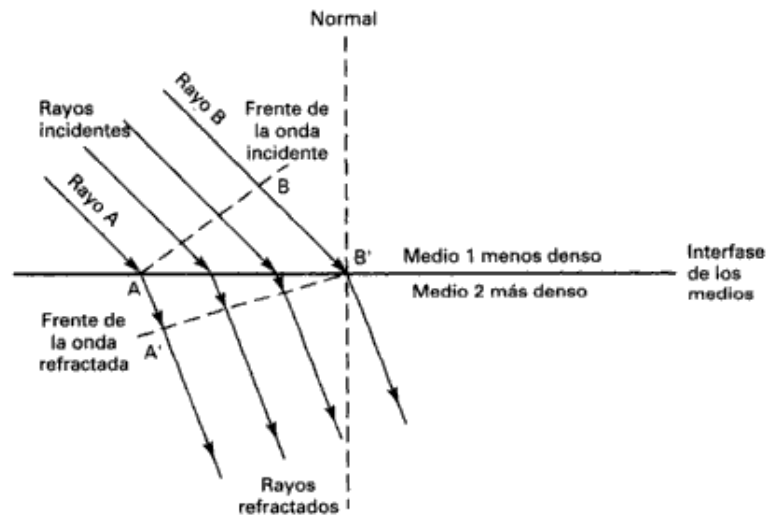
## 5.7 PROPIEDADES ÓPTICAS DE LAS ONDAS DE RADIO

Propiedades como la *refracción*, *reflexión*, *difracción* e *interferencia* se consideran ópticas porque se observaron primero en la ciencia de la óptica, que estudia el comportamiento de las ondas luminosas.

### 5.7.1 Refracción

La *refracción electromagnética* se define como el cambio de dirección que sufren los rayos al pasar en dirección oblicua de un medio a otro con distinta velocidad de propagación. La velocidad de propagación y la densidad del medio son inversamente proporcionales, por esta razón se dice que hay refracción siempre que una onda de radio pasa de un medio a otro con distinta densidad. [10]

<sup>7</sup>Tomado de: Sistemas de Comunicaciones Electrónicas, Wayne Tomasi, Cuarta Edición, Pág. 352.



**Figura 8: Refracción en una frontera plana entre dos medios.<sup>8</sup>**

Cuando un rayo pasa de un medio menos denso a uno más denso, se dobla hacia la normal y cuando pasa de un medio más denso a uno menos denso se dobla alejándose de la normal. Los ángulos que generan estos cambios de dirección se conocen como: *Angulo de incidencia*: el que forman la onda incidente y la normal y el *Angulo de refracción*: el que forman la onda refractada y la normal. [10]

La refracción de una onda electromagnética es predecible y depende del *índice de refracción* de cada material. El *índice de refracción* es la relación de la velocidad de propagación de la luz en el espacio vacío y la velocidad de propagación de la luz en determinado material. [13]

$$n = \frac{c}{v}$$

$n$  = índice de refracción (adimensional)

$c$  = velocidad de la luz en el espacio libre ( $3 \cdot 10^8$  m/s)

$v$  = velocidad de la luz en determinado materia (m/s)

La *ley de Snell* describe el comportamiento de una onda electromagnética cuando llega a la interface entre dos materiales con distintos índices de refracción. [13]

$$n_1 \text{sen} \theta_1 = n_2 \text{sen} \theta_2$$

$$\frac{\text{sen} \theta_1}{\text{sen} \theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

<sup>8</sup> Tomado de: Sistemas de Comunicaciones Electrónicas, Wayne Tomasi, Cuarta Edición, Pág. 353.

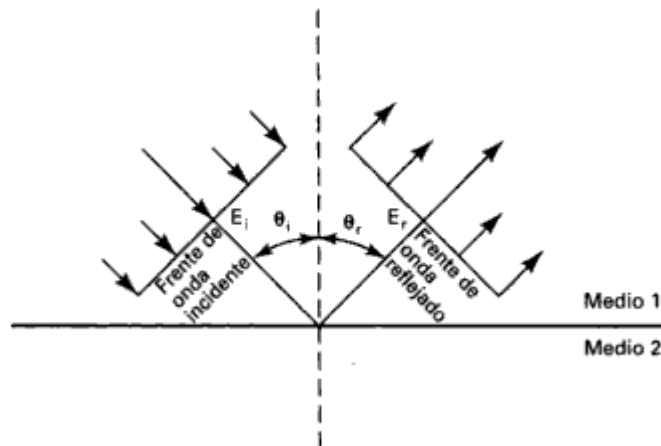
$n_1 = \text{índice de refracción del material 1}$   
 $n_2 = \text{índice de refracción del material 2}$   
 $\theta_1 = \text{ángulo de incidencia (grados)}$   
 $\theta_2 = \text{ángulo de refracción (grados)}$

Y teniendo en cuenta que el índice de refracción de un material es igual a la raíz cuadrada de su constante dieléctrica [13],

$$\frac{\text{sen}\theta_1}{\text{sen}\theta_2} = \sqrt{\frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}}}$$

$\epsilon_{r1} = \text{constante dieléctrica del medio 1}$   
 $\epsilon_{r2} = \text{constante dieléctrica del medio 2}$

### 5.7.2 Reflexión



**Figura 9: Reflexión electromagnética en una frontera plana entre dos medios.**  
9

Cuando una onda se encuentra con una frontera entre dos medios, algo o toda la potencia incidente no entra al segundo medio. Las ondas que no entran se reflejan, y la *reflexión* es el acto de reflejar.

Como todas las ondas reflejadas permanecen en el mismo medio que las ondas incidentes, las velocidades son iguales y se puede observar que el *ángulo de reflexión* es igual al *ángulo de incidencia*  $\theta_i = \theta_r$ . En cambio las intensidades de los campos de voltajes si difieren, la intensidad del campo de voltaje reflejado

<sup>9</sup> Tomado de: Sistemas de Comunicaciones Electrónicas, Wayne Tomasi, Cuarta Edición, Pág. 355.

es menor que la del campo incidente. La relación entre estas intensidades de voltajes se llama *coeficiente de reflexión*,  $\Gamma$ . Para un conductor perfecto  $\Gamma = 1$ . [10]

$$\Gamma = \frac{E_r e^{j\theta_r}}{E_i e^{j\theta_i}} = \frac{E_r}{E_i} = e^{j(\theta_r - \theta_i)}$$

$\Gamma$  = *coeficiente de reflexión (adimensional)*

$E_i$  = *intensidad de voltaje incidente (volts)*

$E_r$  = *intensidad de voltaje reflejado (volts)*

$\theta_i$  = *fase incidente (grados)*

$\theta_r$  = *fase reflejada (grados)*

La parte de la potencia incidente total que no es reflejada se llama *coeficiente de transmisión de potencia*,  $T$ . En los conductores perfectos,  $T=0$ . Teniendo en cuenta la ley de la conservación de la energía, la potencia total reflejada debe ser igual a la potencia total incidente.

$$T + \Gamma^2 = 1$$

En conductores no ideales,  $T$  y  $\Gamma^2$  son funciones del ángulo de incidencia, la polarización del campo eléctrico y las constantes dieléctricas de los materiales.

En superficies *irregulares* o *ásperas*, el frente de onda incidente se destruye y los rayos se dispersan al azar en muchas direcciones, esa condición se conoce como *reflexión difusa*. A las reflexiones en superficies completamente lisas se les llama *reflexión especular* (de espejo). Las superficies que están entre lisas e irregulares se conocen como *superficies semiásperas*, y los choques de los frentes de onda en estas superficies causan una mezcla de *reflexión difusa* y *especular*.

Según el *criterio de Rayleigh*, una superficie semiáspera refleja como si fuera una superficie lisa siempre y cuando se cumpla la siguiente afirmación, [10]

$$\cos\theta_i = \frac{\lambda}{8d}$$

$\theta_i$  = *ángulo de incidencia*

$\lambda$  = *longitud de la onda incidente*

$d$  = *profundidad de la irregularidad de la superficie*



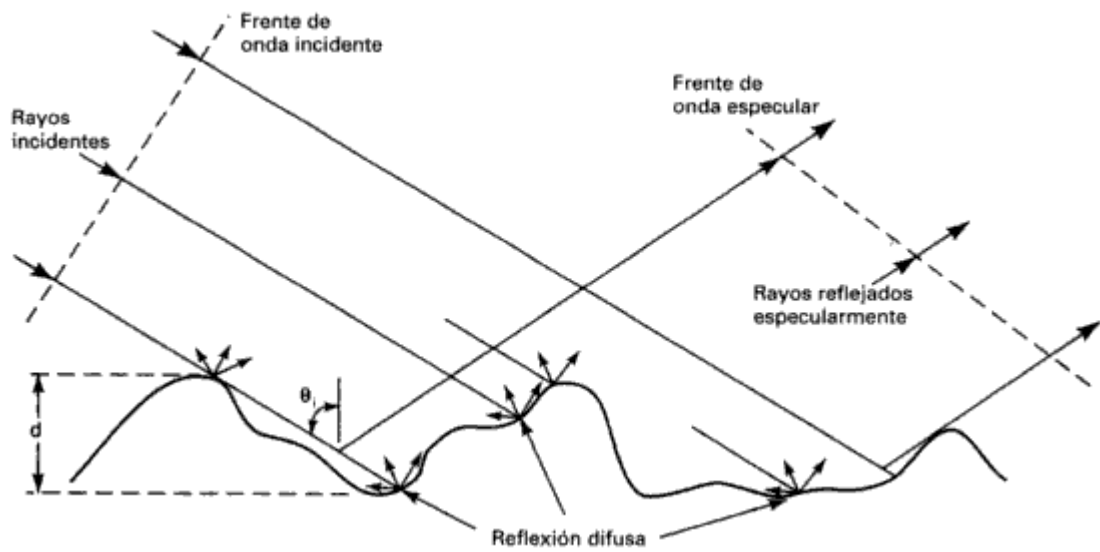


Figura 10: Reflexión en superficie semiáspera.<sup>10</sup>

### 5.7.3 DIFRACCIÓN

La *difracción* es la redistribución de la energía dentro de un frente de onda, y es lo que permite que las ondas luminosas o de radio se propaguen en torno a esquinas o bordes. El principio de *Huygens* [14] establece, para este fenómeno, que todo punto sobre determinado frente de onda esférico se puede considerar como una onda puntual secundaria de ondas electromagnéticas, las cuales irradian otras ondas secundarias. [10]

<sup>10</sup> Tomado de: Sistemas de Comunicaciones Electrónicas, Wayne Tomasi, Cuarta Edición, Pág. 356.

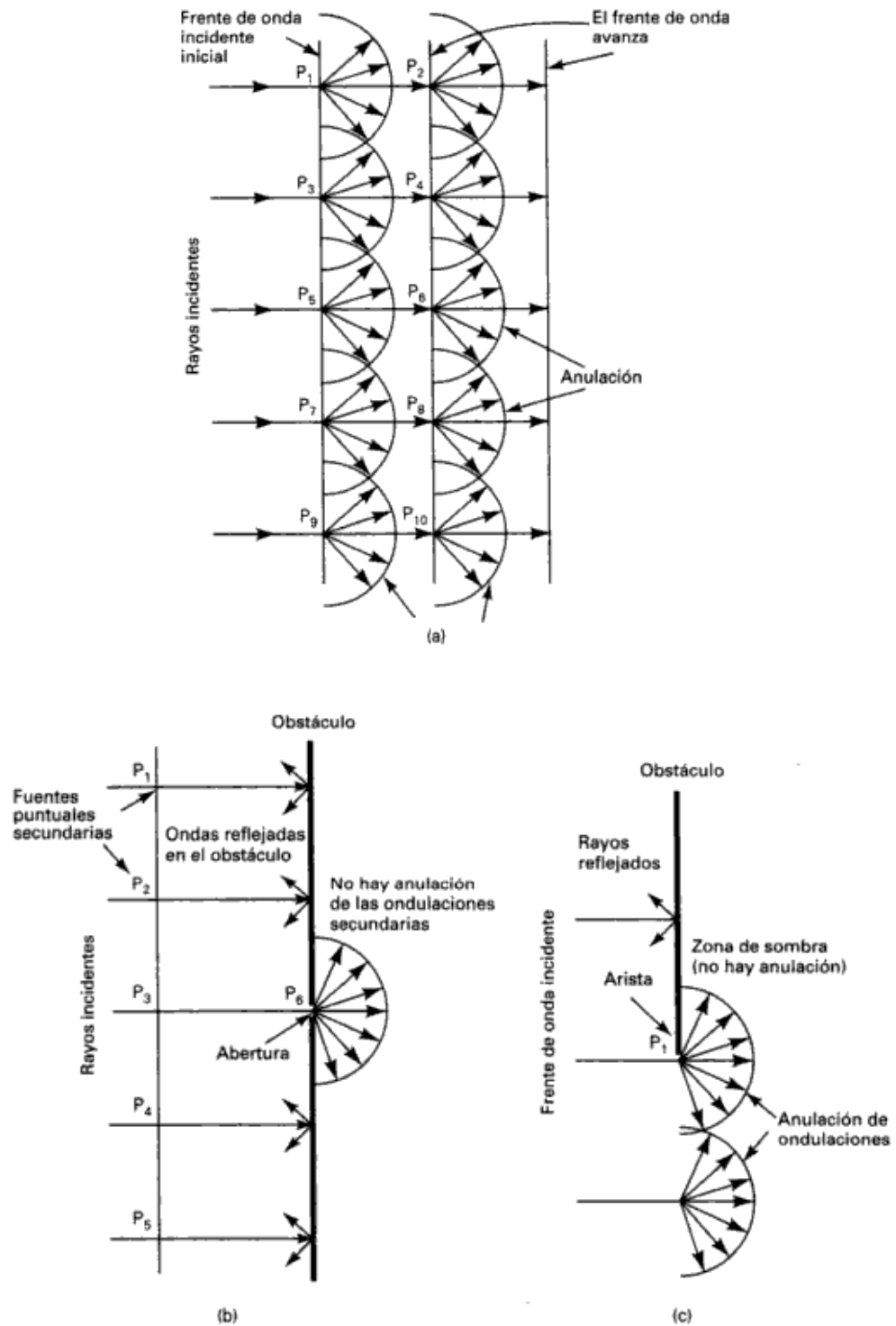


Figura 11: Difracción de ondas electromagnéticas: {a} principio de Huygens

para un frente de onda plano; {b} frente de una onda finita a través de una abertura; {c} frente de onda rodeando una arista.<sup>11</sup>

#### 5.7.4 Interferencia

La interferencia se produce siempre que se combinan dos o más ondas electromagnéticas afectando el funcionamiento del sistema, y está sujeta al principio de la *superposición lineal* de las ondas electromagnéticas.

Según el principio de *superposición lineal*, la intensidad de voltaje en un punto dado en el espacio es la suma de los vectores de onda individuales. En la atmosfera terrestre es válido aplicar el principio de *superposición lineal*. [10]

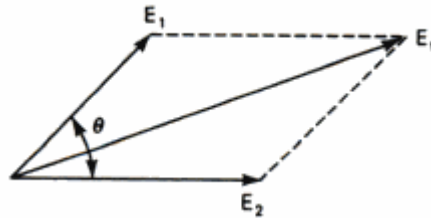


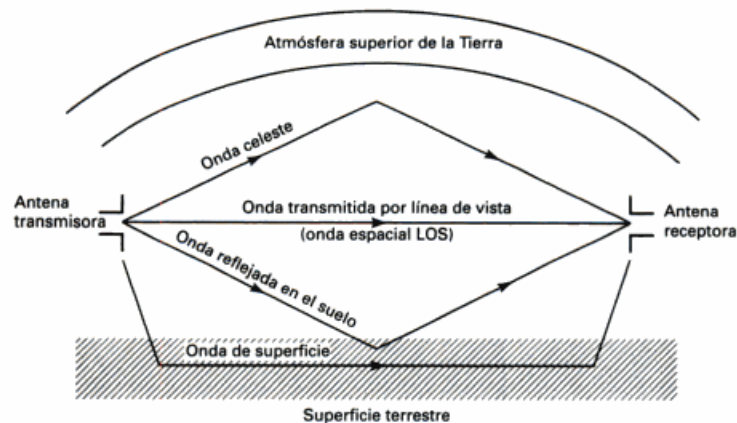
Figura 12: Suma lineal de dos vectores con distintos ángulos de fase.<sup>12</sup>

### 5.8 PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Hay tres formas básicas de propagación de las ondas electromagnéticas dentro de la atmosfera terrestre: ondas terrestres, ondas espaciales (ondas directas y reflejadas en el suelo) y ondas celestes o ionosféricas. Normalmente en todos los sistemas de radio existen los tres modos, en algunos casos se puede despreciar alguno de los modos según los intervalos de frecuencia o las características del terreno. En las ondas terrestres, las perdidas en el suelo aumentan al aumentar la frecuencia, las ondas celestes se usan para aplicaciones de alta frecuencia y las espaciales para frecuencias muy elevadas. [14]

<sup>11</sup> Tomado de: Sistemas de Comunicaciones Electrónicas, Wayne Tomasi, Cuarta Edición, Pág. 358.

<sup>12</sup> Tomado de: Sistemas de Comunicaciones Electrónicas, Wayne Tomasi, Cuarta Edición, Pág. 359.



**Figura 13: Modos de propagación de ondas.** <sup>11</sup>

### 5.8.1 Ondas terrestres

Son las ondas electromagnéticas que viajan por la superficie de la tierra. Estas ondas deben estar polarizadas verticalmente, de no ser así las ondas se ponen en corto por la conductividad del suelo.

Las ondas terrestres se atenúan a medida que se propagan debido a pérdidas por resistencia y por dieléctrico inducidas por la superficie terrestre. Hay menos pérdidas, o la propagación es mejor, sobre agua salada y las superficies desérticas generan muchas pérdidas. A mayor frecuencia mayores pérdidas. [10]

La atmósfera terrestre posee un *gradiente de densidad* que disminuye en forma gradual conforme aumenta la distancia a la superficie de la Tierra. Esto es lo que hace que las ondas terrestres se propaguen cerca a la superficie de la Tierra, por que se van inclinando en forma progresiva hacia adelante. La frecuencia de propagación y el terreno pueden causar una “caída” de plano sobre el suelo e interrumpir la propagación.

### 5.8.2 Ondas espaciales

Las ondas espaciales incluyen ondas directas y reflejadas que viajan kilómetros inferiores de la atmósfera terrestre. Las ondas directas son las que viajan en línea recta entre las antenas de transmisión y recepción, esto se llama *transmisión por línea de vista* (LOS, line of sight). Las ondas reflejadas son las que refleja la superficie terrestre durante la propagación entre las antenas. [10]

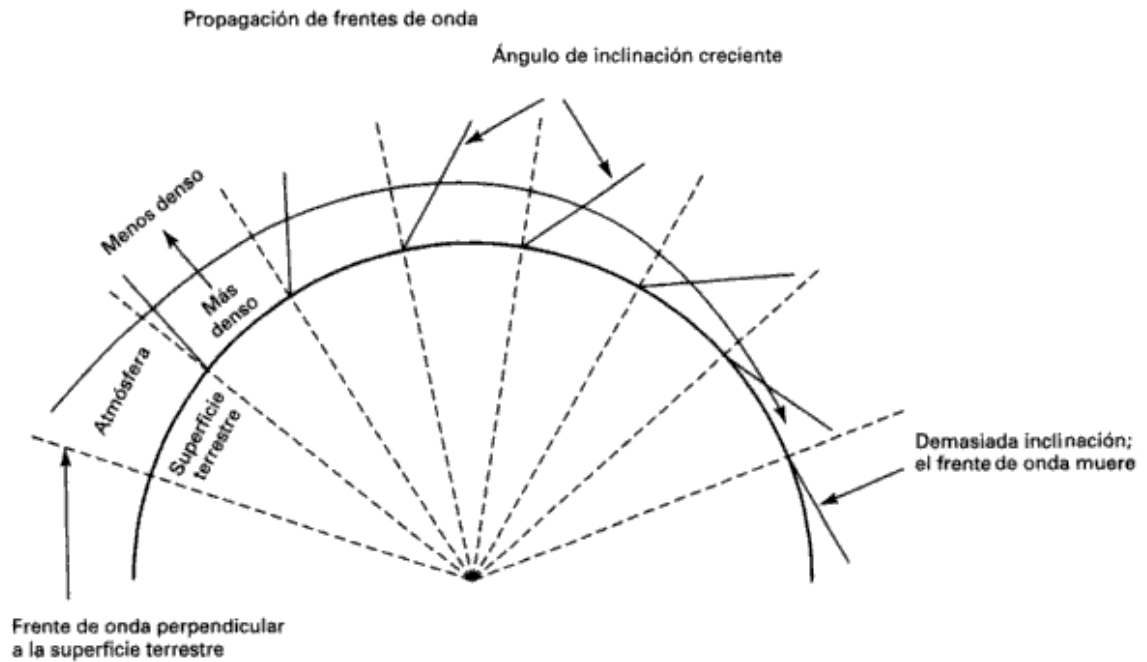


Figura 14: Propagación de ondas terrestres.<sup>13</sup>

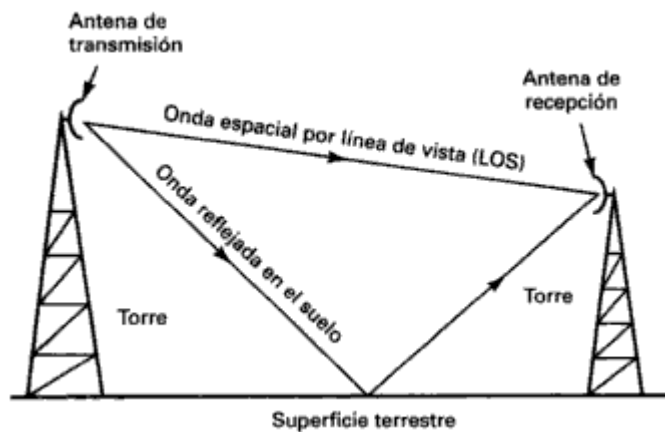
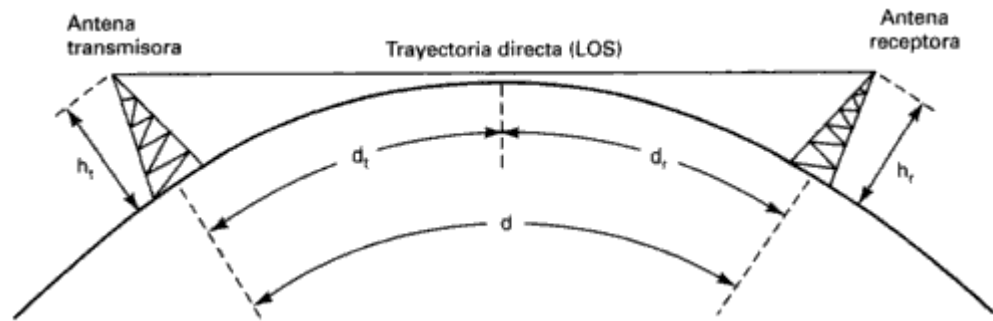


Figura 15: Propagación de ondas espaciales.<sup>14</sup>

La propagación de las ondas espaciales está limitada por la curvatura de la tierra, que se suele llamar *horizonte de radio*. El *horizonte de radio* se puede ampliar modificando la altura de las antenas transmisora y receptora, usando torres, montañas o edificios altos. [10]

<sup>13</sup> Tomado de: Sistemas de Comunicaciones Electrónicas, Wayne Tomasi, Cuarta Edición, Pág. 360.

<sup>14</sup> Tomado de: Sistemas de Comunicaciones Electrónicas, Wayne Tomasi, Cuarta Edición, Pág. 361.



**Figura 16: Horizonte de radio.**<sup>15</sup>

El horizonte visual de una sola antena es [10]

:

$$d = \sqrt{2} * h$$

$d =$  distancia al horizonte de radio (millas)

$h =$  altura de la antena sobre el nivel del mar (millas)

La distancia máxima entre antena transmisora y receptora: [10]

$$d = d_t + d_r$$

$$d = \sqrt{2} * h_t + \sqrt{2} * h_r$$

$d =$  distancia total (millas)

$d_t =$  horizonte de radio de la antena transmisora (millas)

$d_r =$  horizonte de radio de la antena receptora (millas)

$h_t =$  altura de la antena transmisora (pies)

$h_r =$  altura de la antena receptora (pies)

En unidades métricas: [10]

$$d(\text{máx}) = 17h_t + 17h_r$$

$d(\text{máx}) =$  distancia máxima entre el transmisor y el receptor (kilómetros)

$h_t =$  altura de la antena transmisora (metros)

$h_r =$  altura de la antena receptora (metros)

<sup>15</sup> Tomado de: Sistemas de Comunicaciones Electrónicas, Wayne Tomasi, Cuarta Edición, Pág. 362.

### 5.8.3 Ondas celestes

Las ondas que se dirigen sobre el horizonte y forman un ángulo relativamente grande con la Tierra se llaman *ondas celestes*. Estas ondas son reflejadas o refractadas por la ionosfera hacia la superficie terrestre.

La ionosfera está conformada por tres capas que afecta de diferentes formas las ondas electromagnéticas. [10]

**Capa D:** es la capa inferior de la ionosfera y tiene poco efecto sobre la dirección de propagación de las ondas de radio. A pesar de esto, los iones de esta capa absorben cantidades apreciables de energía electromagnética, reflejan las ondas de VLF y LF, y absorben las ondas de MF y HF. [10]

**Capa E:** esta capa facilita la propagación de ondas superficiales de MF y refleja las ondas HF. [10]

**Capa F:** esta capa refleja la mayoría de las ondas hacia la Tierra, absorbe y atenúa algunas ondas de HF. [10]

### 5.9 PÉRDIDAS EN EL ESPACIO LIBRE

Estas pérdidas, en realidad son una disminución en la densidad de potencia ocasionada por la separación de las ondas electromagnéticas mientras se alejan de la fuente, por esta razón son mejor conocidas como *pérdidas por dispersión*. [15]

$$L_p = \left(\frac{4\pi D}{\lambda}\right)^2 = \left(\frac{4\pi D f}{c}\right)^2$$

$L_p$  = pérdida en trayectoria por el espacio libre (adimensional)

$D$  = distancia (kilómetros)

$f$  = frecuencia (hertz)

$\lambda$  = longitud de onda (metros)

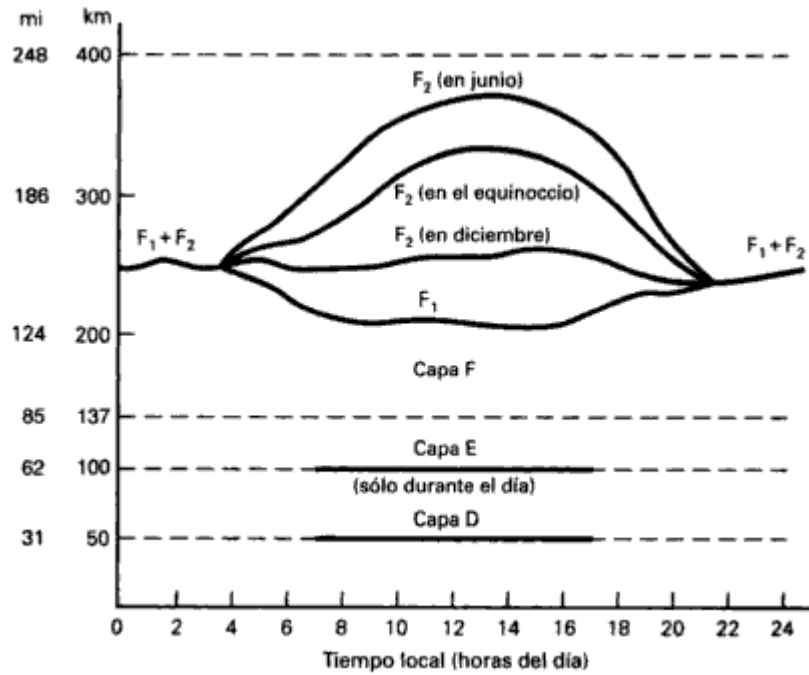
$c$  = velocidad de la luz en el espacio libre ( $3 * 10^8$  metros por segundo)

En decibeles [15],

$$L_{p(dB)} = 20 \log * \frac{4\pi f D}{c} = 20 \log * \frac{4\pi}{c} + 20 \log * f + 20 \log * D$$







**Figura 17: Capas ionosféricas.**<sup>16</sup>

Para frecuencia en MHz y distancia en Km [15],

$$L_{p(dB)} = 20 \log * \frac{4\pi(10)^6(10)^3}{3 * 10^8} + 20 \log * f_{MHz} + 20 \log * D_{km}$$

Para frecuencia en GHz y distancia en Km [15],

$$L_{p(dB)} = 32.44 + 20 \log * f_{GHz} + 20 \log * D_{km}$$

De igual forma se pueden hacer conversiones, cuando la distancia esta expresada en diferentes unidades.

### 5.9.1 Margen de desvanecimiento

Los diferentes fenómenos que ocurren constantemente en la atmosfera terrestres generan efectos, de largo y corto plazo, en las señales electromagnéticas que se propagan por el espacio libre. A estas variaciones en la intensidad de la señal se

<sup>16</sup> Tomado de: Sistemas de Comunicaciones Electrónicas, Wayne Tomasi, Cuarta Edición, Pág. 363.

le conoce como *desvanecimiento* y se le atribuye principalmente a perturbaciones meteorológicas, trayectorias múltiples y superficies terrestres irregulares.

Según las ecuaciones de confiabilidad de *Barnett-Vignant* para una disponibilidad anual especificada se tiene: [15]

$$F_m = 30 \log D + 10 \log(6ABf) - 10 \log(1 - R) - 70$$

Efecto de trayectoria múltiple	Sensibilidad del terreno	Objetivos de confiabilidad	Constante
--------------------------------------	--------------------------------	----------------------------------	-----------

$F_m$  = *margen de desvanecimiento (decibeles)*

$D$  = *distancia (Kilómetros)*

$f$  = *frecuencia (gigahertz)*

$R$  = *confiabilidad en tanto por uno (es decir, 99.99% = 0.9999 de confiabilidad)*

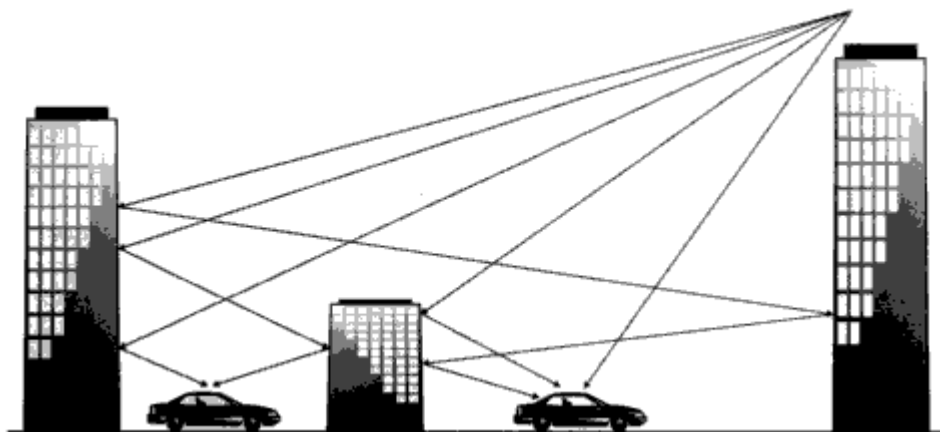
$1 - R$  = *objetivo de confiabilidad para una ruta de 400 km en un sentido*

$A$  = *factor de rugosidad*

$B$  = *factor para convertir la peor probabilidad mensual en un año*

## 5.10 PROPAGACIÓN EN UN AMBIENTE MÓVIL Y PORTÁTIL

En las comunicaciones móviles el transmisor, el receptor o ambos están en movimiento constante y por lo tanto el ambiente *multitrayectoria* es algo típico. Además abundan múltiples reflexiones generadas por diferentes tipos de obstáculos, y en ocasiones estas ondas reflejadas son las que permiten establecer comunicaciones donde de otro modo sería imposible. [16]

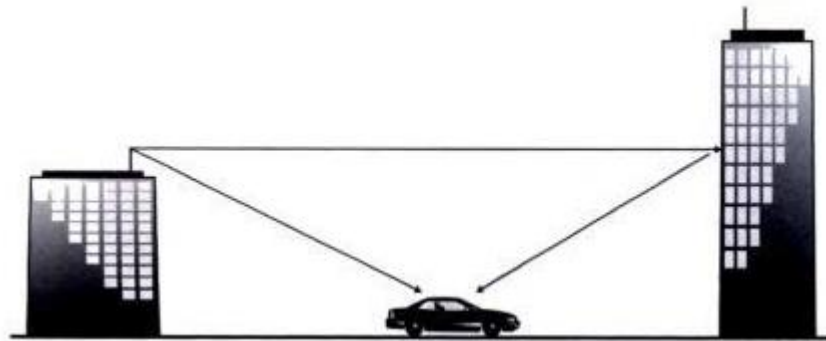


**Figura 18: Multitrayectoria en un ambiente móvil.**<sup>17</sup>

<sup>17</sup> Tomado de: Sistemas Electrónicos de Comunicaciones, Roy Blake, Segunda Edición, Pág. 542.

La pérdida de trayectoria aumenta con la frecuencia; en el extremo de bajas frecuencias del intervalo de VHF, sólo los objetos muy grandes causan reflexiones. Cuando se incrementa la frecuencia, disminuye la longitud de onda y objetos relativamente pequeños también reflejan la señal. [16]

Por esta razón es difícil modelar la propagación terrestre en un ambiente móvil, existen muchos modelos que combinan la teoría con resultados reales y se usan como guía para hacer estudios en diferentes áreas, como terreno plano abierto, montañoso, zonas urbanas, etc. Un computador y algún software especializado también ayudan a que estos modelos resulten mucho más aproximados. [16]



**Figura 19: Desvanecimiento rápido.**<sup>18</sup>

El *desvanecimiento rápido* es otro problema de las comunicaciones móviles. Si un receptor móvil se aleja de la antena transmisora y se dirige directamente hacia una superficie reflexiva, en un momento dado si las señales están en fase se suman, pero si se desfasan puede llegar a cancelarse la señal si el ángulo de desfase alcanza los 180°, lo más probable es que la cancelación de la señal no sea completa pero si puede ser bastante significativa. [16]

El tiempo entre desvanecimientos es, [16]

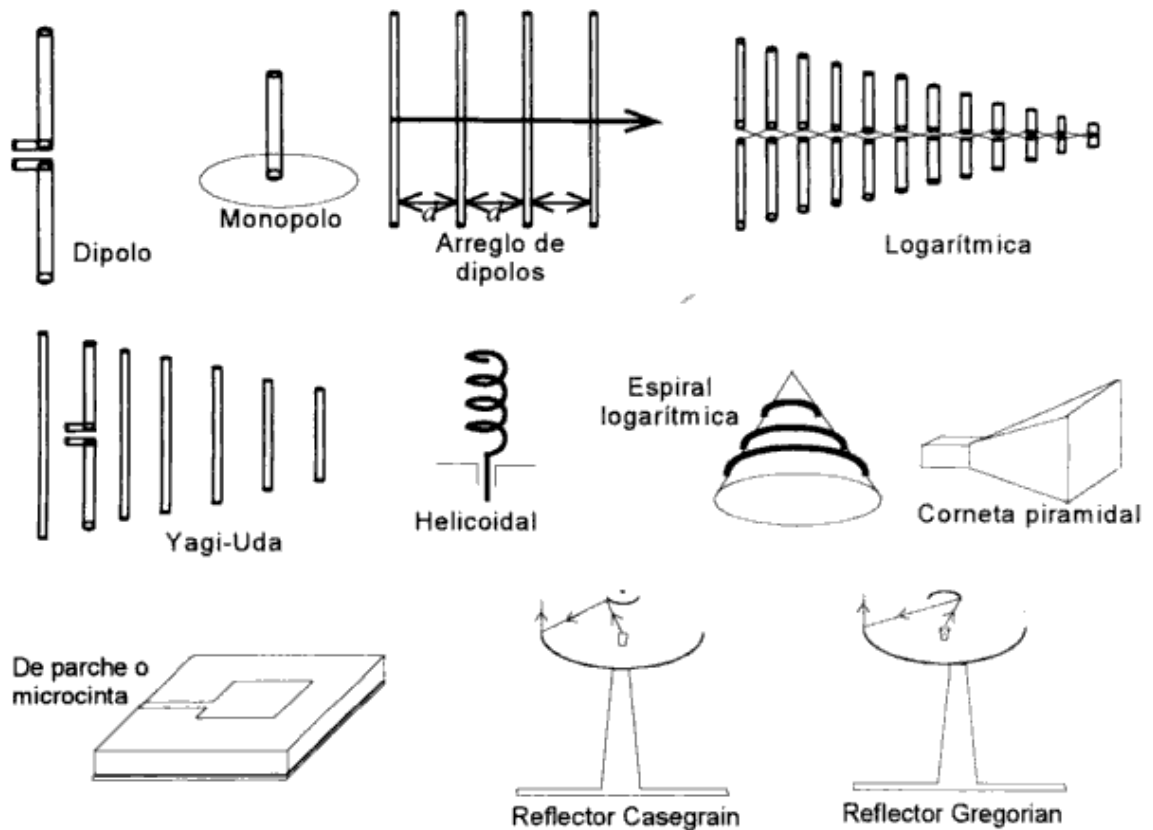
$$t = \frac{\lambda/2}{v} = \frac{\lambda}{2v} = \frac{c}{2fv}$$

## 5.11 ANTENAS

Cualquier conductor de dimensiones comparables con la longitud de onda de una señal, puede funcionar como una antena. Pero en esencia una antena es un transductor de energía electromagnética a corriente eléctrica y viceversa, las

<sup>18</sup> Tomado de: Sistemas Electrónicos de Comunicaciones, Roy Blake, Segunda Edición, Pág. 545.

ondas que se propagan por el espacio libre se encuentran con la antena y resuenan en el conductor, de características apropiadas, produciendo una distribución de corriente en el conductor que puede ser recolectada por la antena. Una antena receptora puede encontrar toda clase de señales, pero solo aquellas cuya longitud de onda coincida con las dimensiones de la antena, la harán resonar. Entonces el diseño del equipo de recepción y transmisión debe adaptarse tanto a la frecuencia como a la técnica de modulación con que sea enviada la información. [17]



**Figura 20: Algunos tipos de antenas.**<sup>19</sup>

En la actualidad existen una gran variedad de antenas y hablar de cada una de ellas resultaría muy difícil, sin embargo se puede hacer una clasificación básica según su radiación y geometría. [17]

<sup>19</sup> Tomado de: Antenas: Principios básicos, análisis y diseño; José Hernández Rueda, Universidad Autónoma de Baja California, Pág. 14.

SEGÚN SU RADIACION	SEGÚN SU GEOMETRIA
Antenas omnidireccionales	Antenas delgadas
Antenas direccionales	Antenas de abertura
Antenas independientes de frecuencia	Antenas autodefinidas
Antenas electrónicamente direccionables y adaptativas (inteligentes)	Antenas planares
	Antenas cuasi-ópticas

**Tabla 2: Clasificación de las antenas.**

El uso de determinada antena depende de las características de propagación electromagnética y de las necesidades de la aplicación. Por ejemplo, en aplicaciones marítimas, donde se requieren frecuencias (en el rango de 30Hz – 3MHz) que reboten en la atmósfera, se usan dipolos omnidireccionales en la embarcación y en tierra antenas Yagi-Uda, que ofrecen mediana directividad, para transmitir la mayor cantidad de energía en dirección del mar. En comunicaciones satelitales son mas usados los reflectores parabólicos, las antenas helicoidales o los arreglos de antenas de parche. [17]

FRECUENCIA							
Muy Baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta	Ultra Alta	Microondas	Ondas milimétricas
VLF	LF	MF	HF	VHF	UHF		
30Hz-30KHz	30-300KHz	300KHz-3MHz	3-30MHz	30-300MHz	300MHz-1GHz	1-30GHz	30-100GHz
$\lambda=(10000-100000m)$	$\lambda=(1000-10000m)$	$\lambda=(100-1000m)$	$\lambda=(10-100m)$	$\lambda=(1-10m)$	$\lambda=(1m)$	$\lambda=(1-10cm)$	$\lambda=(0,1-1cm)$
Antena Monopolo				Corneta			
Dipolos electricos, magneticos y arreglos				Logaritmicas			
Yagi-Uda				Parabolicas			
				Microcintas			
				Espirales			
				Helicoidales			
USOS							
Militar y marítimo	Militar y marítimo	Marítimo y radiodifusión de AM	Todos los servicios	Radiodifusión y telecomunicaciones móviles, enlaces punto a punto	Telecomunicaciones móviles, radioenlaces, satélites	Radioenlaces de microondas de banda ancha	Sistemas de guía de onda

**Tabla 3: Frecuencias, usos y tipos de antenas.**<sup>20</sup>

<sup>20</sup> Tomado de: Antenas: Principios básicos, análisis y diseño; José Hernández Rueda, Universidad Autónoma de Baja California, Pág. 15.

### 5.11.1 principio de operación de las antenas

Para explicar el principio de operación de las antenas, comúnmente se usa el siguiente modelo: se considera una fuente de voltaje sinusoidal conectada a una línea de transmisión bifilar, donde se crea un campo eléctrico entre los dos conductores. Las líneas de campo tienden a actuar sobre los electrones libres, cedidos por el conductor, forzándolos a desplazarse. Este movimiento crea un campo magnético  $H$  alrededor de cada conductor. La variación en el tiempo de campos eléctricos y magnéticos, forman ondas electromagnéticas que viajan a lo largo de la línea de transmisión. Si se separan los conductores de la línea bifilar, las ondas electromagnéticas conectan los extremos abiertos de los conductores eléctricos formando ciclos cerrados que tienden a propagarse con la velocidad de la luz en el espacio libre.

Si la excitación sobre el sistema es periódica, la onda en el espacio libre será también periódica y seguirá a las ondas que se propagaron antes. Cuando las ondas electromagnéticas llegan a una antena receptora, el campo electromagnético produce un movimiento en las cargas del conductor y una corriente en los terminales de la antena. [17]

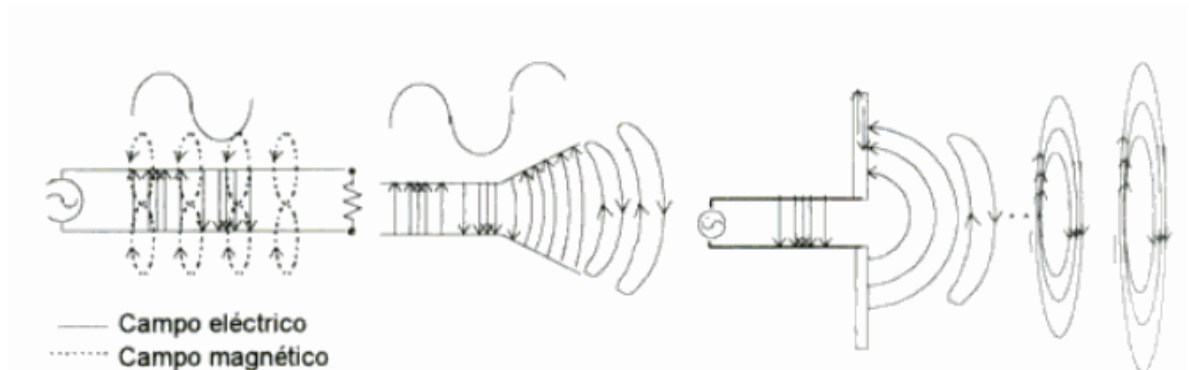


Figura 21: Mecanismo de radiación.<sup>21</sup>

### 5.11.2 Parámetros de antenas

Las antenas son conductores de dimensiones convenientes, de diversas formas y con una serie de parámetros propios de sus características.

<sup>21</sup> Tomado de: Antenas: Principios básicos, análisis y diseño; José Hernández Rueda, Universidad Autónoma de Baja California, Pág. 20.

## A. Impedancia Característica

Este parámetro, que se representa como  $Z_o$ , depende de la relación longitud/diámetro del conductor y de la frecuencia de trabajo. La  $Z_o$  varía a lo largo del conductor porque es función de su distancia al punto de alimentación de la antena. Por esta razón se puede hablar de la  $Z_o$  correspondiente a un punto determinado o al valor medio de la misma. [17]

La impedancia característica de un punto cualquiera de un dipolo delgado es: [17]

$$Z_o = 120 \ln \left( \frac{2r}{a} \right)$$

$r =$  distancia del punto considerado al punto de alimentación del dipolo.  
 $a =$  radio del conductor.

La  $Z_o$  media de un dipolo, viene dada aproximadamente por: [17]

$$Z_o = 120 \left[ \ln \left( \frac{2H}{a} \right) - 1 \right]$$

$H =$  longitud del dipolo  
 $a =$  radio del conductor

Las siguientes expresiones arrojan resultados más próximos a los reales, [17]

*Monopolo,*

$$Z_o = 60 \left( \ln \frac{H_o}{a} - 1 - \frac{1}{2} \ln \frac{2H_o}{\lambda} \right)$$

*Dipolo,*

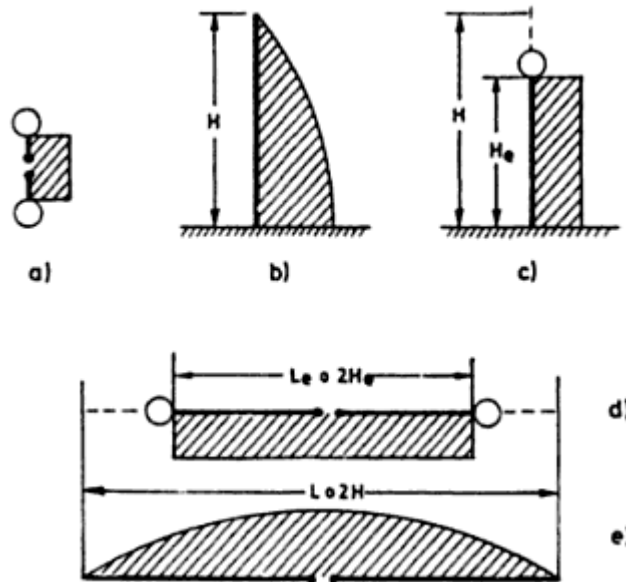
$$Z_o = 120 \left( \ln \frac{H_o}{a} - 1 - \frac{1}{2} \ln \frac{2H_o}{\lambda} \right)$$

$H_o =$  longitud o altura física del dipolo o monopolo  
 $a =$  radio del conductor  
 $\lambda =$  longitud de onda

## B. Altura o longitud efectiva

En una antena se observa que la distribución de corriente es uniforme a lo largo de ella. Si se corta la longitud de una antena, de tal forma que se logre una distribución uniforme de corriente y que la energía radiada sea la misma que sin acortarla, esta longitud acortada se conoce como *longitud efectiva*.

En resumen, si acortamos una antena a su longitud o altura efectiva, conseguiremos los mismos resultados que con su longitud original. [17]



**Figura 22: a) Antena Hertz, b) y c) Monopolo y su correspondiente altura efectiva, d) y e) Dipolo y su correspondiente longitud efectiva.<sup>22</sup>**

*Monopolo*, [17]

$$H_e = \frac{tg \frac{\beta H_o}{2}}{\beta}$$

*Dipolo*, [17]

$$L_e = \frac{2tg \frac{\beta H_o}{2}}{\beta}$$

<sup>22</sup> Tomado de: Antenas: Principios básicos, análisis y diseño; José Hernández Rueda, Universidad Autónoma de Baja California, Pág. 21.



$H_o = \text{longitud o altura física del dipolo o monopolo (metros)}$

$\beta = \text{Constante de fase}$

### C. Constante de fase

Es un ángulo unidad, de valor  $2\pi/\lambda$  radianes. Son los radianes que corresponden a cada metro de longitud de onda. [17]

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \text{radianes}$$

### D. Longitud eléctrica

Teóricamente en un dipolo de media onda o Monopolo de cuarto de onda, la distribución de corriente en los extremos alejados del punto de alimentación es cero. Experimentalmente, esto no es así, los nulos o nodos de corriente están en longitudes físicas más largas [18]. Este fenómeno se conoce como *efecto terminal* y se debe al aumento de la *Inductancia* y una disminución de la *Capacitancia* en las proximidades de los extremos, dando lugar a una disminución de la  $Z_o$  puntual y a un aumento de corriente en esa *zona terminal*. [17]

La razón del acortamiento ( $H = \text{longitud eléctrica}/H_o = \text{longitud física}$ ) es función de la longitud de onda y de la impedancia característica.

La longitud eléctrica de una antena es aproximadamente un 5% más larga [18] que la longitud física. [18]

$$H = H_o * 1.05$$

### E. Factor de atenuación

Este coeficiente determina la pérdida de energía en cada punto de la antena. Es función de su longitud, resistencia de radiación e impedancia característica. Su unidad es el neper. [18]

$$\alpha = \frac{R_r}{H * Z_o} \text{ nepers}$$

$R_r = \text{resistencia de radiación}$

$H = \text{altura o longitud eléctrica (metros)}$

La atenuación total de una antena Dipolo o Monopolo,

$$\alpha * H = \frac{R_r}{Z_o} \text{ nepers}$$

#### F. Resistencia de radiación

Este parámetro determina la capacidad que tiene la antena de disipar la energía que recibe del generador, radiándola al espacio. Su valor en ohmios equivale a una resistencia física que disipa la misma energía que radia la antena, cuando por las dos circula una corriente de igual intensidad.

La resistencia de radiación es función de la longitud del conductor y de la frecuencia de trabajo. [18]

$$R_r = 30[(2 + 2\cos(b)) * S_1(b) - \cos(b) * S_1(2b) - 2\text{sen}(b)S_i(b) + \text{sen}(b)S_i(2b)]$$

$$b = 2\beta H$$

$$S_1(x) = \frac{x^2}{2 * 2!} - \frac{x^4}{4 * 4!} + \frac{x^6}{6 * 6!} - \frac{x^8}{8 * 8!} + \dots$$

$$S_i(x) = x - \frac{x^3}{3 * 3!} + \frac{x^5}{5 * 5!} - \frac{x^7}{7 * 7!} + \dots$$

Estas dos últimas expresiones son generales siendo x cualquier número.

Cuatro términos son suficientes para una aproximación aceptable.

#### G. Inductancia y Capacitancia

Ambos valores son intrínsecos del conductor y su valor depende de  $Z_o$  y de la frecuencia de trabajo. [18]

#### H. Ancho de banda y Q

Estos parámetros son función de  $Z_o$  y de la resistencia de radiación. Determina la variación de frecuencia, respecto a la de trabajo, permitida por la antena para que esta tenga un rendimiento aceptable. [18]

$$Q_a = \frac{\pi * Z_o}{4 * R_r}$$

El ancho de banda se puede calcular dividiendo la frecuencia de resonancia de la antena por el Q.

#### I. Reactancia

La reactancia es la suma vectorial de la inductancia y la capacitancia de la antena. Es función de la longitud del conductor, el radio del mismo y la longitud de onda de la frecuencia de trabajo. [18]

#### J. Impedancia de entrada

Es la impedancia que presenta la antena en su punto de alimentación y es necesario conocerla para conseguir un correcto acoplamiento con la impedancia del generador. Es un valor complejo, compuesto de una parte real (resistencia de entrada) y una parte imaginaria (reactancia de entrada). [18]

Entonces la parte real se determina por [18],

$$R_c = Z_o \left( \frac{\text{sen}(h)(2\alpha H)}{\cos(h)(2\alpha H) - \cos(2\beta H)} \right)$$

Esta  $R_c$  corresponde a la resistencia de radiación referida al punto de alimentación de la antena. La parte compleja de la impedancia de entrada, la reactancia de entrada, se determina por [18],

$$X_c = Z_o \left( \frac{-\text{sen}(2\beta H)}{\cos(h)(2\alpha H) - \cos(2\beta H)} \right)$$

$\alpha H =$  es la atenuación en nepers.

Cuando  $X_c$  es negativo, la reactancia es capacitiva. En caso contrario es inductiva. La impedancia de entrada es [18]

$$Z_e = \sqrt{R_c^2 + X_c^2}$$

Directamente [18],

$$Z_e = Z_o \frac{\sqrt{\sin^2(h^2)(2\alpha H) + \sin^2(2\beta H)}}{\cos(h)(2\alpha H) - \cos(2\beta H)}$$

## K. Directividad

La directividad ( $D$ ) de una antena es su ganancia directiva en la dirección de radiación máxima ( $G_{dm\acute{a}x}$ ). Estos valores son función de la potencia media radiada. Cuando son función de la potencia total de entrada a la antena, el resultado es la *ganancia en potencia* ( $G_p$ ). [18]

La intensidad de radiación promedio es igual a la energía total radiada por la antena dividida en  $4\pi$ . [12]

$$D = \frac{U}{U_o} = \frac{4\pi U}{P_{rad}}$$

Si la dirección no se especifica, se asume la dirección de máxima intensidad de radiación (*máxima directividad*) expresada como [12],

$$D_{max} = D_o = \frac{U_{max}}{U_o} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}}$$

$D$  = Directividad (adimensional)

$D_o$  = Directividad maxima (adimensional)

$U$  = Intensidad de radiacion (W/Unidad de angulo solido)

$U_{max}$  = Maxima intensidad de radiacion (W/Unidad de angulo solido)

$U_o$  = Intensidad de radiacion de fuente isotropica (W/Unidad de angulo solido)

$P_{rad}$  = Potencia total radiada (W)

Para antenas con componentes de polarización ortogonal, se define “la *directividad parcial de una antena para una polarización dada en una dirección dada*” como “una parte de la intensidad de radiación correspondiente a una polarización dada dividida por el total de la intensidad de radiación en todas las direcciones”. [12] Entonces, “la *directividad total es la suma de las directividades parciales para cualquiera de las polarizaciones ortogonales*” [12]. Para coordenadas esféricas la directividad total es [12],

$$D_o = D_\theta + D_\phi$$

$$D_\theta = \frac{4\pi U_\theta}{(P_{rad})_\theta + (P_{rad})_\phi}$$

$$D_{\phi} = \frac{4\pi U_{\phi}}{(P_{rad})_{\theta} + (P_{rad})_{\phi}}$$

$U_{\theta,\phi}$  = Intesidad de radiacion en una direccion dada  
(en componente de campo  $\theta$  ó  $\phi$ )

$P_{(rad)\theta,\phi}$  = Potencia radiada en todas las direcciones  
(en componente de campo  $\theta$  ó  $\phi$ )

En un caso ideal, si toda la potencia de entrada es radiada, la ganancia directiva es igual a la ganancia en potencia y el rendimiento de la antena será de 100%.

La ganancia directiva máxima de un dipolo, para una potencia radiada de 1 vatio, en función de su resistencia de radiación y su longitud eléctrica es [18],

$$G_{dmax} = \frac{120}{R_r} [1 - \cos(\beta H)]^2$$

La ganancia en potencia  $G_p$  [18],

$$G_{pm \acute{a}x} = G_{dm \acute{a}x} * \text{rendimiento de antena}$$

La ganancia de una antena se da en dB [18],

$$G = \frac{G_{dm \acute{a}x} \text{ de antena en prueba}}{G_{dm \acute{a}x} \text{ de antena patron}} 10 \log$$

L. Área efectiva

El área efectiva, o apertura efectiva, se define como “la razón de la potencia disponible en los terminales de antena a la potencia por unidad de área de una onda polarizada adecuadamente”. [18]

En antenas sin pérdidas es función de  $G_d$ , en antenas con pérdidas es función de la  $G_p$  [18],

$$A = \frac{\lambda^2}{4\pi} * G \text{ (metros}^2\text{)}$$

## 5.12 ECUACIONES DE MAXWELL

Para conocer los campos en un problema particular, deben solucionarse las ecuaciones de Maxwell con las condiciones de frontera implícitas en los medios y la geometría del problema.

Las ecuaciones de Maxwell, son ecuaciones diferenciales acopladas, aunque matemáticamente complicadas representan conceptos simples. [17]

LEY FISICA	FORMA INTEGRAL	FORMA PUNTUAL	FORMA PUNTUAL (CAMPOS ARMONICOS)
Ley de Gauss	$Q = \oint_S \bar{D} d_s = \int_V \rho dv$	$\nabla * \bar{D} = \rho$	$\nabla * \bar{D} = \rho$
Ley de Ampere	$I_T = \oint \bar{H} * dl = \int_s (\bar{J} + \frac{\partial}{\partial t} \bar{D}) ds$	$\nabla * \bar{H} = \frac{\partial}{\partial t} \bar{D} + \bar{J}$	$\nabla * \bar{H} = j\omega \bar{D} + \bar{J}$
Ley de Faraday	$V_T = \oint E * dl = - \int_s \frac{\partial}{\partial t} \bar{B} ds$	$\nabla * \bar{E} = - \frac{\partial}{\partial t} \bar{B}$	$\nabla * \bar{E} = -j\omega \bar{B}$
Continuidad del Flujo Magnético	$\oint_S \bar{B} d_s = 0$	$\nabla * \bar{B} = 0$	$\nabla * \bar{B} = 0$

**Tabla 4: Ecuaciones de Maxwell.**<sup>23</sup>

**Ley de Gauss:** “El flujo eléctrico total que sale de una superficie cerrada arbitraria es igual a la carga en el interior de la superficie.” [17]

$$Q = \oint_S \bar{D} d_s$$

El teorema de divergencia nos proporciona un medio para pasar de una integral cerrada de superficie a una integral de volumen [17],

$$\nabla * \bar{D} = \rho$$

**Ley generalizada de Ampere:** “El movimiento de carga eléctrica tiene siempre asociado un campo magnético  $\bar{H}$  ” [17],

<sup>23</sup> Tomado de: Antenas: Principios básicos, análisis y diseño; José Hernández Rueda, Universidad Autónoma de Baja California, Pág. 23.

$$I = \oint \vec{H} * d\vec{l} = \int_S \vec{J} ds$$

Maxwell descubrió que la corriente debía tener otra componente cuando el campo eléctrico fuera variante en el tiempo, entonces agrego un término conocido como corriente de desplazamiento eléctrico. [17]

$$I_T = \oint \vec{H} * d\vec{l} = \int_S \left( \vec{J} + \frac{\partial}{\partial t} \vec{D} \right) ds$$

**Ley de Faraday:** “La variación temporal de un campo magnético producirá una variación espacial del campo eléctrico” [17],

$$V_T = \oint \vec{E} * d\vec{l} = - \int_S \frac{\partial}{\partial t} \vec{B} ds$$

**Ley de continuidad de flujo magnético (ley de Gauss del campo magnético):** “Las líneas de fuerza de campo magnético siempre son cerradas...para que un campo magnético se manifieste, es necesaria la presencia de un dipolo magnético” [17],

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

**Ecuación de continuidad de la corriente o conservación de la carga:** reafirma el hecho de que la salida de corriente por la superficie de un volumen es proporcional al decremento de la densidad de carga en el interior del mismo volumen. [17]

$$\nabla * \vec{J} = - \frac{\partial}{\partial t} \rho$$

<b>Ecuación de continuidad de la corriente (conservación de la carga eléctrica)</b>	$\nabla \cdot \bar{J} = \frac{\partial \rho}{\partial t}$	$\nabla \cdot \bar{J} = -j\omega$ (Campos armónicos)
<b>Teorema de divergencia</b>	$\oint_S \bar{D} \cdot d\bar{s} = \int_V \nabla \cdot \bar{D} \cdot dV$	
<b>Teorema de Stokes</b>	$\oint_S \nabla \times \bar{H} \cdot d\bar{s} = \oint_L \bar{H} \cdot d\bar{l}$	
<b>Relaciones constitutivas</b>	<b>Campo eléctrico</b>	$\bar{D} = \epsilon \bar{E}$
	<b>Campo magnético</b>	$\bar{B} = \mu \bar{H}$

**Tabla 5: Relaciones fundamentales.** <sup>24</sup>

### 5.12.1 Condiciones de frontera de un conductor

El campo eléctrico en el interior del conductor es cero [17],

$$E_{int} = 0$$

También los campos tangenciales en la frontera de un conductor son cero [17],

$$E_t = 0$$

La densidad de flujo eléctrico [C/m<sup>2</sup>] que fluye normalmente de la superficie, es igual a la densidad superficial de carga  $\rho_s$ , [17]

$$D_n = \rho_s = \epsilon E_n$$

### 5.12.2 Condiciones de frontera en aislantes

Los campos eléctricos tangenciales son idénticos [17]:

$$E_{t1} = E_{t2}$$

La diferencia de los componentes normales de la densidad de flujo eléctrico es igual a la carga en la superficie [17],

$$D_{n1} - D_{n2} = \rho_s$$

<sup>24</sup> Tomado de: Antenas: Principios básicos, análisis y diseño; José Hernández Rueda, Universidad Autónoma de Baja California, Pág. 24.



En un conductor perfecto [17],

$$D_{n1} = D_{n2}$$

### 5.13 PARAMETROS DE RADIACION

Un *radián* es el ángulo  $\theta$  tal que la longitud de su arco es en (longitud) igual al radio. [17]

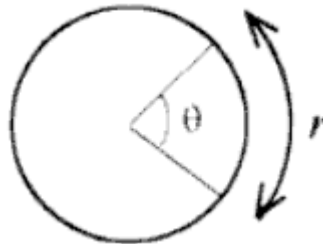


Figura 23: Definición de radián.<sup>25</sup>

Un *estereorradián* es el ángulo sólido que describe, en la superficie de una esfera de radio  $r$ , una superficie igual a  $r^2$ . El *estereorradián* es la unidad del ángulo sólido, usado para caracterizar el patrón de radiación de una antena. [17]

El vector de *Poynting* instantáneo es la densidad de potencia asociada a una onda electromagnética [17]:

$$\bar{S} = \bar{E} \times \bar{H} = \frac{1}{2} \text{Re}[\bar{E} \times \bar{H}] + \frac{1}{2} \text{Re}[\bar{E} \times \bar{H} e^{j2\omega t}]$$

$\bar{E}$  = campo eléctrico instantáneo

$\bar{H}$  = campo magnético instantáneo

Para el caso de campos armónicos, El campo eléctrico y el magnético instantáneo son cantidades fasoriales, relacionados por [17]:

$$\bar{E}(x, y, z; t) = \text{Re}[\bar{E}(\vec{r})e^{j\omega t}]$$

$$\bar{H}(x, y, z; t) = \text{Re}[\bar{H}(\vec{r})e^{j\omega t}]$$

---

<sup>25</sup> Tomado de: Antenas: Principios básicos, análisis y diseño; José Hernández Rueda, Universidad Autónoma de Baja California, Pág. 33.

El vector *Poynting promedio* (densidad de potencia promedio) [17],

$$\bar{S}_{prom} = \frac{1}{2} Re[\bar{E} * \bar{H}]$$

$$\bar{S}_{prom}(\theta, \phi) = \frac{1}{2Z_0} |\bar{E}(\theta, \phi)|^2 \hat{r} \text{ (campo lejano)}$$

El vector *Poynting máximo*, [17]

$$\bar{S}_{max} = \frac{1}{2Z_0} |\bar{E}_{max}|^2 \hat{r}$$

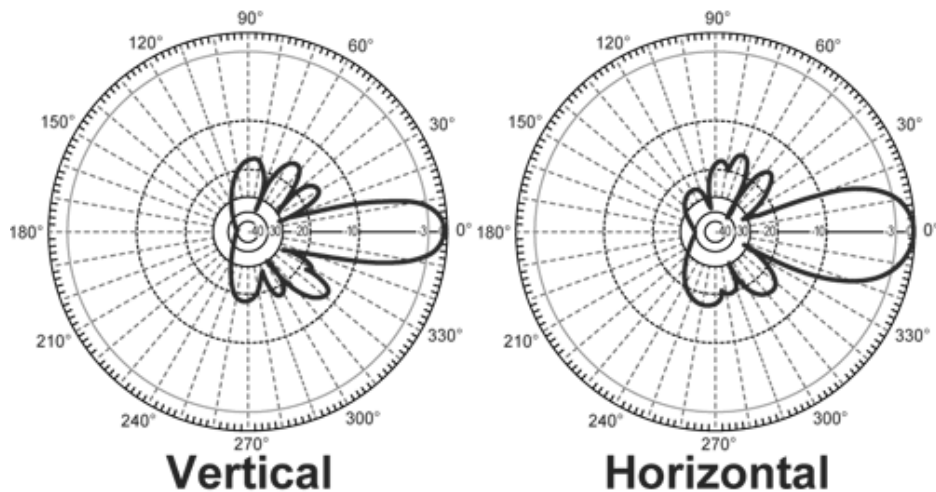
El vector *Poynting normalizado*, [17]

$$S_n(\theta, \phi) = \frac{S(r, \theta, \phi)}{S_{max}} = \frac{|\bar{E}(\theta, \phi)|^2}{|\bar{E}_{max}|^2}$$

El *patrón de radiación* (o patrón de potencia) es la grafica del vector de Poynting normalizado, y es la forma en que se distribuye la potencia electromagnética alrededor de la antena. [17]

$$PR(\theta, \phi) = S_n(\theta, \phi) = \frac{|\bar{E}(\theta, \phi)|^2}{|\bar{E}_{max}|^2}$$

El *patrón de campo* es la variación del campo eléctrico  $\bar{E}$  o magnético  $\bar{H}$  a lo largo de un radio constante. [17]



### **Figura 24: Patrón de radiación.<sup>26</sup>**

Las formas de radiar de una antena, se pueden representar con diferentes gráficas.

---

<sup>26</sup> Tomado de:  
<http://www.thinkservice.com/images/Antennas/Bazuka%2014dBi/Bazuka%20Gain%20Pattern.gif>,  
Diciembre 23 del 2009.

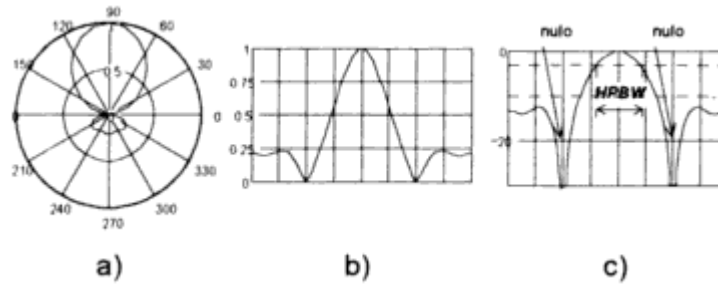


Figura 25: a) Grafica Polar, b) Grafica lineal y c) Grafica logarítmica de la misma antena.<sup>27</sup>

En las gráficas polares, los cambios del ángulo  $\theta$  puede hacer variar la orientación de los lóbulos, pero su forma y amplitudes se mantienen.

La *potencia de radiación* de una antena puede calcularse integrando el flujo de potencia (vector de Poynting) sobre una superficie esférica que cubra la antena, [17]

$$P_{rad} = \iint_S \vec{S}_{prom} * ds = \frac{1}{2} \iint_S Re|\vec{E} * \vec{H}| * ds$$

[17]

$$P_{rad} = \frac{1}{2Z_o} \iint_S |\vec{E}|^2 \hat{r} * ds \quad (campo lejano)$$

La *intensidad de radiación* se define como la potencia radiada por una antena por unidad de ángulo solido, y es un parámetro de campo lejano que se obtiene como la densidad de radiación por el cuadrado de la distancia. [17]

$$U = r^2 * S_{prom}$$

Relacionada con el campo lejano [17]:

$$U = \frac{r^2}{2Z_o} |\vec{E}(r, \theta, \phi)|^2 \cong \frac{1}{2Z_o} |\vec{E}(\theta, \phi)|^2 \quad (campo lejano)$$

<sup>27</sup> Tomado de: Antenas: Principios básicos, análisis y diseño; José Hernández Rueda, Universidad Autónoma de Baja California, Pág. 35.

$$U_{max} = \frac{1}{2Z_0} |E_{max}(\theta, \phi)|^2 \text{ (intensidad máxima)}$$

La intensidad de radiación de una fuente isotrópica es [17]:

$$U_o = \frac{P_{rad}}{4\pi}$$

Una *fente isotrópica* es aquella que tiene radiación idéntica en todas las direcciones [17].

El *ángulo solido del haz* ( $\Omega_A$ ) se define como el ángulo solido a través del cual toda la potencia de la antena fluirá, si la intensidad de radiación fuera constante e igual al valor máximo para todos los ángulos dentro de  $\Omega_A$  [17]:

$$\Omega_A = \int_{4\pi} S_n d\Omega$$

$$\Omega_A = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} S_n \sin\theta d\theta d\phi$$

La *ganancia directiva* es la relación de la intensidad de radiación en una dirección, con la intensidad de radiación de una antena de referencia. En el análisis teórico, usualmente la referencia es un radiador isotrópico: [17]

$$D(\theta, \phi) = D_g = \frac{S_p}{\langle S \rangle} = \frac{4\pi PR}{\Omega_A}$$

En la práctica, se llama *directividad* a la ganancia directiva en la dirección de máxima radiación; y hace referencia a la capacidad de la antena de concentrar la potencia radiada en cierta dirección [17],

$$D_o = \frac{4\pi}{\Omega_A}$$

La *ganancia* se define de forma similar a la directividad, excepto que se considera la potencia total de entrada en vez de la potencia total radiada. La diferencia es una medida de la eficiencia de la antena [17],

$$P_{rad} = \eta P_{in}$$

$\eta = \text{eficiencia}$

$P_{rad}$  = potencia total radiada  
 $P_{in}$  = potencia total de entrada

$$G(\theta, \phi) = \eta D(\theta, \phi) = \eta \frac{4\pi PR}{\Omega_A}$$

La eficiencia generalmente involucra las pérdidas en los terminales y estructura de la antena, usualmente es muy cercana a la unidad. [17]

La ganancia [17],

$$G = \eta \frac{4\pi}{\Omega_A}$$

Normalmente se da en dB [17],

$$G(dB) = 10 * \log \left( \eta * \frac{4\pi}{\Omega_A} \right)$$

Esta referida a un radiador isotrópico.

*Ancho de banda* se define como la banda de frecuencia en la cual la ganancia se mantiene dentro de los 3 dB del valor máximo.

*Polarización* es la dirección del campo eléctrico al salir de la antena y propagarse en el espacio libre.

Todo campo eléctrico  $\vec{E}$  puede descomponerse en dos proyecciones ortogonales, [17]

$$E_x = E_{ox} \cos\theta$$

$$E_y = E_{oy} \sen\theta$$

Cuyas relaciones son [17]:

$$\frac{E_x}{E_{ox}} = \cos\theta$$

$$\frac{E_y}{E_{oy}} = \sen\theta$$

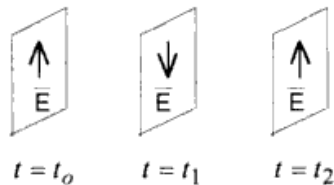
Según la igualdad,  $\text{sen}^2\theta + \text{cos}^2\theta = 1$ , las proyecciones ortogonales del campo eléctrico tienen la siguiente relación [17]:

$$\left(\frac{E_x}{E_{ox}}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_{oy}}\right)^2 = 1$$

Se pueden presentar tres casos diferentes:

a) *Polarización lineal*. Puede ser horizontal o vertical. [17]

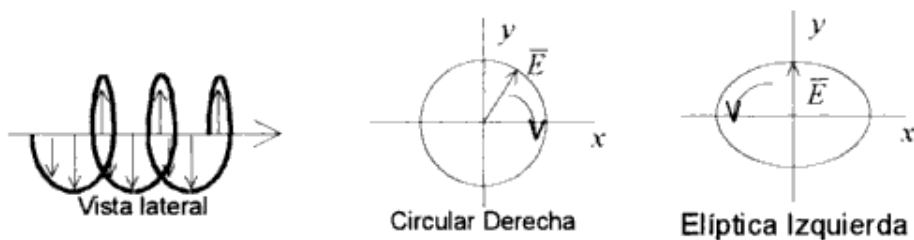
Para polarización lineal se suele tomar como referencia el horizonte terrestre para denominar horizontal o vertical a cierta polarización.



**Figura 26: Representación de un campo con polarización vertical.**<sup>28</sup>

b) *Polarización circular*.  $E_{ox} = E_{oy}$ . [17]

c) *Polarización elíptica*.  $E_{ox} \neq E_{oy}$ . [17]



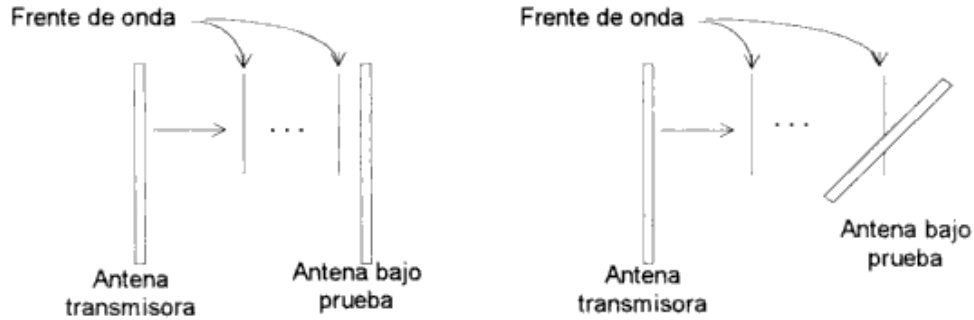
**Figura 27: Representación de polarización circular y elíptica.**<sup>27</sup>

La polarización circular o elíptica puede ser derecha o izquierda. Las antenas poseen una cierta cantidad de polarización cruzada (aunque por la mayoría de las aplicaciones solo interesa un solo tipo de polarización de la antena), es decir, dada una dirección del campo transmitido, la antena recibe dicha polarización tanto en forma paralela como perpendicular (cruzada) a ella. *Las nuevas tecnologías para*

<sup>28</sup> Tomado de: Antenas: Principios básicos, análisis y diseño; José Hernández Rueda, Universidad Autónoma de Baja California, Pág. 39.

sistemas móviles, tienen en cuenta ambas componentes para reducir los efectos de recepción por multitrayectoria. [17]

La eficiencia de la antena para separar ambas polarizaciones, se conoce como discriminación de polarización cruzada, y esa la relación de la potencia recibida en orientación cruzada y la potencia recibida en la dirección de referencia. Este parámetro se una función del ángulo  $\varphi$ . Para esto son necesarias las graficas co-polares y cros-polares de campo y potencia.



**Figura 28: Modelo de medición de patrones co-polar y cros-polar.**<sup>29</sup>

La densidad de flujo de potencia que sale de una antena es el producto del campo eléctrico por el magnético  $\vec{E} \times \vec{H}$ . El flujo de potencia es la cantidad de potencia que se propaga. [17]

$$\nabla * (\vec{E} \times \vec{H}) = -\vec{E} * \nabla \times \vec{H} + \vec{H} * \nabla \times \vec{E}$$

Si se sustituyen las dos primeras ecuaciones de Maxwell [17]:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \vec{B}, \nabla \times \vec{H} = \frac{\partial}{\partial t} \vec{D} + \vec{J}$$

$$\nabla * (\vec{E} \times \vec{H}) = -\vec{E} * \left[ \frac{\partial}{\partial t} \vec{D} + \vec{J} \right] + \vec{H} * \left[ -\frac{\partial}{\partial t} \vec{B} \right]$$

$$\nabla * (\vec{E} \times \vec{H}) = -\vec{J} * \vec{E} - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} \vec{D} * \vec{E} - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} \vec{B} * \vec{H}$$

Integrando en un volumen [17],

<sup>29</sup> Tomado de: Antenas: Principios básicos, análisis y diseño; José Hernández Rueda, Universidad Autónoma de Baja California, Pág. 40.



$$\int_v \nabla * (\bar{E} \times \bar{H}) dv = - \int_v \bar{J} * \bar{E} dv - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} \int_v [\bar{D} * \bar{E} + \bar{B} * \bar{H}] dv$$

Aplicando el teorema de divergencia [17],

$$\oint_S \bar{D} * ds = \int_v \nabla * \bar{D} * dv$$

$$\oint_S (\bar{E} \times \bar{H}) * ds = - \int_v \bar{J} * \bar{E} dv - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} \int_v [\bar{D} * \bar{E} + \bar{B} * \bar{H}] dv$$

$$\begin{array}{ccccc} \text{Flujo de} & = & \text{Potencia} & + & \text{Potencia} \\ \text{potencia} & & \text{radiada} & & \text{dentro} \end{array}$$

La impedancia de radiación, teniendo en cuenta que  $P = I^2 * Z$  [17],

$$Z = \frac{1}{I_0^2} \int_v \bar{J} * \bar{E} dv$$

La impedancia de entrada es [17],

$$Z = \frac{-1}{I_0^2} \int_{-L/2}^{L/2} I(z) * E(z) dz$$

Dicha impedancia, hace referencia a la oposición que presenta la antena a ser alimentada.

*Resistencia de radiación* es la resistencia a través de la cual fluye una corriente pico de entrada y la convierte a campo efectivo radiado. [17]

$$R_r = \frac{1}{I_0^2} \int_{4\pi} S(r, \theta, \phi) r^2 d\Omega$$

$$R_r = \frac{r^2 S_M(r, \theta, \phi) \Omega_A}{I_0^2}$$

La *Eficiencia de antena* es la relación de la potencia radiada y la potencia incidente a la antena; lo restante es la potencia disipada. [17]

$$\eta = \frac{P_r}{P_e}$$

$$\eta = \frac{P_r}{P_t} \frac{P_t}{P_e} = \eta_r \eta_t$$

$$\eta = \frac{P_r}{P_e} = 1 - |\Gamma|^2 \quad \Gamma = \frac{Z_{ent} - Z_o}{Z_{ent} + Z_o}$$

### 5.13.1 Relaciones de potencia en una antena transmisora

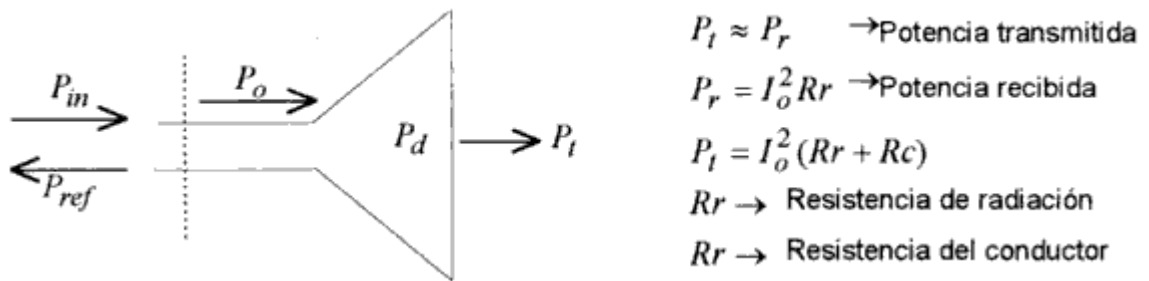


Figura 29: Relaciones de potencia en una antena transmisora.<sup>30</sup>

La potencia incidente  $P_o$  junto a la potencia reflejada  $P_{ref}$ , conforman la potencia de entrada  $P_{in}$ . [17]

$$P_{in} = P_o + P_{ref}$$

Y a su vez, la potencia incidente  $P_o$  es la suma de la potencia disipada  $P_d$  y la transmitida  $P_t$ . [17]

$$P_o = P_d + P_t$$

<sup>30</sup> Tomado de: Antenas: Principios básicos, análisis y diseño; José Hernández Rueda, Universidad Autónoma de Baja California, Pág. 42.

$$\eta = \frac{P_t}{P_o}$$

$$\eta = \frac{P_t}{P_o} = 1 - \frac{P_d}{P_o} = 1 - |\Gamma|^2$$

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_o}{Z_{in} + Z_o}$$

### 5.13.2 Principio de reciprocidad

Según este principio, toda antena conserva sus propiedades de radiación esté funcionando como antena receptora o como transmisora. [17]

De forma general [17]:

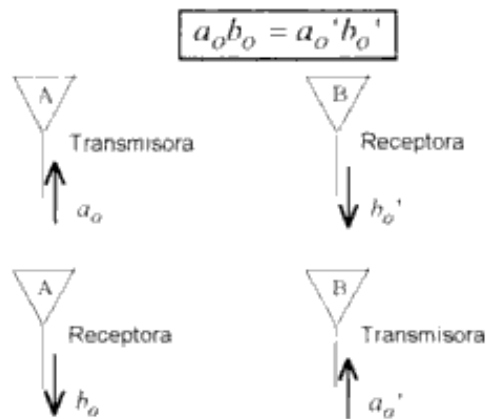


Figura 30: Principio de reciprocidad de antenas.<sup>31</sup>

### 5.13.3 Zonas de campo de antena

La zona de radiación de una antena se divide en dos regiones, la división entre ambas es arbitraria y depende del criterio propio. [17]

$$r = 60\lambda \quad \text{ó} \quad 100\lambda$$

<sup>31</sup> Tomado de: Antenas: Principios básicos, análisis y diseño; José Hernández Rueda, Universidad Autónoma de Baja California, Pág. 43.

- a) Zona de campo cercano o *Zona de Fresnel*: en esta región la distribución angular del campo depende de la distancia. La presencia de un obstáculo en esta zona es determinante en el patrón de radiación y en la impedancia de entrada. Frecuentemente se usa esta zona para lograr acoplamiento entre antenas.
- b) Zona de campo lejano o *Zona de Franhoufer*: en esta región la distribución angular de campo es independiente de la distancia. Los componentes del campo son esencialmente perpendiculares entre si y la dirección de propagación de la onda plana es radial.

## **5.14 SISTEMAS CELULARES DE RADIOTELEFONÍA MÓVIL**

En los sistemas celulares de radiotelefonía móvil, el área de servicio se divide en zonas de menor tamaño, llamadas *celdas*. Cada vez que el número de usuarios aumenta, el tamaño de la celda se redefine. En cada celda solo se puede usar un grupo de canales del total disponible. Para celdas que están suficientemente separadas, es posible utilizar el mismo grupo de canales. [9]

Un móvil que funciona mediante este tipo de sistema, puede trasladarse en un “área de servicio”, pudiendo salir de la estación base de la celda en que se encuentre, y debe ser atendido por la estación base de la celda a la que este pasando. A este proceso se le conoce como transferencia de llamada y es una de las principales características de los sistemas celulares. [9]

### **5.14.1 Características del canal en comunicaciones móviles**

El mecanismo de propagación de las ondas depende básicamente de la longitud de onda de las frecuencias radiadas. En un ambiente urbano existen edificios y casas que varían en forma y alturas; como las dimensiones de algunos de estos obstáculos son equivalentes a varias longitudes de onda de las frecuencias de las señales de radio, estos edificios se comportan como dispersores de las ondas electromagnéticas, creando ondas reflejadas. [9]

Las longitudes entre móviles y estaciones base es generalmente menor a 25 Km por lo que no es necesario considerar pérdidas debido a la curvatura de la tierra.

Un aspecto importante es la altura física de las antenas. En las estaciones base se encuentran entre los 30 y 91 m, en áreas suburbanas, y mayores a 91 m en grandes ciudades. En los móviles, la altura promedio de la antena es de 2 m sobre el nivel de la tierra. Estos aspectos, junto con las características del terreno y las

del ambiente creado por el hombre, influyen en el patrón de pérdida por propagación. [9]

En el espacio libre, las pérdidas por propagación se dan en función de la frecuencia  $f$  y la distancia  $d$ , [9]

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{1}{(4\pi)^2(d/\lambda)^2}$$

$\lambda =$  longitud de onda

$P_t =$  potencia transmitida

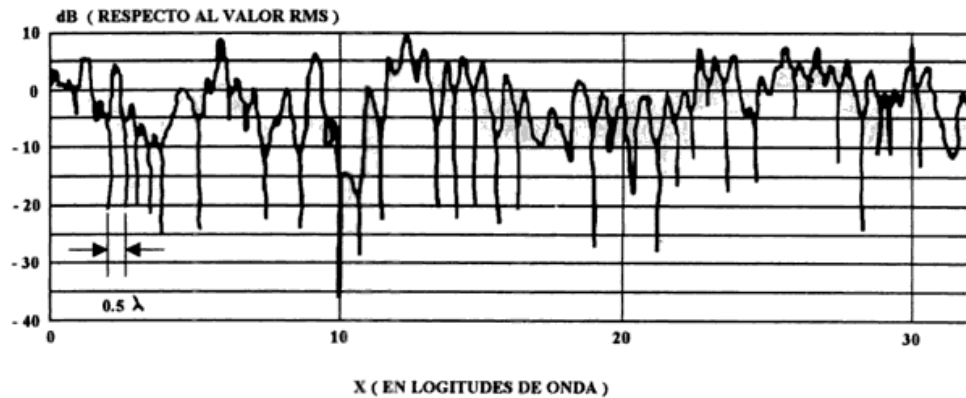
$P_r =$  potencia recibida

En el medio ambiente urbano, existen atenuaciones y reflexiones por los edificios y calles, la siguiente ecuación describe el patrón de pérdida por propagación: [9]

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{k}{d^n}$$

Experimentalmente se ha encontrado que el exponente  $n$  tiene un valor aproximado de 4, y  $k$  es una constante que toma diferentes valores dependiendo del medio ambiente, de la frecuencia y de la altura de la antena. [9]

El efecto causado por las múltiples reflexiones, que sufren las ondas electromagnéticas a causa de los edificios y otros obstáculos, ocasiona que la señal recibida no provenga únicamente de la trayectoria por línea de vista, sino por una suma de muchas señales. La amplitud de esta señal puede describirse estadísticamente con la distribución de Rayleigh. La siguiente, es una gráfica típica de la señal instantánea que recibe el móvil: [9]



**Figura 31: Intensidad de campo. Media típica.**<sup>32</sup>

El patrón de pérdidas por propagación instantánea puede considerarse como la suma, en decibeles, de tres componentes. [9]

$$10 \log(P_r/P_t) = 10 \log(k/d^n) + X + Y$$

*X = variable aleatoria con distribución de tipo lognormal, media 0 dB y desviación estándar 8 dB.*

*Y = es proporcional al logaritmo de una variable aleatoria de Rayleigh, media 0 dB y con cambios rápidos sobre fracciones de longitud de onda.*

El modelo dado por esta ecuación es válido para celdas de radios mayores a 1 km, con antenas de altura por encima del nivel promedio de altura de los edificios.

### 5.14.2 TÉCNICAS DE ACCESO

En los sistemas de comunicaciones celulares, varios usuarios en una celda se comunican con una misma estación base. De la misma forma esta celda permite al móvil comunicarse con otras celdas. Así, los usuarios deben compartir el espectro asignado a cada celda. A este procedimiento se le conoce como esquema de acceso múltiple. [19]

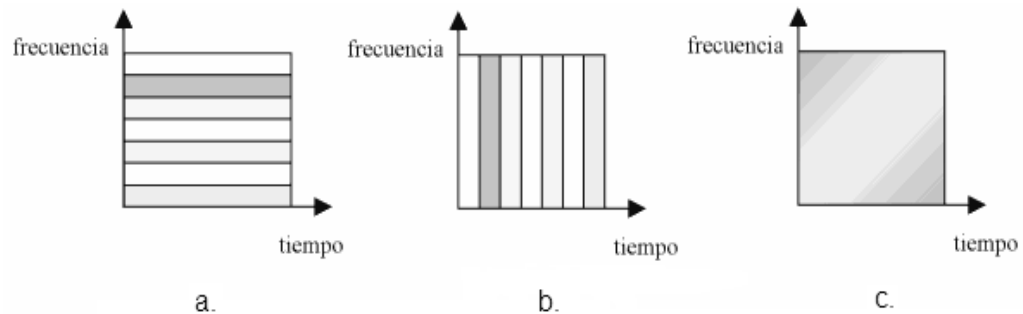
Básicamente los esquemas de acceso pueden agruparse en: acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA), acceso múltiple por división de tiempo (TDMA) y acceso múltiple por división de código (CDMA).

<sup>32</sup> Tomado de: Sistema inalámbricos de comunicación personal; David Muñoz Rodríguez, Marcombo Editores, Pág. 9.

En FDMA el espectro total se divide en varios canales. Un único canal de frecuencia se asigna a cada usuario. Este canal no puede ser compartido por otros usuarios aunque no esté transmitiendo. [19]

En el acceso tipo TDMA el canal de comunicación se comparte en el tiempo. El tiempo se divide en intervalos, los cuales se agrupan en tramas. Al móvil que demande servicio se le asigna un intervalo de tiempo en la trama. Este intervalo de tiempo se conserva por el usuario hasta el final de su conversación, al igual que el canal de radio se conserva en FDMA. [19]

En el acceso tipo CDMA, múltiples señales ocupan la misma banda de frecuencia de radio, transmitiendo simultáneamente. Esta técnica se considera una de las aplicaciones de dispersión del espectro, las técnicas de dispersión útiles para los sistemas de comunicación móvil son la de secuencia directa y la de saltos de frecuencia. [19]



**Figura 32: Técnicas de acceso: a. FDMA, b. TDMA y c. CDMA.<sup>33</sup>**

### 5.14.3 Subdivisión de celdas

El número total de canales  $C$  se divide en  $N$  conjuntos, entonces cada conjunto contiene  $S=C/N$  canales. Es posible que el tráfico en la celda exceda la capacidad de los  $S$  canales. Para estos casos las celdas se subdividen de manera que la celda original contiene varias celdas de menor tamaño. [9]

Al reducir el área de cada celda el sistema se ajusta a la densidad de tráfico demandada (llamadas simultáneas por unidad de área), sin incrementar el espectro que está usando. [9]

---

<sup>33</sup> Tomado de: Comunicaciones Móviles; Mónica Gorricho Moreno, Juan Luis Gorricho Moreno, Universidad Politécnica de Cataluña, Pág. 38.

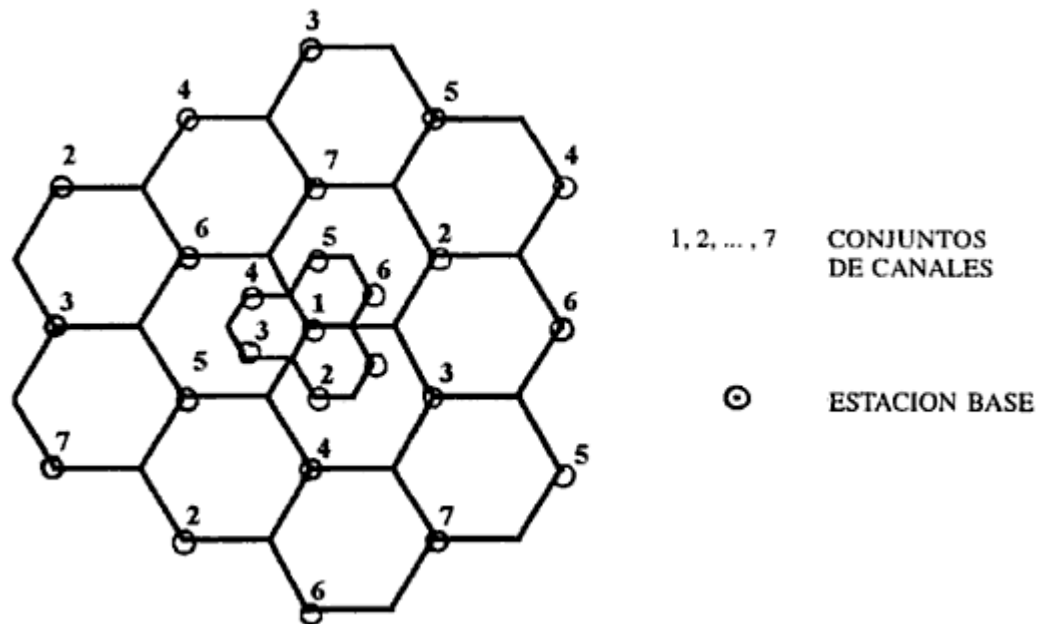


Figura 33: Subdivisión de celdas. <sup>34</sup>

Esta técnica junto con la de reuso de frecuencia, han logrado que los sistemas celulares puedan atender a un gran número de clientes en un área grande usando un ancho del espectro relativamente pequeño.

#### 5.14.4 Transferencia de llamada

Un móvil que recibe el servicio puede trasladarse por toda el área de servicio y su comunicación no debe interrumpirse. Cada vez que el móvil pase de una celda a otra, la llamada debe transferirse entre las respectivas estaciones base.

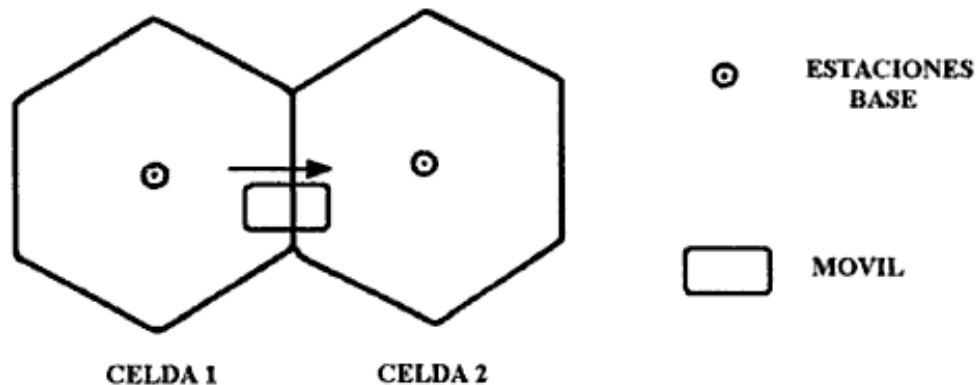


Figura 34: Proceso de transferencia de llamada. <sup>35</sup>

<sup>34</sup> Tomado de: Sistema inalámbricos de comunicación personal; David Muñoz Rodríguez, Marcombo Editores, Pág. 14.



La transferencia de llamada se hace con el fin de asegurar una relación señal a ruido adecuada durante todo el lapso de la llamada. Pero este mecanismo tiene muy poco efecto en la interferencia entre canales de la misma frecuencia, puesto que éste se controla principalmente por la separación física de las celdas que utilizan el mismo grupo de frecuencias. [9]

La transferencia de llamada debe realizarse solo en la frontera de las celdas. Porque cada transferencia de llamada ocasiona una interrupción en la comunicación de alrededor de varios cientos de milisegundos. Es posible determinar la frontera de las celdas realizando mediciones de la intensidad de campo recibida, puesto que se conoce probabilísticamente como varía la intensidad de campo en función de la distancia. La exactitud de esta estimación depende de la variación que tengan las zonas de oscurecimiento de una región en particular. [9]

Medir el retraso en la propagación cuando se transmite una señal hacia el móvil desde una estación base y del regreso de la señal a la estación base desde el móvil, es otra técnica para medir la distancia entre el móvil y la estación base.

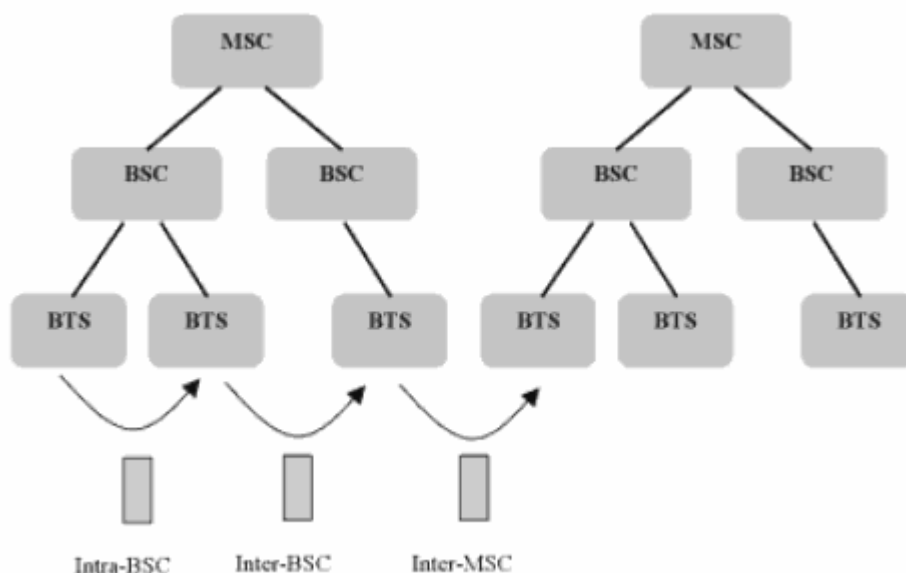
Independientemente del algoritmo de transferencia de llamada que se utilice, es conveniente hacer varias consideraciones generales acerca del algoritmo. Es importante considerar a todos los móviles del sistema y no mejorar la situación de un móvil empeorando la de otro.

La frecuencia con la cual la llamada de un móvil se transfiere también es un parámetro importante en el algoritmo de transferencia de llamada. También deben considerarse los posibles errores en las mediciones, por ejemplo si el algoritmo escoge valores promedios muy cercanos, se puede ocasionar un efecto de rebote transfiriendo la señal nuevamente a la celda original y repitiendo el proceso. Además, el mecanismo de transferencia de llamada solo debe interrogar a las estaciones base de las celdas que rodean a la estación base, que sirve actualmente al móvil, para decidir hacia donde realiza la transferencia. [9]

Si las celdas origen y destino pertenecen al mismo controlador, BSC (*Base Station Controller*) la transferencia de llamada es intra-BSC. Si no es así, pero ambas celdas pertenecen a dos BSC's que a su vez, pertenecen al mismo elemento de conmutación, MSC (*Mobile Station Switching Center*), el traspaso de llamada es inter-BSC. Si esta última situación no se da, el traspaso de llamada es inter MSC. [19]

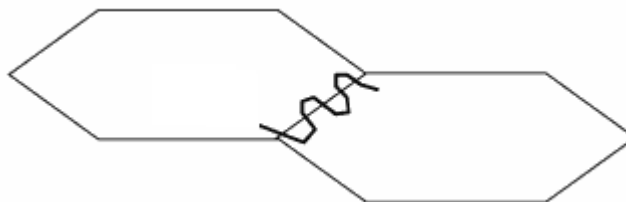
---

<sup>35</sup> Tomado de: Sistema inalámbricos de comunicación personal; David Muñoz Rodríguez, Marcombo Editores, Pág. 15.



**Figura 35: Tipos de transferencia en función de los elementos que participan.**<sup>36</sup>

Cuando un móvil se desplaza por los bordes de dos celdas, es posible que con su desplazamiento provoque sucesivas transferencias de llamada entre estas dos celdas, esto se conoce como *efecto ping-pong*. [19]



**Figura 36: Efecto ping-pong, por sucesivas transferencias de llamada.**

## 5.15 PROPAGACION EN LAS COMUNICACIONES MOVILES

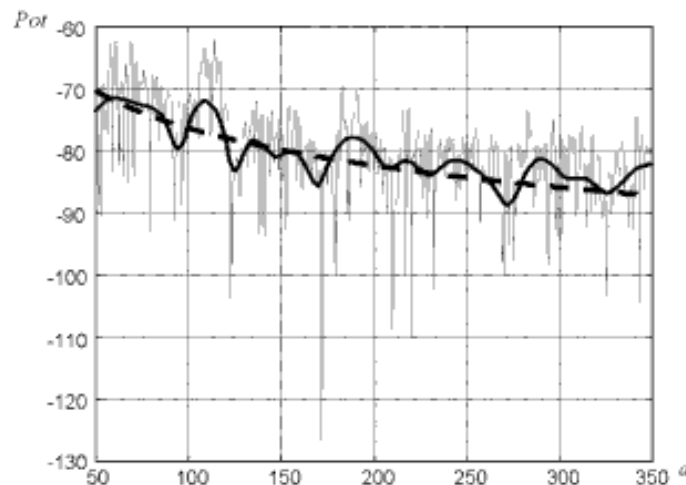
En los sistemas de comunicaciones móviles el principal medio de transmisión son las ondas electromagnéticas, por esta razón el estudio del comportamiento de los niveles de señal y los fenómenos que intervienen es fundamental. Dichas ondas se comportan según el modelo establecido por las leyes de Maxwell. Sin embargo aun aplicando las ecuaciones que describen la teoría electromagnética, es necesario conocer con exactitud las condiciones del entorno de propagación (posición, forma y composición de los objetos), este conocimiento es físicamente

<sup>36</sup> Tomado de: Comunicaciones Móviles; Mónica Gorricho Moreno, Juan Luis Gorricho Moreno, Universidad Politécnica de Cataluña, Pág.35.

imposible y aunque se tuviera, las ecuaciones resultantes solo se podrían resolver mediante complejas técnicas de simulación iterativa. [15]

Empíricamente se han deducido una serie de modelos más o menos complejos que describen el comportamiento de las magnitudes necesarias para describir el medio de transmisión y poder aplicar los mecanismos necesarios para una transmisión fiable de la información. La propagación de las ondas electromagnéticas y los niveles de señal recibidos dependen de la longitud de onda, objetos interpuestos entre el emisor y receptor y las características de dichos objetos (tamaño, forma, composición, etc.). [15]

Al monitorear el nivel de potencia recibido en un móvil que se aleja de la antena transmisora, se puede observar una variación en la intensidad. Distintas causas afectan el nivel de la señal, como cambios en la posición del móvil y los obstáculos que producen reflexiones. [15]



**Figura 37: Potencia recibida en un terminal en movimiento.** <sup>37</sup>

### 5.15.1 Pérdidas de propagación

Determinar el nivel de potencia medio que recibirá cada terminal, es uno de los aspectos básicos en el diseño de un sistema de comunicaciones móvil. Las ecuaciones de Maxwell permiten predecir la potencia recibida,  $P$ , en el espacio libre [15]:

$$P = P_T * G_T * G_R \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)$$

<sup>37</sup> Tomado de: Principios de Comunicaciones Móviles; Oriol Sallent Roig, José Luis Valenzuela González, Ramón Agustí Comes, Universidad Politécnica de Cataluña, Pág.52.

$P_T$  = Potencia transmitida

$G_T$  = Ganancia de la antena transmisora

$G_R$  = Ganancia de la antena receptora

$\lambda$  = longitud de onda

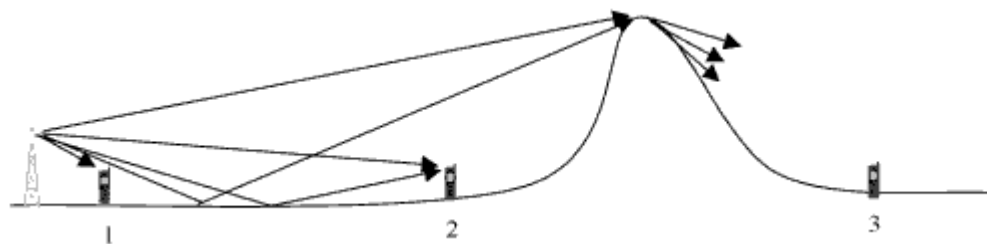
$d$  = distancia entre la antena transmisora y el receptor.

A partir de esta ecuación se definen las pérdidas de propagación,  $L$ , como la relación entre potencia emitida y potencia recibida utilizando antenas con ganancia unitaria, [15]

$$L = \frac{c^2}{(4\pi df)^2}$$

En el espacio libre la diferencia entre la potencia recibida y la potencia transmitida depende del inverso del cuadrado de la distancia, cada vez que se duplica la distancia se produce una atenuación de 6 dB [15]. Para frecuencias mayores la atenuación aumenta. [15]

En un sistema de comunicaciones móvil, rara vez se puede considerar la hipótesis de propagación en espacio libre y que las pérdidas de propagación se ajusten a las proporcionadas por  $L$ .



**Figura 38: Pérdidas de propagación según la distancia.** <sup>38</sup>

Por ejemplo, en la posición 1, el modelo de espacio libre proporcionaría una aproximación correcta de las pérdidas, aunque sería prudente agregar factores correctores si existen obstáculos, edificios, casas, vegetación, etc.

Si el móvil se desplaza hasta la posición 2, aunque existe visibilidad directa las reflexiones del plano de tierra pueden provocar pérdidas en la propagación. En estas situaciones el modelo de tierra plana sería el apropiado. Este modelo considera la reflexión del suelo, [15]

<sup>38</sup> Tomado de: Principios de Comunicaciones Móviles; Oriol Sallent Roig, José Luis Valenzuela González, Ramón Agustí Comes, Universidad Politécnica de Cataluña, Pág.53.

$$P = P_T * G_T * G_R \left( \frac{h_1 h_2}{4\pi d} \right)^2$$

Donde  $h_1$  y  $h_2$  son las alturas de las antenas y se cumple, [15]

$$d \gg \frac{2\pi}{\lambda} h_1 h_2$$

Finalmente en el punto 3, las pérdidas por propagación obtenidas con el modelo de espacio libre deben ser corregidas al producirse pérdidas por difracción de la señal causada por los diferentes obstáculos interpuestos entre las antenas. [15]

Teniendo en cuenta que en la mayoría de situaciones suelen haber múltiples obstáculos que producen difracciones y reflexiones de la señal, se hace evidente la necesidad de modelos simplificados que permitan determinar las pérdidas de forma aproximada.

### 5.15.2 El modelo de okumura-hata

Este es el modelo más utilizado para predecir las transmisiones de celular en áreas con presencia de múltiples obstáculos, como edificios, casas, vegetación, etc. Se conoció por primera vez en 1968 y en 1980 el japonés Masahura Hata realizó algunas simplificaciones del modelo de Okumura. El modelo proporciona información gráfica e información de los puntos más lejanos para determinar los efectos de difracción, refracción y dispersión de las señales causadas por los diferentes obstáculos. [20]

La formulación del modelo de Okumura-Hata considera las frecuencias UHF y de la experimentación y datos estadísticos observados deriva una serie de curvas que permiten relacionar algunas constantes de atenuación en las señales. El modelo se simplifica en los siguientes enunciados:

1. Las pérdidas de propagación en el medio cuando se emplean antenas isotrópicas. [15]
2. Se considera al suelo como cuasi plano. [15]
3. Se establece una ecuación estándar que considera las pérdidas de propagación en un área urbana. Para otro tipo de áreas se define una ecuación de corrección que con la ecuación estándar permite obtener resultados más exactos. [15]

Cuando la potencia radiada de una antena isotrópica está determinada por  $P_t$ (dBW), el campo recibido por las antenas es  $E$ (dBV/m),  $A_{eff}$  es la sección de absorción en una antena isotrópica y  $P_u$  es la densidad de potencia recibida,  $P_r$  es la potencia recibida que se expresa [20]:

$$P_r (dBm) = P_u (dBm/m^2) + 10 \log_{10}(A_{eff})$$

Donde [20]:

$$A_{eff} = \frac{\lambda^2}{4\pi}$$

$$P_u (dBm/m^2) = E (dB\mu V/m) - 10 \log(120\pi) - 90$$

La diferencia en el valor de la potencia radiada y la potencia recibida equivale a las pérdidas por propagación [20],

$$L_p (dB) = P_t - P_r = P_t (dBW) - E (dB\mu V/m) * 10 \log \left( \frac{\lambda^2}{4\pi} \right) + 148.5$$

El modelo se basa en una ecuación estándar y agrega un factor de corrección. Después de análisis exhaustivos tanto a datos empíricos como a datos estadísticos obtenidos se establecen diferentes ecuaciones para diferentes áreas. [20]

TIPO DE AREA	MODELO MATEMÁTICO PARA OBTENER PERDIDAS EN dB
Urbana	$L_p = 69.55 - 26.16 \log(f_c) - 13.82 \log(h_b) - a(h_m) + (44.9 - 6.55 \log(h_b) 10 \log(R))$ Factor de corrección: Para ciudades de pequeñas a medianas: $a(h_m) = (1.1 \log(f_c) - 0.7)h_m - (1.56 \log(f_c) - 0.8)$ Para ciudades grandes: $a(h_m) = 8.29(\log(1.54h_m))^2 - 1.1$ sólo se aplica para $f_c \leq 200MHz$ $a(h_m) = 3.2(\log(11.75h_m))^2 - 4.97$ para $200 < f_c \leq 1500MHz$
Sub Urbana	$L_{ps} = L_p(\text{área urbana}) - 2 \left\{ \log \left( \frac{f_c}{28} \right) \right\}^2 - 5.4$
Abierta	$L_{po} = L_p(\text{área urbana}) - 4.78(\log(f_c))^2 + 18.33 \log(f_c) - 40.94$

Tabla 6: Expresiones del modelo matemático de Okumura-Hata.<sup>39</sup>

### 5.15.3 Interferencias en los sistemas celulares

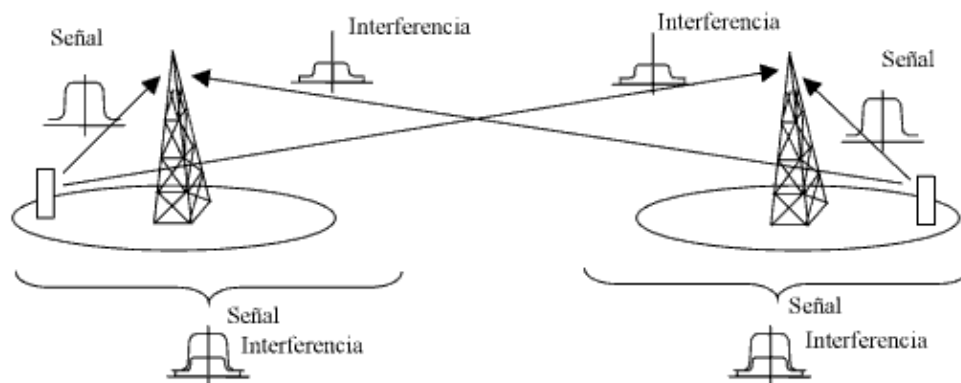
<sup>39</sup> Tomado de: Principios de Comunicaciones Móviles; Oriol Sallent Roig, José Luis Valenzuela González, Ramón Agustí Comes, Universidad Politécnica de Cataluña, Pág.57.

## A. Interferencia cocanal

La interferencia que aparece en la antena receptora, generada por comunicaciones en celdas distantes que utilizan la misma frecuencia, se conoce como interferencia cocanal. Entonces la antena receptora recibe la señal de la comunicación que tiene establecida y señales de otras comunicaciones. [19]

La interferencia cocanal impone el número mínimo de celdas por agrupación. La agrupación de celdas comprende el conjunto de celdas entre las que se reparte la totalidad de canales asignados al sistema. A menor número de celdas por agrupación, mayor es el número de canales disponibles por celda, y mayor capacidad tiene el sistema; por el contrario, menor es la distancia entre celdas cocanal y mayor es la interferencia. Por esa razón, el número de celdas por agrupación es una medida básica de la capacidad de un sistema. [19]

La deducción del número de celdas por agrupación requiere conocer previamente la relación señal interferencia exigida para una calidad aceptable de la comunicación. Esta relación señal a interferencia umbral varía de un sistema a otro. Los sistemas analógicos que operan con canales de 25 y 30 KHz necesitan una relación señal a interferencia de aproximadamente 18 dB. Esta relación señal a interferencia umbral marca la distancia mínima que debe existir entre celdas cocanal e impone el número de celdas por agrupación. [19]



**Figura 39: Interferencia cocanal.**<sup>40</sup>

A modo de ejemplo, en la tabla 7, se presenta la relación señal a interferencia ( $SIR$ ) umbral de funcionamiento para distintos sistemas, así como el número de celdas por agrupación resultante para dos configuraciones posibles de disposición

<sup>40</sup> Tomado de: Comunicaciones Móviles; Mónica Gorricho Moreno, Juan Luis Gorricho Moreno, Universidad Politécnica de Cataluña, Pág. 44.

de antenas en estación base, antenas omnidireccionales y antenas sectoriales de 120° de diagrama de radiación. Además, se apuntan reducciones en el *SIR* umbral utilizando alguna técnica complementaria de diversidad. [19]

Sistema	Analógico		GSM		IS-54		JDC	
	<i>SIR</i> umbral	18 dB		11 dB	9 dB	16 dB	12 dB	17 dB
Celdas por agrupación	Omni.	120°	120°	F.H. <sup>(1)</sup>	120°	D.A. <sup>(2)</sup>	120°	D.A. <sup>(2)</sup>
	12	7	4	3	7	4	7	4

(1) F.H. : *Frequency Hopping*.

(2) D.A. : *Diversidad en antena*.

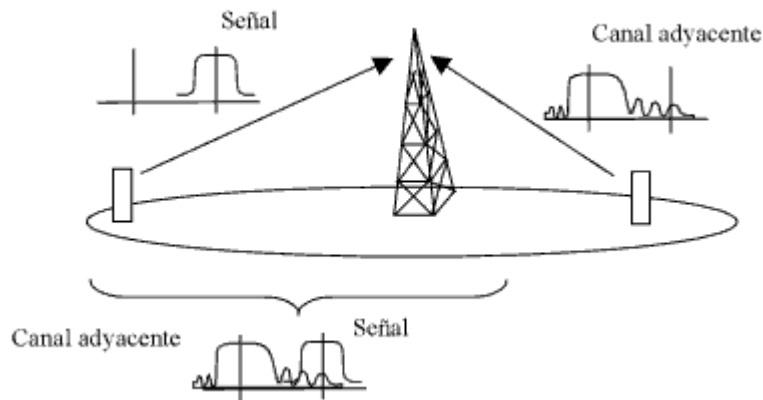
**Tabla 7: Características de los sistemas.** <sup>38</sup>

La gran diferencia que se observa en el cociente señal útil a señal interferente umbral entre los sistemas, se debe básicamente al ancho de banda equivalente utilizado para la comunicación. Para el sistema GSM el canal es de 200 KHz y sobre este se multiplexan temporalmente 8 comunicaciones, ancho de banda equivalente por comunicación de 25 KHz. Para el sistema IS-54 el canal es de 30 KHz, y se multiplexan 3 comunicaciones, el ancho de banda equivalente es de 10 KHz. Para el sistema JDC el canal es de 25 KHz, y se multiplexan 3 comunicaciones, el ancho de banda equivalente es de 8.3 KHz. Los sistemas que utilizan menos ancho de banda por comunicación, de igual forma transmiten menos información y la comunicación es más vulnerable a errores. Entonces necesitan una relación señal a interferencia superior para asegurar la misma calidad de servicio. [19]

#### B. Interferencia de canal adyacente

Esta interferencia se genera por comunicaciones establecidas en la misma celda o en celdas vecinas que utilizan una frecuencia adyacente a la utilizada por la comunicación en curso. Generalmente son causadas por imperfecciones en el diseño de los sistemas de modulación, filtrado y etapa de potencia. La antena receptora recibe la potencia de señal de la comunicación que tiene establecida en un canal, y parte de la potencia que se emite en canal adyacente que sobrepasa los límites del canal. [19]





**Figura 40: Interferencia de canal adyacente.**<sup>41</sup>

## 5.16 EL SISTEMA GSM

*Global System for Mobile communications*, es el sistema de telefonía móvil de segunda generación más usado en todo el mundo. Fue estandarizado por la ETSI (European Telecommunications Standard Institute) entre 1982 y 1992, sistema de acceso FDD/FDMA/CDMA.

### 5.16.1 Arquitectura del sistema GSM

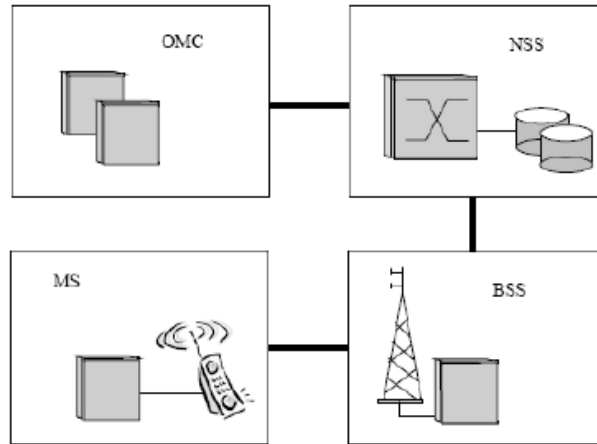
El sistema GSM se compone de cuatro bloques que engloban el conjunto de elementos de la jerarquía del sistema. Cada uno de estos bloques, desempeña funciones específicas para ofrecer el servicio de telefonía móvil al usuario final. Los cuatro subsistemas son [19]:

- La estación móvil (MS)
- El subsistema de estación base (BSS)
- El subsistema de conmutación y de red (NSS)
- El subsistema de operación y mantenimiento (MNS)

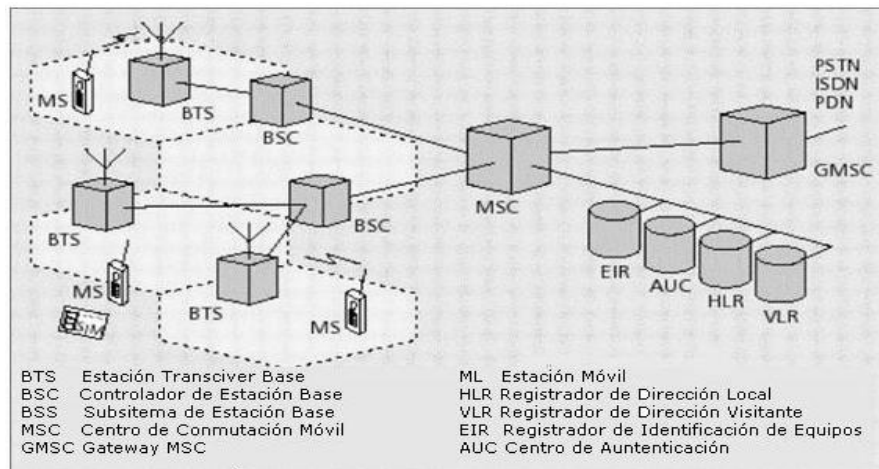
En la estación móvil se encuentran los elementos utilizados por el abonado del servicio. El subsistema de estación base comprende los elementos que desempeñan las funciones específicas de interconexión radio con la estación móvil. El subsistema de conmutación y de red realiza las operaciones de

<sup>41</sup> Tomado de: Comunicaciones Móviles; Mónica Gorriño Moreno, Juan Luis Gorriño Moreno, Universidad Politécnica de Cataluña, Pág. 46.

interconexión con otras redes de telefonía y de gestión de la información del abonado. El subsistema de operación y mantenimiento supervisa el funcionamiento del resto de bloques. [19]



**Figura 41: Diagrama de bloques del sistema GSM.<sup>42</sup>**

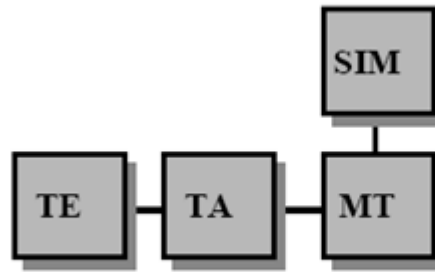


**Figura 42: Arquitectura de red del sistema GSM.<sup>40</sup>**

#### A. La estación móvil (MS)

Se compone del terminal móvil (MT), La tarjeta SIM (Subscriber Identity Module), el adaptador de terminal (TA) y un equipo terminal de datos (TE). [19]

<sup>42</sup> Tomado de: Comunicaciones Móviles; Mónica Gorriño Moreno, Juan Luis Gorriño Moreno, Universidad Politécnica de Cataluña, Pág. 72.



*MT: Terminal Móvil      SIM: Módulo de Identificación Subscriptor  
TA: Adaptador Terminal TE: Equipo Terminal*

**Figura 43: Elementos de la estación móvil.**<sup>43</sup>

La principal función del subsistema de estación móvil, es el acceso a la red GSM a través del interfaz radio y la disposición de un interfaz de usuario para el establecimiento de las comunicaciones de voz o con un equipo terminal en el caso de establecer comunicaciones de transmisión de datos. [19]

#### *Terminal móvil (MT)*

Para que este elemento sea operativo debe incluir una tarjeta SIM, modulo de identidad del abonado. Sin la SIM solo se pueden realizar llamadas de emergencia al no poder ser tarificadas las llamadas de otro tipo. [19]

#### *Modulo de identidad del abonado (SIM)*

La SIM es una tarjeta inteligente que contiene información permanente relativa al abonado del servicio, información temporal de utilidad para el funcionamiento del servicio y también información introducida por el propio abonado. [19]

El poder extraer la tarjeta SIM del terminal móvil ofrece al abonado la posibilidad de cambiar de terminal móvil de forma transparente para el operador, las características del terminal móvil son comunicadas al sistema cuando este es encendido como parte del dialogo inicial con la red. [19]

La tarjeta SIM contiene entre otras informaciones dos números de seguridad para evitar usos indebidos, el PIN (Personal Identity Number) y el PUK (Personal Unblocking Key). Antes de que el terminal móvil pueda ser utilizado, el usuario debe introducir su número de identificación personal (PIN), que consta de cuatro dígitos y se almacena en la tarjeta. Si introduce el PIN erróneamente tres veces seguidas, la tarjeta se bloquea y no puede ser utilizada hasta desbloquearla. Para

<sup>43</sup> Tomado de: Comunicaciones Móviles; Mónica Gorricho Moreno, Juan Luis Gorricho Moreno, Universidad Politécnica de Cataluña, Pág. 73.

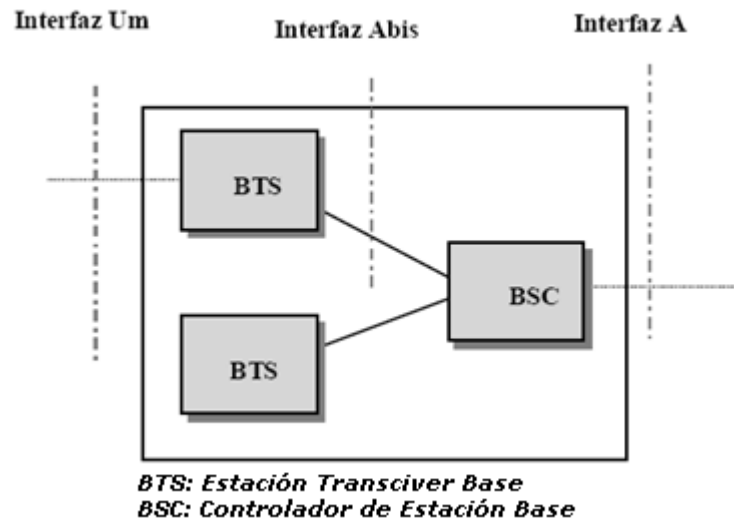
ello debe introducir una clave de desbloqueo personal (PUK) que consta de ocho dígitos. [19]

#### *El adaptador de terminal (TA)*

Este elemento es el que permite la conexión del móvil con un equipo terminal de datos. En la actualidad el equipo de adaptador de terminal para la mayoría de teléfonos móviles está incorporado en el propio teléfono. [19]

#### B. Subsistema de estación base (BSS)

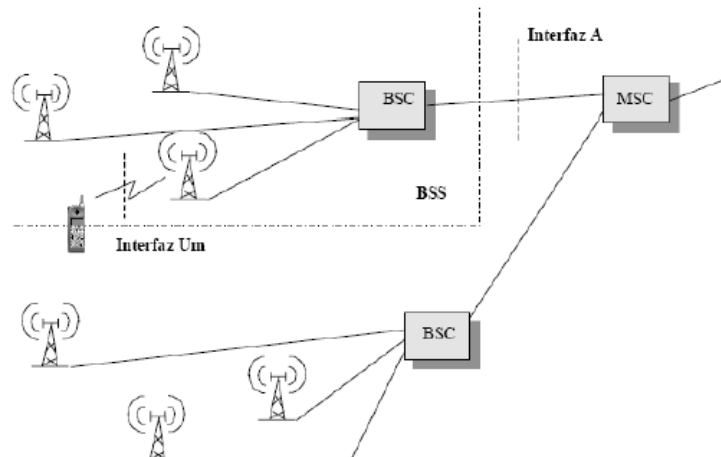
El BSS agrupa la infraestructura específica de los aspectos de radio para el sistema GSM. Este subsistema se compone de estaciones base (BTS) conectadas a una estación controladora de BTS's, la denominada BSC (controlador de estación base). [19]



**Figura 44: Subsistema de estación base.**<sup>44</sup>

La unidad BTS es la parte del subsistema BSS que dispone de los dispositivos para la transmisión y recepción de radio, incluyendo las antenas. Realiza las tareas de conformación de la señal a transmitir vía radio y de recuperación de la señal radio en recepción y además realiza el procesado digital de la señal, codificación de canal, entrelazado, etc. Se ubica en el centro de la celda y la potencia máxima emitida determina el tamaño de la celda. Una estación base dispone entre uno y doce transceptores (TRX), cada uno de ellos opera sobre una de las frecuencias GSM asignadas al operador. [19]

<sup>44</sup> Tomado de: Comunicaciones Móviles; Mónica Gorricho Moreno, Juan Luis Gorricho Moreno, Universidad Politécnica de Cataluña, Pág. 74.



**Figura 45: Ubicación del sistema BSS.** <sup>45</sup>

La unidad BSC se encarga de administrar los recursos radio mediante el comando remoto de las BTS. Su función consiste en la asignación y liberación de los canales radio, así como en la gestión y el traspaso de llamada cuando este se produce entre estaciones base dependientes de la misma BSC. También cifra la comunicación y ejecuta algoritmos de transmisión discontinua, mediante la detección de los periodos de actividad y silencio en las comunicaciones. [19]

La unidad BSC está conectada por un lado con varias BTS, controlando los recursos de todas ellas, y por otro con un elemento de conmutación MSC (Mobile Switching Center) para el encaminamiento de las llamadas hacia la red. [19]

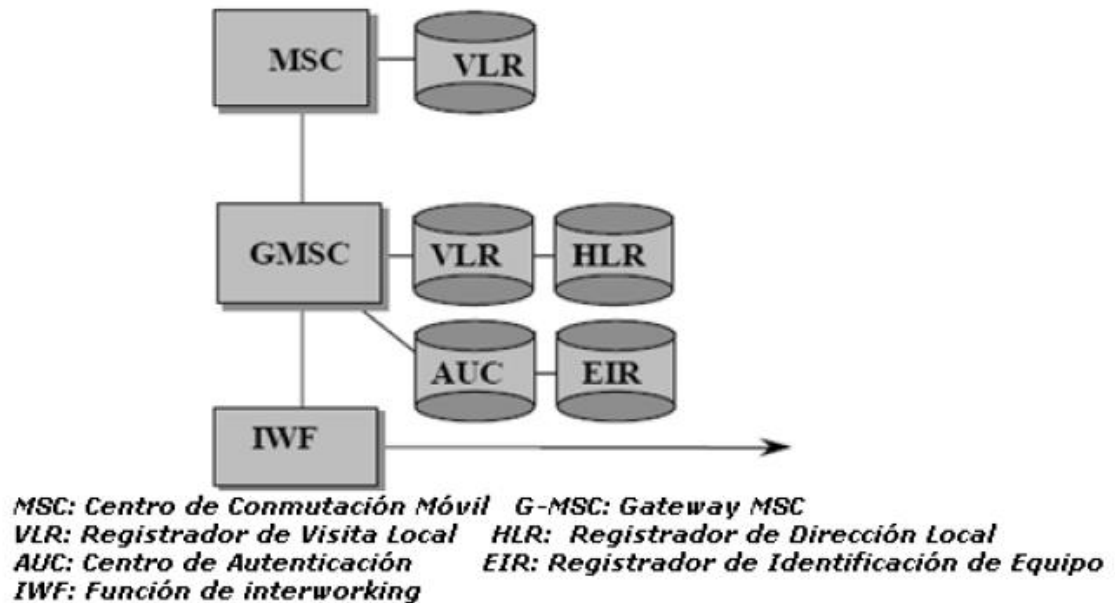
### C. Subsistema de red y conmutación (NSS)

El subsistema NSS (Network Switching System) realiza las funciones de conmutación y encaminamiento de las llamadas en el sistema GSM, además de la gestión de las bases de datos con la información relativa a todos los abonados al servicio. También se encarga de establecer la comunicación entre usuarios móviles mediante la conmutación interna de red de un operador o entre usuarios del sistema GSM y usuarios de otras redes de telefonía, fija o móvil, de otros operadores. [19]

Dentro del subsistema NSS las funciones de conmutación las realizan las centrales de conmutación (MSC y GMSC). La unidad MSC es el elemento de conmutación interno de la red GSM y la unidad GMSC (Gateway Mobile Switching Center) es el elemento de interconexión con otras redes. La gestión de las bases

<sup>45</sup> Tomado de: Comunicaciones Móviles; Mónica Gorriño Moreno, Juan Luis Gorriño Moreno, Universidad Politécnica de Cataluña, Pág. 76.

de datos realiza el registro central de abonados (HLR) y el registro de posiciones visitante (VLR). [19]



**Figura 46: Subsistema de red y conmutación.** <sup>46</sup>

El GMSC (*Gateway MSC*), dispone de funciones de adaptación para la interconexión con otras redes como [19]:

- PSPDN (*Redes de datos Pública de Conmutación de Paquetes*)
- CSPDN (*Redes de Datos Pública de Conmutación de Circuitos*)
- PSTN (*Red de telefonía Pública Conmutada*)
- ISDN (*Red Digital de Servicios Integrados*)

El subsistema NSS utiliza como protocolo de transporte de señalización el *Signalling System Nº 7 (SS7)*. Este protocolo es utilizado también por otras redes de comunicación que no son GSM (como las mencionadas anteriormente), de este modo se simplifica la interconexión con éstas. [7]

#### *Gestión de los datos de usuario*

La unidad HLR (*Home Location Register*) es una base de datos que contiene toda la información relativa a los abonados de un operador GSM. En un principio solo se usaba un HLR que daba servicio a todo el sistema, pero en la actualidad los

<sup>46</sup> Tomado de: Comunicaciones Móviles; Mónica Gorriño Moreno, Juan Luis Gorriño Moreno, Universidad Politécnica de Cataluña, Pág. 78.

operadores cuentan con un elevado número de abonados, obligándolos a usar más de un HLR repartidos estratégicamente por el territorio donde se ofrece el servicio. [19]

El HLR almacena datos temporales y permanentes. Entre los permanentes se tienen diferentes identificadores del móvil, así como el perfil del servicio contratado por el abonado. Entre los temporales se almacenan los relacionados con la localización del móvil, registros de tarificación, identificadores temporales, llaves de autenticación y cifrado, etc. [19]

El VLR es el registro de posiciones visitante y contiene información temporal de los móviles que están localizados en un área geográfica concreta. La información del VLR es una repetición sesgada de la información de un abonado contenida en el HLR completada con información temporal relativa a la ubicación en ese momento del terminal móvil. [19]

#### D. Subsistema de operación y mantenimiento (OSS)

Las acciones de operación y mantenimiento se llevan a cabo con el fin de conseguir el buen funcionamiento del sistema GSM, ya se solucionando los problemas y fallos que aparezcan o monitorizando la configuración de los equipos.

La gestión y mantenimiento se puede realizar de forma local o remota. Para redes de tamaño considerable la gestión remota se convierte en una necesidad. [19]

Existen tres dominios según el equipo de gestión considerado [19]:

- Medidor operador-equipo. Los equipos se denominan OMC (Operation and Maintenance Centers).
- Control de la subscripción. Control de datos del abonado y la tarificación.
- Operación y mantenimiento. Además de realizar la gestión en la red, incluye el control de las estaciones móviles.

El Network Management Center (NMC) es responsable de la gestión de toda la red como conjunto. Recibe información de los dispositivos que forman la red a través de los OMC y gestiona los aspectos relacionados con la interconexión con otras redes. [19]

El NMC permite controlar las redes regionales por acceso remoto, reduciendo de este modo el coste total de supervisión y mantenimiento de la red. [19]

Las funciones más relevantes realizadas por el NMC son [19]:

- Proporcionar la operación integrada de toda la red al tener información de la misma como conjunto.
- Monitorizar las alarmas de alto nivel de la red.
- Presentar el estado de todas las redes regionales.
- Proporcionar una gestión del tráfico en toda la extensión de la red.
- Monitorizar el estado de los controles automáticos aplicados a los equipos de la red como respuesta a una condición de sobrecarga.

### 5.16.2 Funcionamiento del sistema GSM

Los diferentes sistemas de telefonía móvil de segunda generación conservan grandes similitudes entre sí, como sistemas móviles celulares. El carácter celular conlleva la incorporación de una serie de funcionalidades que son comunes: el traspaso de llamada entre celdas, la localización de un terminal móvil para el establecimiento de una llamada dirigida hacia este, el acceso a la red por parte del terminal móvil para solicitar un canal de señalización, etc. [19]

El conjunto de funcionalidades o procedimientos asociados al sistema GSM se clasifican en tres grupos o planos de gestión: gestión de los recursos de radio, gestión de la movilidad y gestión de las comunicaciones. [19]

**Gestión de los recursos de radio:** administra el conjunto limitado de canales de radio asignado al operador GSM correspondiente. La asignación de un canal de radio se hace durante el establecimiento de una comunicación. El canal de radio es utilizado durante el tiempo de la comunicación, y cuando esta concluye se libera para poder ser asignado a otros usuarios que lo soliciten. [19]

**Gestión de la movilidad:** comprende los procedimientos de localización y seguimiento de los terminales móviles para hacer posible el establecimiento de una comunicación dirigida hacia uno de ellos en cualquier momento. [19]

**Gestión de la comunicación:** se ocupa de los aspectos de señalización de red fija relativos al establecimiento de una comunicación, tarificación y posterior finalización. [19]

### 5.17 EL SISTEMA GPRS

El servicio GPRS (*General Packet Radio Service*) se propone como una extensión del sistema móvil GSM para la transmisión de información mediante la técnica de conmutación de paquetes. La conmutación de paquetes es un mecanismo portador de información más adecuado para los servicios de transmisión de



información intermitente en contraposición a la conmutación de circuitos que da soporte a los servicios de voz. En cualquier caso, el servicio GPRS se entiende como un sistema complementario al sistema GSM tradicional de forma que ambos comparten los mismos canales radio con un reparto de los recursos en función de la demanda de los diferentes servicios ofrecidos por el conjunto. [19]

El sistema de comunicaciones móviles GSM fue diseñado originalmente como sistema digital en sustitución de los sistemas celulares analógicos de primera generación. Al ser un sistema digital se convierte en un sistema más eficiente que sus antecesores, aunque funcionalmente ofrecen los mismos servicios básicos para mantener una continuidad respecto a los sistemas analógicos. De este modo, el sistema GSM mantiene su funcionamiento por conmutación de circuitos para soportar el servicio mayoritario de transmisión de voz, aunque su diseño añade un conjunto de servicios complementarios y servicios de transmisión de datos a baja velocidad aprovechando su carácter digital. Sin embargo, el sistema GSM no fue concebido con intención de ofrecer de forma óptima servicios de transmisión de datos. Es por ello que la necesidad de añadir nuevos servicios provoca la aparición e incorporación del servicio GPRS. Dicho servicio genera un cambio en la forma de utilizar los recursos de radio. Pasar de conmutar circuitos a conmutar paquetes implica que los canales de comunicación son utilizados de forma compartida entre varias comunicaciones y no por una sola comunicación exclusivamente. Esta forma de operar sólo es de utilidad para servicios que no requieren una tasa de transmisión constante. Para las comunicaciones de voz, el codificador de voz genera un flujo de información con una cadencia constante; por tanto, utilizar la técnica de conmutación de paquetes en este caso resulta ineficiente. Para los servicios de transmisión de datos, cuyo flujo de información es variable en el tiempo se puede conseguir una ocupación de los canales de comunicación mucho más eficiente al ser compartidos entre varias comunicaciones, de forma que los periodos de inactividad de una comunicación puedan ser utilizados para la transmisión de información de otras comunicaciones. Por ejemplo, los servicios de acceso a internet, acceso a intranets, servicios de alertas, servicios de posicionamiento, etc. [19]

GPRS, es una extensión del sistema GSM. Es por ello que la disposición de los canales GPRS se hace sobre la estructura de canales GSM. Los canales son compartidos entre las comunicaciones GSM y las comunicaciones GPRS, de manera que el reparto entre ambos servicios puede hacerse en función de la carga de tráfico de cada uno, o según marquen las preferencias del operador. [19]

La técnica de conmutación de paquetes permite realizar una tarificación por volumen de paquetes transmitidos en lugar de una tarificación por tiempo de conexión como ocurre con la conmutación de circuitos. [19]

### **5.17.1 Arquitectura del sistema GPRS**



El servicio GPRS introduce dos nuevos elementos sobre la arquitectura GSM. El elemento MSC, en GSM, se encarga de la conmutación de circuitos, mientras que para la arquitectura GPRS el elemento complementario SGSN (*Serving GPRS Support Node*) realiza la conmutación de paquetes. En GSM la interconexión con otras redes e conmutación la realiza el elemento G-MSC (*Gateway MSC*), y en la arquitectura GPRS se añade el elemento GGSN (*Gateway GPRS Support Node*). La introducción de estos dos nuevos elementos, SGSN y GGSN, degine nuevos interfaces de interconexión con el resto de elementos de red. [19]

Otros elementos de la arquitectura GSM son compartidos por el servicio GPRS, las bases de datos HLR y VLR añaden las informaciones de usuario para dar soporte a los nuevos servicios GPRS y los elementos de gestión de los recursos radio BTS y BSC añaden las funcionalidades del servicio GPRS que hacen posible su uso compartido. [19]

El elemento SGSN (*Serving GPRS Support Node*) se encarga básicamente de las funciones de control de acceso, seguridad y localización de los terminales móviles. El interfaz entre el SGSN y el BSS es el interfaz Gb, interfaz a través del cual se establece todo el dialogo con el terminal móvil. El SGSN gestiona el acceso de los terminales móviles a los servicios GPRS mediante el procedimiento de GPRS *attach*, que establece (como resultado) un contexto de gestión de la movilidad del terminal, de modo que a partir de ese momento el terminal móvil es monitorizado por el sistema para poder iniciar en cualquier momento un contexto de transferencia de información, lo que hará posible el intercambio de información. [19]

### **5.17.2 Funcionalidades del sistema GPRS**

Las funciones operativas del servicio GPRS se pueden agrupar así [19]:

- Funciones de gestión de la movilidad.
- Funciones de gestión de los recursos radio.
- Funciones de gestión a nivel lógico.
- Funciones de transferencia y enrutamiento de los paquetes.
- Funciones de control de acceso a la red.

Las funciones de gestión de la movilidad son las encargadas del seguimiento del terminal móvil para su constante localización geográfica a lo largo del tiempo y verificar su estado o disposición para transmitir o recibir información.

Las funciones de gestión de los recursos de radio hacen referencia al sistema de asignación, mantenimiento y liberación de los canales radio que soportan el

servicio GPRS. Incluyen los aspectos de selección y re-selección de celda, recepción discontinua e interrogación del terminal móvil para iniciar la transferencia de información desde el sistema hacia el terminal móvil. [19]

Las funciones de gestión a nivel lógico hacen referencia al mantenimiento de las comunicaciones establecidas entre el terminal móvil y la red GPRS. [19]

Las funciones de transferencia y enrutamiento hacen posible el encaminamiento de los paquetes dentro de la red GPRS y entre la red GPRS y otras redes de conmutación de paquetes. Estas funciones contemplan los aspectos de enrutamiento, traducción de direcciones, encapsulamiento, compresión, cifrado, etc. [19]

Las funciones de control de acceso a la red, hacen referencia a los aspectos de registro de usuario, autenticación y autorización en la utilización de determinados servicios, así como las funciones de control de admisión en base a criterios de calidad de servicio sobre la nueva comunicación a establecer a las ya existentes. [19]

## **5.18 EL SISTEMA IS-95**

La diferencia esencial entre el sistema de telefonía celular IS-95 y el resto de sistemas móviles de segunda generación se encuentra en la técnica de acceso radio utilizada. En el sistema IS-95 se trata de un acceso FDD/FDMA/CDMA, para el resto de sistemas de segunda generación se utiliza una técnica de acceso FDD/FDMA/TDMA. Esta diferencia en la forma de acceso, hace que gran parte de los mecanismos que constituyen el plano de gestión de los recursos sea diferente entre sistemas. Por el contrario, los procedimientos funcionales del plano de gestión de las comunicaciones y del plano de gestión de la movilidad del sistema IS-95 son similares al resto de sistemas de segunda generación, por lo que los elementos constituyentes y sus funcionalidades a nivel de red fija también son similares. Los aspectos de los planos de gestión de la comunicación y gestión de movilidad son de gran similitud con el funcionamiento del sistema GSM. [19]

El sistema de telefonía celular IS-95 se convierte en un estándar de telefonía móvil de segunda generación americano a mediados de los años noventa. [19]

### 5.18.1 Características básicas del sistema IS-95

	Enlace descendente	Enlace ascendente
<b>Banda frecuencial</b>	869 – 894 MHz	824 – 849 MHz
<b>Método de acceso</b>	FDD/FDMA/CDMA	FDD/FDMA/CDMA
<b>Patrón de reuso frecuencial</b>	N = 1, sectorial	N = 1, sectorial
<b>Chip rate</b>	1,2288 Mcps	1,2288 Mcps
<b>DS-spreading</b>	período $2^{15}-1$	período $2^{15}-1$
<b>Scrambling</b>	$2^{42}-1$	$2^{42}-1$
<b>Modulación</b>	QPSK con Walsh Orthogonal covering	OQPSK con señalización ortogonal 64-aria
<b>FEC</b>	$r = 1/2$ , K =9, convolucional	$r = 1/3$ , K =9, convolucional
<b>Entrelazado</b>	En bloque de 20 ms.	En bloque de 20 ms.
<b>Codificación de voz</b>	Q-CELP: 9.6, 4.8, 2.4, 1.2 Kbps	Q-CELP: 9.6, 4.8, 2.4, 1.2 Kbps
<b>Duración trama</b>	20 ms.	20 ms.
<b>Receptor</b>	Rake de 4 brazos	Rake de 3 brazos
<b>Diversidad</b>	En frecuencia, espacio y tiempo	En frecuencia, espacio, tiempo y antena

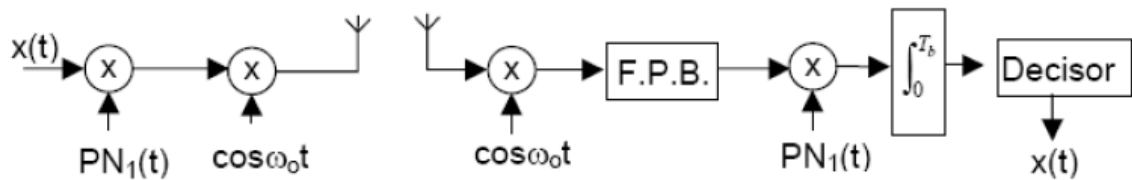
**Tabla 8: Características del sistema IS-95.** <sup>48</sup>

### 5.18.2 Principios básicos de los sistemas celulares CDMA

El funcionamiento de los sistemas CDMA se basa en la utilización de una banda frecuencial muy superior a la estrictamente necesaria para la transmisión de la información deseada. Esto se consigue mediante la multiplicación de la señal de información con una secuencia pseudoaleatoria de variación mucho más rápida que la señal original, de modo que el resultado es una señal con el espectro frecuencial ensanchado. [19]

En recepción se realiza la operación complementaria para recuperar la señal original. Se multiplica de nuevo la señal recibida por la misma secuencia pseudoaleatoria sincronizada en el tiempo con la secuencia pseudoaleatoria inicial y de este modo se recupera la señal de información de partida. [19]

<sup>48</sup> Tomado de: Comunicaciones Móviles; Mónica Gorriño Moreno, Juan Luis Gorriño Moreno, Universidad Politécnica de Cataluña, Pág. 89.



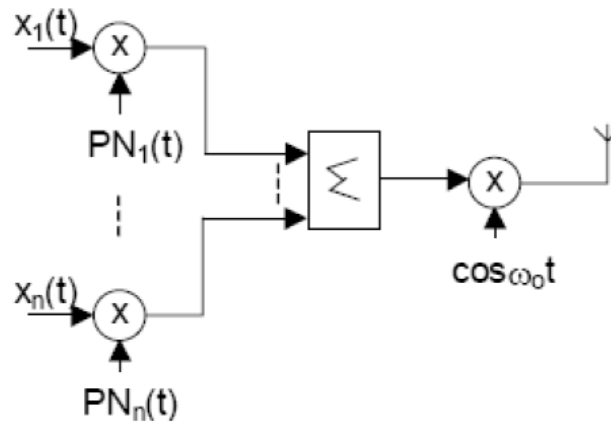
**Figura 48: Principio de funcionamiento de los sistemas CDMA.**<sup>49</sup>

En la Figura 48, se observa como la señal ensanchada es utilizada para modular la señal portadora  $\cos \omega_0 t$ , para posteriormente emitirla por la antena. En recepción se supone que tanto la señal  $\cos \omega_0 t$  como  $PN1(t)$ , generadas localmente, han sido sincronizadas con la señal recibida. Tras demodular la señal recibida, esta se pasa por un filtro pasa bajo (F.P.B.) para eliminar los armónicos y quedarse solo con la señal en banda base. La señal a la salida del filtro se multiplica por la secuencia pseudoaleatoria generada localmente  $PN1(t)$ , de manera que se obtiene la señal original  $x(t)$ . Como dicha señal no varía durante el tiempo de bit ( $T_b$ ), se puede integrar durante este tiempo para obtener a la salida del integrador dos valores posibles según si se ha transmitido un "0" o un "1". El decisor es utilizado porque la señal a la salida del integrador vendrá contaminada con el ruido e interferencia añadidos sobre la comunicación, esto hace que la salida del integrador no sean dos valores exactos, de modo que se marca un umbral intermedio entre ambos valores para finalmente decidir el valor del bit recibido. [19]

El uso de esta técnica de transmisión de espectro ensanchado para aplicarla sobre un sistema de telefonía móvil celular conlleva el diseño de un sistema capaz de operar con multitud de comunicaciones simultáneamente. Este es el principio de funcionamiento del multiplexado por división en código CDMA, es decir, la utilización de una secuencia pseudoaleatoria distinta para cada comunicación. Por otra parte, este tipo de comunicaciones son bidireccionales de forma que esta técnica de multiplexado se aplicara de forma separada sobre los enlaces ascendente y descendente, ambos enlaces operaran en bandas frecuenciales distintas siguiendo el modelo de duplexado en frecuencia FDD. [19]

La cadena de comunicación del enlace descendente tiene la parte de transmisión en la estación base. Cada comunicación es multiplicada por una secuencia pseudoaleatoria diferente para posteriormente ser sumadas. La señal resultante se traslada en banda y finalmente es transmitida por antena. [19]

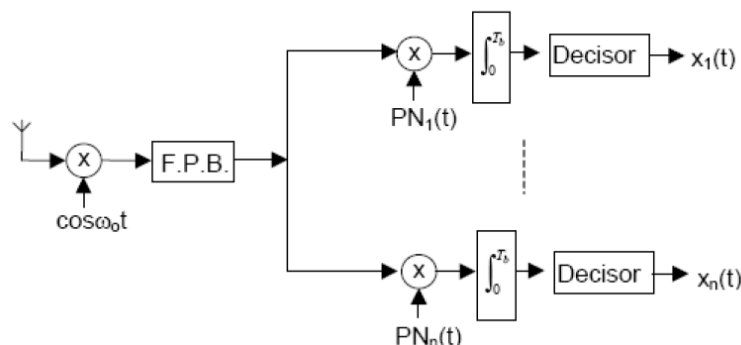
<sup>49</sup> Tomado de: Comunicaciones Móviles; Mónica Gorriño Moreno, Juan Luis Gorriño Moreno, Universidad Politécnica de Cataluña, Pág. 90.



**Figura 49: Funcionamiento de la estación base en el enlace descendente.**<sup>50</sup>

La señal transmitida será recibida por todos los terminales móviles que tienen establecida una comunicación. Cada terminal móvil conoce la secuencia pseudoaleatoria utilizada por la estación base para su comunicación, de modo que dicho terminal móvil utilizará una réplica de la secuencia pseudoaleatoria sincronizada en el tiempo con la emitida desde la estación base, para multiplicar la señal recibida por dicha secuencia pseudoaleatoria. Como resultado de la multiplicación el equipo receptor consigue extraer su señal de información. [19]

El funcionamiento del enlace ascendente es similar. El terminal móvil multiplica la señal de información con una secuencia pseudoaleatoria. Cada terminal móvil utiliza una secuencia diferente. De tal modo que la estación base en recepción debe disponer de una batería de receptores, cada uno de ellos multiplicando la señal recibida por una de las secuencias pseudoaleatorias utilizadas por los terminales móviles. [19]



<sup>50</sup> Tomado de: Comunicaciones Móviles; Mónica Gorriño Moreno, Juan Luis Gorriño Moreno, Universidad Politécnica de Cataluña, Pág. 91.

**Figura 50: Funcionamiento de la estación base en el enlace ascendente.<sup>51</sup>**  
**5.18.3 Funcionamiento del sistema IS-95**

En el sistema IS-95, los canales lógicos se clasifican en canales de control y canales de tráfico, lo mismo que sucede en GSM. Para el enlace descendente se definen tres tipos de canales de control: el canal de señal piloto, el canal de sincronización y los canales de paging o búsqueda de terminales móviles. Para el enlace ascendente el único canal de control es el canal de acceso. El número máximo de canales utilizados por sector de estación base es de 64. Los 64 canales posibles, corresponden a los 64 códigos de Walsh utilizados para la multiplexación de las comunicaciones sobre el enlace descendente. De estos 64 canales, el primero de ellos, código de Walsh 0, se utiliza para la emisión de la señal piloto, señal sin modular de utilidad para la adquisición de la sincronización de portadora por parte de los terminales móviles. Gracias a la señal piloto la demodulación de la señal útil se hace coherentemente. El código de Walsh 32 es utilizado por el canal de sincronización donde se transmite información de divulgación semejante al canal de broadcast del sistema GSM. Los canales de paging ocupan los códigos de Walsh del 1 al 7, en estos canales se emiten los mensajes de búsqueda y confirmación de acceso de modo similar al sistema GSM. [19]

La secuencia pseudoaleatoria de longitud 215-1 utilizada conjuntamente con los códigos de Walsh para el ensanchamiento en espectro sobre el enlace descendente es idéntica para todas las estaciones base. [19]

Se definen 64 secuencias pseudoaleatorias para discriminar hasta 64 estaciones base mediante la utilización de desplazamientos de 511 chips de la secuencia pseudoaleatoria de longitud 215-1, esto es,  $(215-1)/511 = 64$ . A cada estación base se le asigna un offset diferente de la secuencia pseudoaleatoria, estaciones base vecinas tendrán asignados valores de desplazamiento distintos. [19]

Cuando un terminal móvil del sistema IS-95 es encendido, explora los 64 posibles desplazamientos de la secuencia pseudoaleatoria para encontrar las estaciones base de las que recibe mayor nivel de señal. Luego sintoniza el canal de sincronización para recuperar los parámetros del sistema, y de ahí se pasa a la sintonización del canal de paging correspondiente para permanecer a la escucha de búsquedas del terminal. Por otro lado, el terminal móvil accede al sistema a través del canal de acceso para comunicar que ha sido encendido y está operativo. Los procedimientos de *attach/detach*, actualización de posición o establecimiento de una comunicación, etc., se ejecutan de forma similar a como se hace en GSM. [19]

---

<sup>51</sup> Tomado de: Comunicaciones Móviles; Mónica Gorriño Moreno, Juan Luis Gorriño Moreno, Universidad Politécnica de Cataluña, Pág. 91.



El traspaso de llamada para el sistema IS-95 se diferencia del sistema GSM por aplicar la técnica de soft handover. La comunicación se establece inicialmente a través de la estación base de conexión, la cual le proporciona uno de los 64 códigos de Walsh sobre el enlace descendente. Con la comunicación en curso, el terminal móvil monitoriza el nivel de señal recibido de las estaciones base vecinas. Si la diferencia entre el nivel de señal recibido en el terminal móvil de la estación base de conexión y una estación base vecina es menor que un cierto umbral, se indica al sistema que añada la nueva estación base a la comunicación. A partir de ese momento el sistema procede a emitir la misma información a través de las dos estaciones base. Del mismo modo, la señal enviada desde el terminal móvil se recibe separadamente en las dos estaciones base. Un elemento ubicado en un punto superior dentro de la jerarquía de red del sistema se encarga de recoger la información procedente de las dos estaciones base y decidir (combinación selectiva) bloque a bloque, qué información es retransmitida hacia el otro extremo de la comunicación. [19]

### **5.19 EL SISTEMA UMTS (UNIVERSAL MOBILE TELECOMMUNICATIONS SYSTEM)**

La mejora entre los sistemas de primera y segunda generación vino marcada por una importante innovación tecnológica, donde los sistemas analógicos de primera generación fueron sustituidos por los sistemas digitales de segunda generación. Para los sistemas de tercera generación, la utilización de un acceso CDMA frente al acceso TDMA usado en GSM podría considerarse la característica tecnológica que distingue a unos sistemas de otros. Sin embargo, el sistema IS-95 con acceso CDMA es un sistema de segunda generación alternativo a los sistemas de acceso TDMA, de modo que la justificación como innovación tecnológica de la técnica de acceso no es tan evidente. [19]

Las características de funcionamiento para los nuevos servicios son de diferente índole, aunque los parámetros básicos siempre están relacionados con la disponibilidad de diferentes velocidades de transmisión y la acotación de los retardos de operación. Además, la complejidad de las aplicaciones a las que los sistemas de tercera generación deben dar servicio obliga a definir otros requerimientos como la flexibilidad en la caracterización del servicio a ofrecer o el comportamiento de la calidad de servicio durante el traspaso de una comunicación. [19]

Los sistemas de tercera generación deben soportar un determinado rango de velocidades de transmisión dependiendo del entorno de operación del sistema [19]:

- Entorno rural: transmisiones como mínimo de 144 Kbps, pudiendo alcanzar los 384 Kbps.
- Entorno suburbano: como mínimo 384 Kbps, pudiendo alcanzar los 512 Kbps.
- Entorno de interiores o exteriores de corto alcance: como mínimo 2 Mbps.

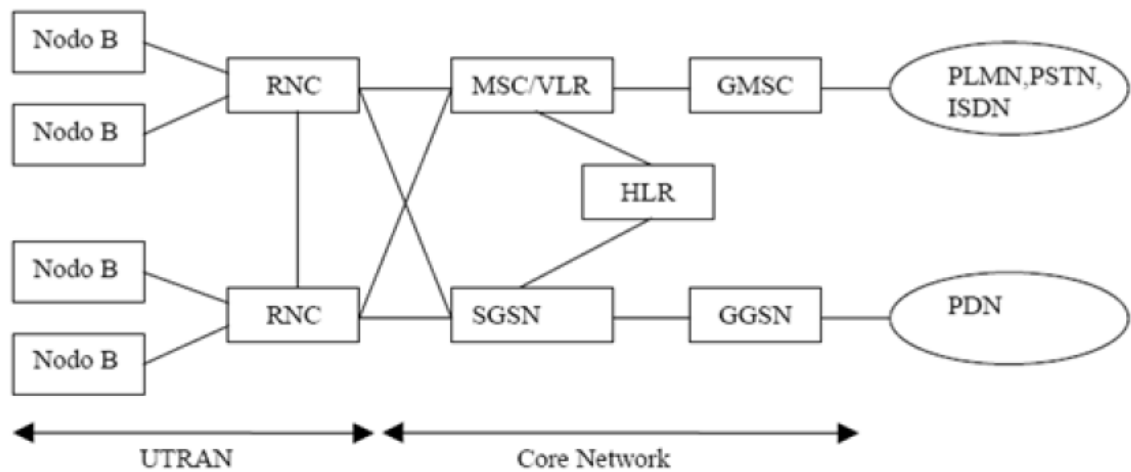
Para cada caso, se impone una velocidad máxima de desplazamiento del terminal móvil acorde con la velocidad mínima de transmisión exigible. [19]

La granularidad en la especificación de las posibles velocidades de transmisión también fue una imposición de funcionamiento del sistema. Se especificó poder variar la velocidad de transmisión en incrementos o decrementos de 100 bps hasta alcanzar la tasa máxima de 2048 kbps. En este sentido, esta premisa de funcionamiento fue una de las motivaciones para la utilización del mecanismo de acceso radio W-CDMA, que finalmente fue escogido para el sistema UMTS gracias a la facilidad con la que se puede variar la velocidad de transmisión por su modo de funcionamiento por ensanchamiento en espectro según un factor variable directamente relacionado con la velocidad de transmisión de datos deseada. [19]

### **5.19.1 Arquitectura del sistema UMTS**

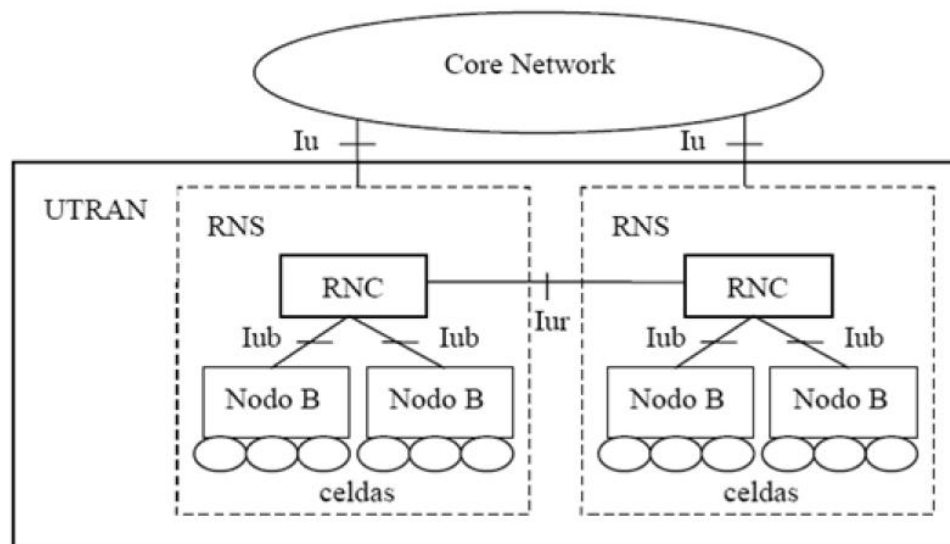
El sistema UMTS se compone de dos grandes bloques, el bloque UTRAN (*UMTS Terrestrial Radio Access Network*) que comprende todas las funciones relativas a los aspectos radio del sistema, y el bloque CN (*Core Network*) encargado de las funcionalidades de red fija. El bloque UTRAN corresponde a una nueva tecnología de acceso radio completamente diferente a la de su antecesor, el sistema GSM. Por el contrario, el bloque CN se plantea como una adaptación del bloque de red fija del sistema GSM, con intención de reutilizar los elementos de red y sus funcionalidades en la medida de lo posible. [19]

El bloque UTRAN se compone de conjuntos RNS (*Radio Network Systems*) conectados a la *Core Network* mediante el interfaz Iur, Figura 52. Un bloque RNS se compone del nodo RNC (*Radio Network Controller*), elemento controlador de la red radio, que a su vez se interconecta a uno o varios Nodos B. El Nodo B es el elemento controlador de varias estaciones base. [19]



**MSC:** Centro de Conmutación Móvil  
**VLR:** Registrador de Dirección Visitante  
**GMSC:** Gateway del MSC  
**HLR:** Registrador de Dirección Local  
**RNC:** Controlador de la Red de Radio  
**PLMN, PSTN:** Redes Públicas Conmutadas de Conmutación y Datos  
**ISDN:** Red Digital de Servicios Integrados  
**PDN:** Red de Paquete de Datos

Figura 51: Arquitectura UMTS.<sup>52</sup>



**RNS:** Sistema de Red de Radio  
**RNC:** Controlador de Red de Radio

<sup>52</sup> Tomado de: Comunicaciones Móviles; Mónica Gorricho Moreno, Juan Luis Gorricho Moreno, Universidad Politécnica de Cataluña, Pág. 98.

**Figura 52: Bloque UTRAN.<sup>50</sup>**

Cada RNS constituye un bloque de acceso radio con autonomía casi completa para la gestión de los aspectos radio de las comunicaciones móviles que tiene a su cargo, es por ello que un bloque RNS (se supone) puede dar servicio a un área geográfica de dimensiones considerables. [19]

El nodo RNC (*Radio Network Controller*) gestiona uno o más nodos B, realizando las funciones de control de congestión, control de admisión y ubicación de códigos para las nuevas comunicaciones de todas las celdas que tiene a su cargo. Las tareas realizadas son similares a las que se dan para el elemento BSC en el sistema GSM, pero de una complejidad superior por la naturaleza de los servicios definidos para UMTS. Los protocolos de gestión de los recursos radio con origen en el terminal móvil acaban en la mayoría de los casos en el nodo RNC, si no lo hacen en algún nodo intermedio, de forma que la red fija a través del interfaz Iur es desconocedora del funcionamiento del mecanismo de acceso radio. Los protocolos de comunicación definidos sobre el interfaz Iur hacen referencia a los aspectos de conmutación, encaminamiento y gestión del servicio, como si fuese un sistema de comunicaciones de red fija. [19]

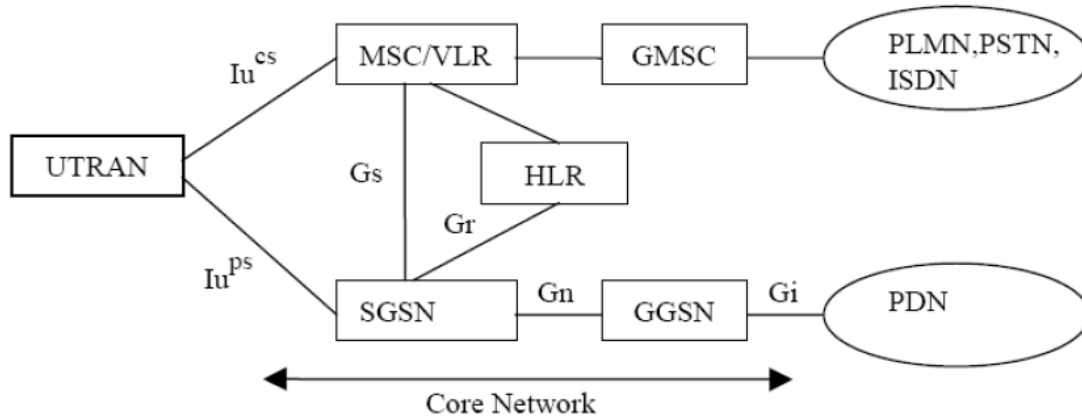
El nodo B realiza conforma la señal a transmitir vía radio y recupera la correspondiente señal en recepción, es decir, tareas de codificación de canal, entrelazado, adaptación de velocidades de transmisión, ensanchamiento en espectro, etc., aunque también realiza algunas tareas de gestión de los recursos radio de las celdas que tiene a su cargo. [19]

Esta arquitectura permite gestionar de manera eficiente el mecanismo de *soft handover* para el traspaso de llamada. En la mayoría de los casos las estaciones base que participan en una comunicación, estaciones base que constituyen el *conjunto activo*, pertenecerán al mismo Nodo B, de forma que la gestión se realiza desde éste. Si no es el caso, la gestión se realiza desde el nodo RNC manteniendo la comunicación simultáneamente a través de dos interfaces Iub. Para el caso de realizarse un traspaso de llamada entre dos estaciones base que pertenecen a bloques RNS diferentes, no se podrá utilizar la técnica de *soft handover* y se tendrá que recurrir a la realización de un *hard handover*. [19]

### **5.19.2 Infraestructura de red UMTS**

La infraestructura de red fija del sistema UMTS comprende dos dominios. El dominio de conmutación de circuitos y el dominio de conmutación de paquetes, los cuales hacen referencia a la agrupación genérica en dos bloques de los servicios que ofrece el sistema UMTS. Por otra parte, el *Core Network* de UMTS fue diseñado con intención de constituir una adaptación de la arquitectura de red fija del sistema GSM y en este sentido el sistema GSM también distingue dentro de su arquitectura los elementos que dan soporte a los servicios de conmutación de circuitos frente a los que ofrecen los servicios de conmutación de paquetes. Estos

últimos quedan incluidos bajo la arquitectura GPRS. De este modo, se conforman para UMTS dos sistemas funcionales de red fija de operación disjunta que trabajan en paralelo, lo cual no quiere decir que físicamente no compartan elementos de red, por ejemplo, elementos de conmutación o de almacén de información. [19]



**Figura 53: Infraestructura de red UMTS.**<sup>53</sup>

Las características funcionales de los elementos que constituyen el CN son equivalentes a las del sistema GSM, ya sea para la arquitectura de conmutación de circuitos como para la de conmutación de paquetes, de modo que en ambos casos se hace mención a los mismos elementos de conmutación: en conmutación de circuitos el *Mobile Switching Center* (MSC), en conmutación de paquetes el *Serving GPRS Support Node* (SGSN) y el *Gateway GPRS Support Node* (GGSN). Para las funcionalidades de gestión de los datos de abonado, servicio de *roaming*, tarificación, etc., se dispone de los elementos *Home Location Register* (HLR) y *Visited Location Register* (VLR) como constituyentes de la arquitectura CN. [19]

La adaptación del bloque CN del sistema UMTS partiendo de la infraestructura de red GSM es más transparente a nivel de transporte para el dominio de conmutación de paquetes que para el de conmutación de circuitos. Esto es así porque en el dominio de conmutación de paquetes el sistema GSM a través de la arquitectura GPRS ya contempla la utilización de la tecnología más reciente en cuestión de transporte y encaminamiento de la información, utilizando redes ATM para la interconexión de elementos, así como protocolos de comunicación como el *mobile IP* para la gestión de la movilidad. Esto tiene sentido al considerar que la arquitectura GPRS es de reciente implantación por parte de los operadores, mientras que la arquitectura de conmutación de circuitos GSM es más antigua. [19]

<sup>53</sup> Tomado de: Comunicaciones Móviles; Mónica Gorriño Moreno, Juan Luis Gorriño Moreno, Universidad Politécnica de Cataluña, Pág. 100.

## 6. ANTENAS INTELIGENTES

### 6.1 INTRODUCCION

Las antenas en general son una parte muy importante en un sistema de comunicaciones móviles o inalámbricas. Por esta razón, se han desarrollado varios modelos de antenas para mejorar el desempeño del sistema, las más utilizadas son las de tipo Monopolo debido a su facilidad de construcción, bajo costo y buen desempeño tanto en transmisión como en recepción.

El desarrollo tecnológico de los sistemas inalámbricos se ha centrado en lo referente a métodos de acceso al canal y utilización del mismo, en ocasiones subestimando las antenas. Pero el rápido crecimiento del número de usuarios del sistema de comunicaciones móviles y la llegada de los sistemas de tercera generación que requieren altas tasas binarias de transmisión, hacen imprescindible la implementación de nuevas tecnologías, incluyendo las antenas transmisoras y receptoras, que permitan aumentar la capacidad del sistema y mejorar la recepción de la señal.

Las antenas inteligentes surgen como una buena alternativa para aliviar los requerimientos de alta capacidad en sistemas de comunicaciones inalámbricas; además reducen efectivamente inconvenientes ocasionados por la multi-trayectoria y la interferencia cocanal, esto lo logran focalizando la radiación solo en la dirección deseada y ajustándose según las variaciones en la intensidad de tráfico. Estas características son las que definen e identifican las antenas inteligentes, que básicamente son arreglos de antenas que poseen la capacidad de variar o ajustar su patrón de radiación según las necesidades. El sistema funciona de tal forma que cuando el usuario se desplaza, se modifica la dirección del lóbulo para que se mueva con él. [21]

Entre las principales limitantes para la implementación de esta tecnología se pueden mencionar: el incremento en los costos, la complejidad (gran cantidad de tráfico y poco tiempo disponible para cálculos complejos) y la necesidad de realizar algunos cambios en las redes para obtener los mejores resultados. [21]

## 6.2 ANTENAS INTELIGENTES EN LAS REDES WIRELESS

Las redes inalámbricas o wireless han aumentado su consumo gracias a precios más bajos y a numerosos usuarios que ven día a día las enormes posibilidades de esta tecnología. Tanto así que se puede hablar de dependencia por parte de las actividades empresariales e institucionales, por esto la posibilidad de compartir en información sin ser necesaria una conexión física constituye una gran ventaja. La red inalámbrica puede ser más extensa sin tener que mover o instalar cables, esta es una gran ventaja frente a las redes cableadas, además de prestar una mayor movilidad, flexibilidad y reducción de costos.

Los sistemas de antenas inteligentes permiten incrementar la capacidad del sistema, prestar mejor calidad de servicio, control de potencia y mayor duración de las baterías de los terminales portátiles. [25]

Las antenas inteligentes trabajan con una unidad de procesamiento digital de señales (DSP), lo cual le permite generar o seleccionar haces muy directivos enfocados hacia el usuario deseado, en vez de disponer de un diagrama de radiación fijo. [25]

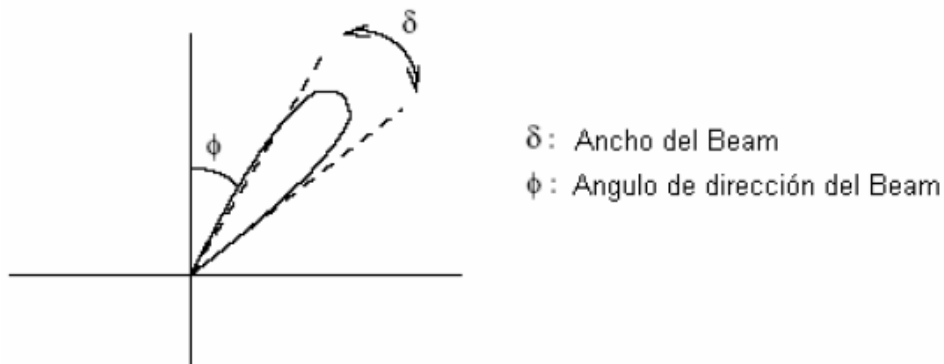
En las antenas inteligentes, cada antena recibe una señal separada y definida. Dependiendo de la configuración del sistema inalámbrico, el receptor puede usar una señal para mejorar la calidad de otra señal, o podría combinar los datos de señales múltiples para ampliar el ancho de banda. La señal que reciben las antenas es una señal de radiofrecuencia (RF) sin procesar. Esta señal se encamina inicialmente a circuitos que la manejan como una señal analógica, tal como un radio. Después del procesamiento inicial, la RF se convierte en una señal digital que luego se envía al dispositivo host como una cadena de datos. [25]

Las antenas inteligentes, también pueden trabajar en dos modos distintos:

*Modo omnidireccional:* en este modo la antena funciona igual que las convencionales, es decir, emite señal con la misma intensidad hacia todas las direcciones. [25]

*Modo direccional:* en este modo, la antena emite señal en una sola dirección y con un cierto ángulo de apertura. De este modo se obtiene un mayor alcance hacia la dirección donde emite la antena debido a que se concentra todo el espectro de potencia en una zona específica. [25]





**Figura 54: Lóbulo de radiación de una antena inteligente.** <sup>54</sup>

Según el modo de trabajo el alcance será uno u otro. Un beam se define como el rango de alcance de la antena en modo direccional para un cierto ángulo de apertura. Según el ángulo de apertura que se utilice habrá más o menos beams.

La característica principal de este tipo de antenas, es que pueden orientar la señal que emiten hacia una cierta dirección donde se encuentra el terminal móvil, con el que se realiza la comunicación.

### 6.3 PRINCIPALES BENEFICIOS DE LAS ANTENAS INTELIGENTES

El principal motivo para implementar antenas inteligentes en una red de comunicaciones móviles es incrementar su capacidad, por medio de la extensión del alcance de la señal, y de esta forma soportar más usuarios por estación base. Esto se logra con la directividad y disminución del ancho del lóbulo de radiación. [22]

Para lograr un mayor alcance se podría suponer un aumento en la potencia de transmisión, pero las antenas inteligentes conservan las mismas características de potencia. El uso de antenas inteligentes da como resultado sistemas directivos de mayor ganancia, localización geográfica del usuario y reducción de la interferencia entre usuarios, lo que se refleja en mejor calidad de señal y mayor alcance. [22]

Las antenas inteligentes permiten tamaños de celdas más grandes (lo que significa menos estaciones base), ayudan a mitigar el impacto de multi-trayectoria. También pueden usarse para señales separadas espacialmente, permitiéndoles a subscriptores diferentes compartir los mismos recursos espectrales, si ellos están

<sup>54</sup> Tomado de: Antenas inteligentes y su desempeño en redes wireless; Cristian Mansilla, Eduardo Muñoz, Néstor Fierro. Revista: Guital Síntesis Tecnológica. V3 N°2, Pág. 97.

espacialmente separados de la estación base. Este acceso múltiple por división de espacio (SDMA), permite a múltiples usuarios operar en la misma celda, en la misma frecuencia o en la misma ranura de tiempo según la tecnología de acceso que se utilice, las antenas inteligentes se encargan de separar las señales. [22]

Incluso se mencionan mejoras en la seguridad, gracias a que la comunicación entre la estación base y el terminal móvil es direccional, no será posible que un equipo externo intercepte la comunicación.

#### 6.4 LA TECNOLOGIA DE ANTENAS INTELIGENTES

Esta tecnología se basa en arreglos de antenas de baja ganancia que son conectados y combinados en la red. [24]

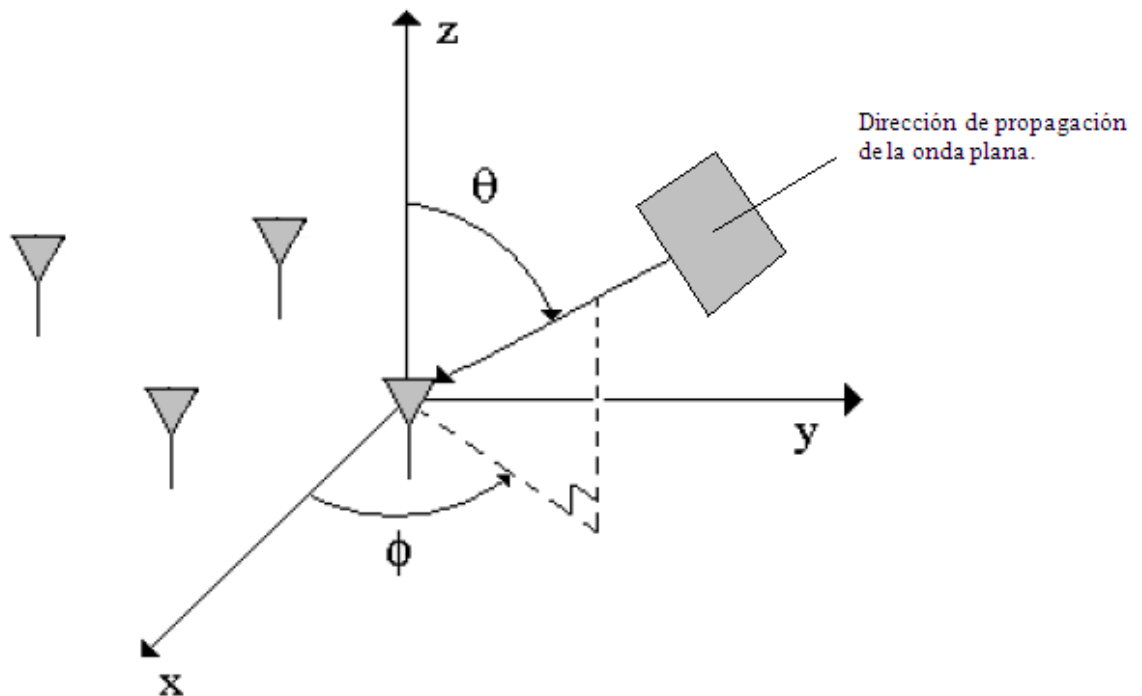


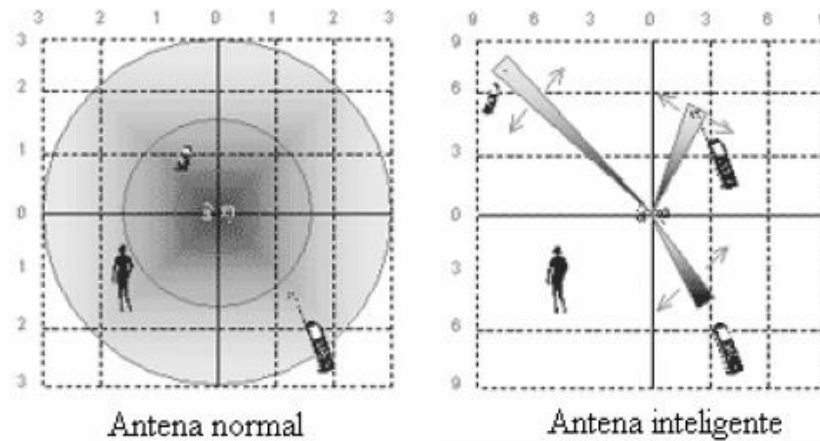
Figura 55: Incidencia de una onda plana sobre una antena.<sup>55</sup>

En la Figura 54, se muestra un arreglo arbitrario de antenas. El ángulo acimutal  $\phi$  y el ángulo zenital  $\theta$  de una onda plana inciden en el arreglo. El horizonte se representa por  $\theta = \pi/2$ . [24]

<sup>55</sup> Tomado de: Smart Antennas for Wireless Communications; Joseph C. Liberti, Theodore S. Rappaport, Prentice Hall, Pág. 84.

Al par de ángulos  $(\theta, \phi)$  se les conoce como, dirección de llegada de la onda plana recibida DOA (*Direction of arrival*). [24]

En las antenas inteligentes, la configuración de los arreglos permite modificar los lóbulos de radiación de la estación base según la conveniencia. Esta característica también resulta beneficiosa para el medio ambiente, por que en vez de radiar energía en todas las direcciones como las antenas tradicionales, envía la señal directamente a cada usuario y solo cuando se requiere el servicio, de esta forma se reduce la contaminación de este tipo, el ahorro energético es significativo y se reduce el número de estaciones base necesarias en una red. [21]



**Figura 56: Radiación de energía.** <sup>56</sup>

El proceso de combinar señales y luego focalizarlas en una dirección, se conoce como conformador de haces digitales (beamforming). Esta técnica permite conseguir una máxima recepción en la dirección del suscriptor deseado, estimando la dirección de llegada (DOA) de la señal de interés mientras que las señales que provienen de otras direcciones son rechazadas. Las antenas inteligentes pueden ser de diferente tipo, según la técnica de conformador de haz (beamforming) empleada, por ejemplo [23]:

*Haz fijo:* es la técnica más simple, el sistema de radiación genera varios haces fijos, apuntando en distintas direcciones tratando de cubrir una determinada zona. La parte inteligente del sistema selecciona el haz que mejor servicio de a cada usuario, de acuerdo a algún parámetro de control como: relación señal a ruido (SNR) o relación portadora e interferencia (C/I). [23]

<sup>56</sup> Tomado de: Estudio de Antenas Inteligentes y Principales aplicaciones en telefónica móvil; Patricio Ortega, Oscar Enríquez, Juan Morales; Escuela Politécnica Nacional de Ecuador; JIEE, Vol. 19, 2005. Pág. 298.

*Haz conmutado:* esta técnica consiste en el uso de un arreglo progresivo que controla las fases que alimentan a cada uno de los dipolos del arreglo de antenas y de esta forma se puede manipular la dirección en la que apunta el lóbulo principal de la antena. [23]

*Haz adaptativo:* esta técnica es el máximo nivel de inteligencia del que se puede dotar un sistema. La salida de cada dipolo recibe un factor de peso, asignado según el algoritmo programado en el sistema, usualmente el patrón de radiación de la antena inteligente presenta un lóbulo principal en la dirección del usuario deseado y mínimos de radiación en las demás direcciones. [23]

En conformadores de haces adaptativos, los pesos óptimos se calculan iterativamente usando algoritmos complejos. Los algoritmos también se pueden clasificar en categorías, basándose en diferentes técnicas. [22]

*Algoritmos basados en la señal de referencia:* estos algoritmos se basan en la minimización del error mínimo cuadrado (MMSE) entre la señal recibida y la señal de referencia. Por esta razón requieren que la señal de referencia esté disponible. Los algoritmos que se basan en la señal de referencia para el cálculo de los pesos son: SMI (*Simple Matriz Inversion*), LMS (*Least Mean Square*), NLMS (*Normal Least Mean Square*) y RLS (*Recursive Least Squares*). [22]

*Algoritmos adaptativos ciegos:* estos algoritmos no requieren señal de referencia, generan por si mismos la señal de referencia requerida a partir de la señal recibida. De este tipo son los algoritmos CMA (*Constant Module Algorithm*). [22]

*Algoritmos con referencia espacial:* esta técnica no requiere el uso de secuencias de entrenamiento, pero necesitan estimar la dirección de llegada (DOA) del usuario deseado y de los usuarios interferentes, lo que supone el uso de otros algoritmos necesarios para hacer dicha estimación. Entre las técnicas utilizadas se encuentran: Maximización de la Relación Señal a Ruido (Max SNR) y Mínima Varianza Restringida (MVDR). [22]

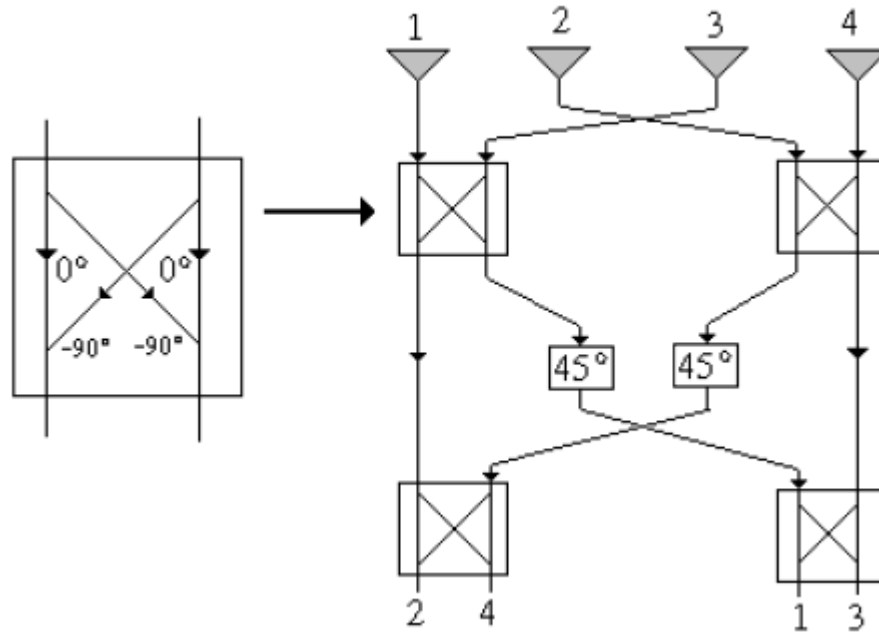
#### **6.4.1 Sistemas de conformador de haces fijos (*Fixed Beamforming networks*)**

Este tipo de redes tienen arreglos de antenas que forman haces directivos fijos. El patrón de radiación del arreglo de antenas depende de varios factores, uno de ellos es el desfase de la señal que alimenta a cada elemento del arreglo. [24]

La matriz de Butler, es una matriz de orden  $M \times M$  y una forma relativamente sencilla de implementar esta red. La Figura 56, muestra un ejemplo de este tipo de matriz cuando se tiene un arreglo conformado por cuatro elementos. [24]

La fase entre elementos se calcula de la siguiente forma [24]:

$Fase\ elemento\ 2 - Fase\ elemento\ 1 = -180^\circ - (-45^\circ) = -135^\circ$   
 $Fase\ elemento\ 3 - Fase\ elemento\ 2 = 45^\circ - (-180^\circ) = 225^\circ = -135^\circ$   
 $Fase\ elemento\ 4 - Fase\ elemento\ 3 = -90^\circ - (45^\circ) = -135^\circ$



**Figura 57: Matriz de Butler con 4 elementos.**<sup>57</sup>

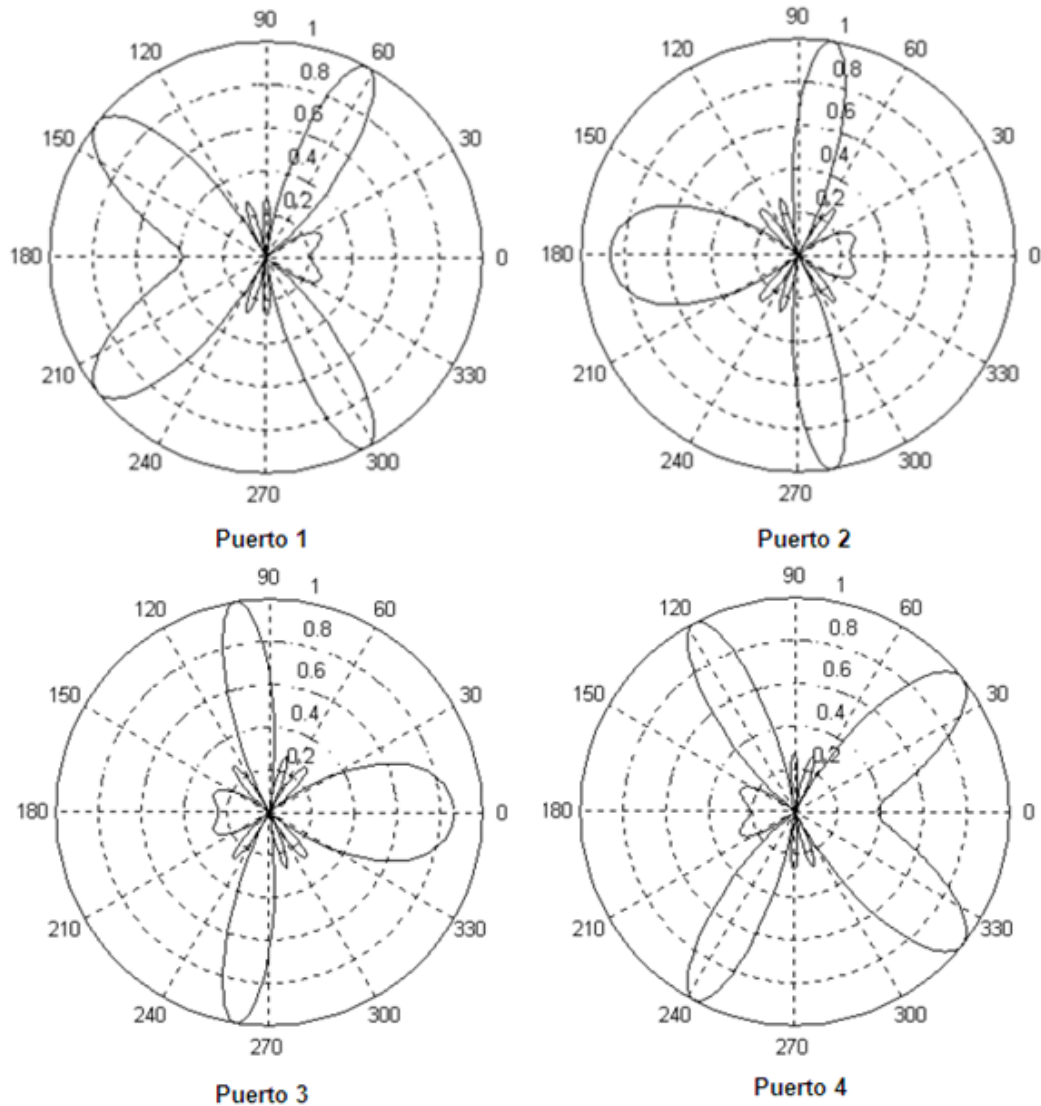
	Elemento 1 (Grados)	Elemento 2 (Grados)	Elemento 3 (Grados)	Elemento 4 (Grados)	Fase entre elementos (Grados)
Puerto 1	-45	-180	45	-90	-135
Puerto 2	0	-45	-90	-135	-45
Puerto 3	-135	-90	-45	0	45
Puerto 4	-90	-45	-180	-45	135

**Tabla 9: Desfase de cada elemento en matriz de Butler de 4 antenas.**<sup>58</sup>

<sup>57</sup> Tomado de: Smart Antennas for Wireless Communications; Joseph C. Liberti, Theodore S. Rappaport, Prentice Hall, Pág. 92.

<sup>58</sup> Tomado de: Smart Antennas for Wireless Communications; Joseph C. Liberti, Theodore S. Rappaport, Prentice Hall, Pág. 93.

Cada puerto tiene un diagrama de radiación exclusivo. Como ejemplo para una frecuencia de 800 Mhz y una distancia de separación entre cada elemento de 30 cm se tienen los diagramas de radiación en la Figura 56. [24]



**Figura 58: Diagrama de radiación.**<sup>54</sup>

Los sistemas de haces fijos utilizan en su mayoría matrices Butler 8 x 8 y 16 x 16, las siguientes figuras muestran el diagrama de alimentación de esos tipos de arreglos. [24]

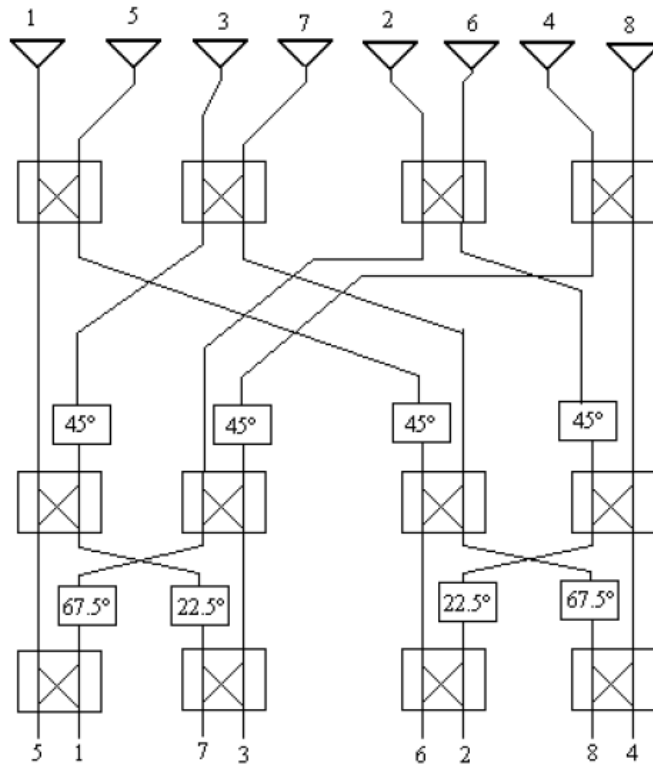
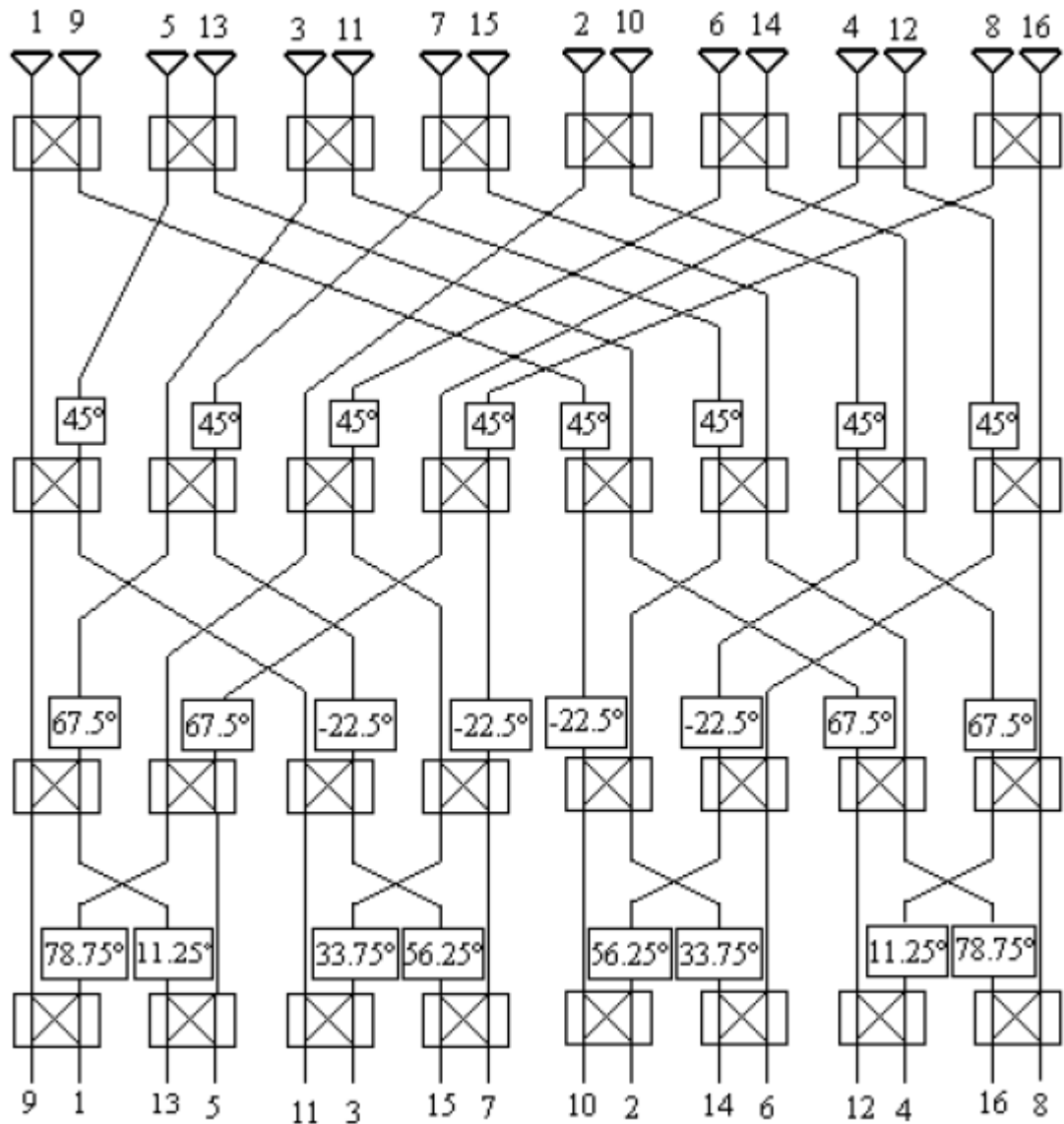


Figura 59: Matriz de Butler con 8 elementos.<sup>59</sup>

	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

<sup>59</sup> Tomado de: Estudio de Antenas Inteligentes y Principales aplicaciones en telefónica móvil; Patricio Ortega, Oscar Enríquez, Juan Morales; Escuela Politécnica Nacional de Ecuador; JIEE, Vol. 19, 2005. Pág. 301.

**Tabla 10: Desfase de cada elemento en matriz de Butler de 8 antenas.<sup>56</sup>**



**Figura 60: Matriz de Butler con 16 elementos.<sup>60</sup>**

<sup>60</sup> Tomado de: Estudio de Antenas Inteligentes y Principales aplicaciones en telefónica móvil; Patricio Ortega, Oscar Enríquez, Juan Morales; Escuela Politécnica Nacional de Ecuador; JIEE, Vol. 19, 2005. Pág. 302.



	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

	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 11: Desfase de cada elemento en matriz de Butler de 16 antenas.<sup>61</sup>**

<sup>61</sup>Tomado de: Estudio de Antenas Inteligentes y Principales aplicaciones en telefónica móvil; Patricio Ortega, Oscar Enríquez, Juan Morales; Escuela Politécnica Nacional de Ecuador; JIEE, Vol. 19, 2005. Pág. 302.

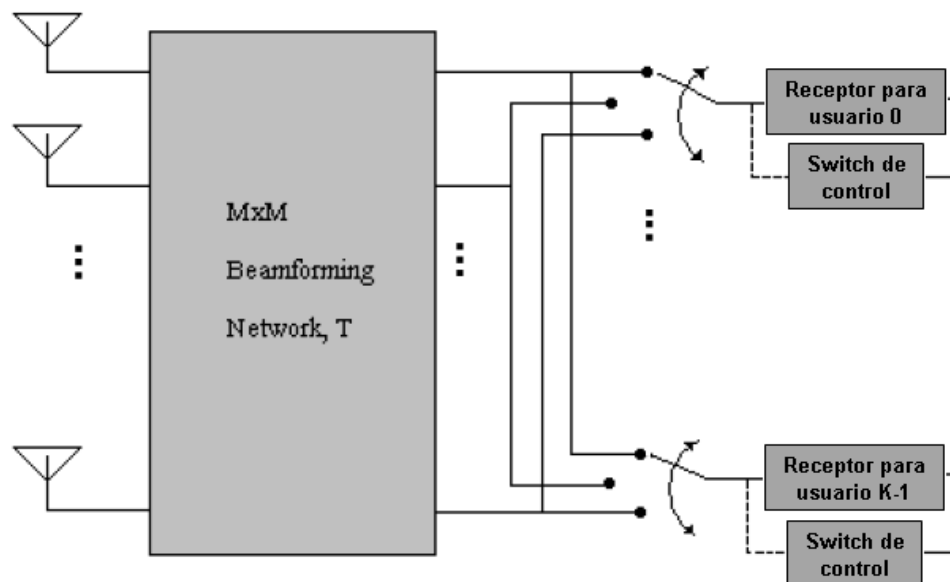
Para conseguir el desfase entre las corrientes que alimentan a cada elemento del arreglo según la matriz de Butler, se utilizan cambiadores de fase. [24]

Un cambiador de fase es un dispositivo que cumple la función de cambiar la fase de propagación de una señal. Cualquier reactancia colocada en serio o paralelo en una línea de transmisión produce cambios en la fase de la señal y por consiguiente existen ilimitadas configuraciones posibles. [24]

#### 6.4.2 Sistemas de conformador de haces conmutados (*Switched Beam Systems*)

Este sistema consiste en generar varios haces con direcciones fijas que se van combinando secuencialmente dando como resultado el barrido de toda la zona de cobertura. En cada posición se activa el sistema de recepción para detectar la presencia de usuarios activos. En caso de existir señal se guarda la información del ángulo, la identificación del usuario y se establece la comunicación en un intervalo de tiempo, luego se conmuta a la siguiente posición para detectar la presencia de otros usuarios. Este proceso se repite periódicamente. [24]

Un sistema de conmutación relativamente sencillo, requiere una red de haces conformados fijos, un conmutador de radiofrecuencia y un controlador lógico para seleccionar un haz particular. [24]



**Figura 61: Esquema simplificado de una red de haces conmutados.**<sup>62</sup>

<sup>62</sup> Tomado de: Smart Antennas for Wireless Communications; Joseph C. Liberti, Theodore S. Rappaport, Prentice Hall, Pág. 94.

### 6.4.3 Sistemas de conformador de haces adaptativos (*Adaptive Antenna Systems*)

El conformador de haces adaptativos es la técnica que permite una máxima radiación hacia el usuario deseado y nulos en la dirección de señales interferentes. [24]

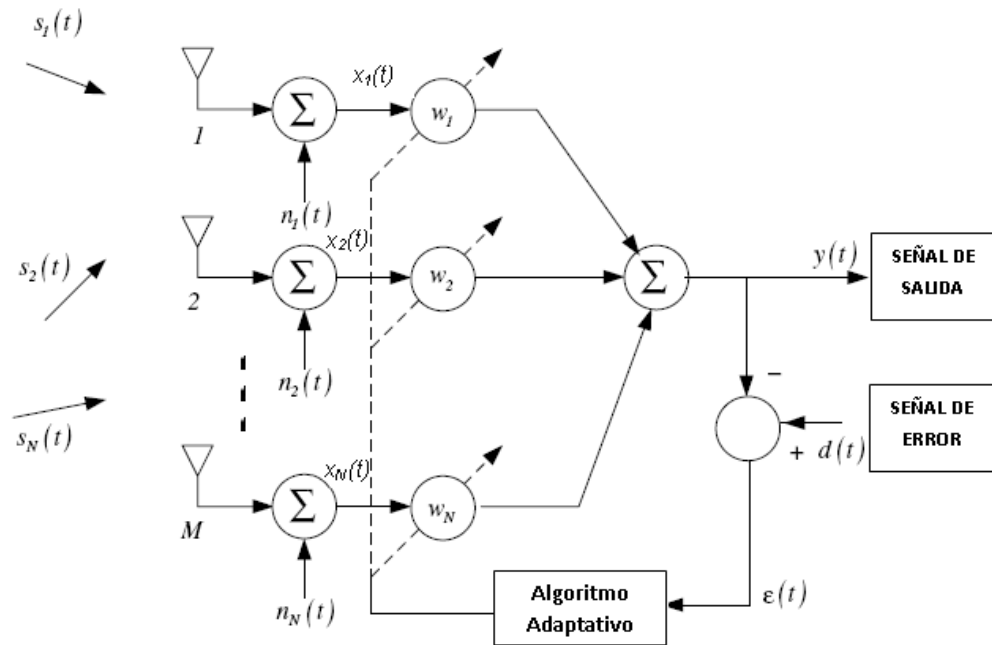


Figura 62: Sistema de arreglo adaptativo.<sup>63</sup>

Las  $s_M(t)$  representan las señales incidentes en los elementos de antenas. A estas señales se suma el ruido  $n_N(t)$ , para después ser ambos promediados por el procesador de señales digitales controlado por un algoritmo adaptativo. De esta manera se obtiene en la salida la suma de las ponderaciones variables de cada elemento de antena, designada como  $y(t)$ . Los pesos  $w_m$  son calculados iterativamente basándose en la salida del arreglo  $y(t)$ , la señal de referencia  $d(t)$ , que es una aproximación de la señal deseada, y las ponderaciones pasadas. [24]

La señal de referencia se aproxima a la señal deseada usando secuencias predefinidas o códigos de propagación, los cuales deben ser conocidos por el receptor. El formato de la señal de referencia varía y depende del sistema donde se implementa el conformador de haces adaptativos. La señal de referencia usualmente tiene una alta correlación con la señal deseada, el grado de

<sup>63</sup> Tomado de: Smart Antennas for Wireless Communications; Joseph C. Liberti, Theodore S. Rappaport, Prentice Hall, Pág. 95.

correlación influye en la exactitud de la convergencia del algoritmo. La salida del arreglo está dada por [24]:

$$y(t) = w^H x(t)$$

Donde  $w^H$  es la transpuesta conjugada compleja del vector de ponderación  $w$ . [24]

El vector respuesta de los datos muestreados en la salida del arreglo esta dado por [24]:

$$x(t) = s(t)a(\theta_o) + \sum_{i=1}^{n_N} n_i(t)a(\theta_i) + n(t)$$

$s(t)$  = representa la señal incidente al arreglo con un ángulo  $\theta_o$ .

$n_i(t)$  = denota a las señales interferentes no deseadas que llegan al arreglo con un ángulo  $\theta_i$ .

El error cuadrático medio entre la salida del conformador de haz y la señal de referencia puede ser expresado de la siguiente manera [24]:

$$\varepsilon^2(t) = [d(t) - w^H x(t)]^2$$

En sistemas de este tipo el haz de radiación se dirige en la dirección deseada, y en las no deseadas nulos de radiación para evitar interferencia o efecto multi-trayectoria no deseado. Todo esto con el fin de obtener las mejores condiciones. [24]

Dos de las técnicas más eficientes y aplicadas en sistemas de comunicación son: “*Minimum Mean Square Error*” (MMSE) y “*Least Square*” (LS). En ambos métodos, el cuadrado de la diferencia entre la salida del arreglo y la señal deseada, es minimizado, encontrando un vector de peso (magnitud y fase) apropiado. [24]

Estos métodos requieren del conocimiento de las características deseadas. Estas se conocen enviando periódicamente las señales predefinidas que son conocidas por el receptor y el transmisor. Inicialmente se envía una secuencia preestablecida periódicamente, y luego esta secuencia se genera localmente. [24]

## 6.5 CALIBRACIÓN DE LOS ARREGLOS

La calibración del arreglo es indispensable para asegurar que el algoritmo de procesamiento de la señal conoce la respuesta del sistema para cualquier ángulo de llegada. Dicha calibración involucra una exacta medida de la fase y la amplitud

de los canales de RF asociados con cada elemento del arreglo. Un sistema sin calibrar, puede reducir la capacidad para detectar y decidir que componente de multi-trayectoria utilizar. [24]

Algunos arreglos se calibran mediante un sistema mecánico que gira el arreglo en cierta dirección, cambiando de esta manera las características de fase. También es posible modificar y calibrar las características mediante procesamiento digital de la señal, modificando la magnitud y/o fase que alimenta cada elemento. [24]

### *Re-sectorización dinámica de antenas inteligentes*

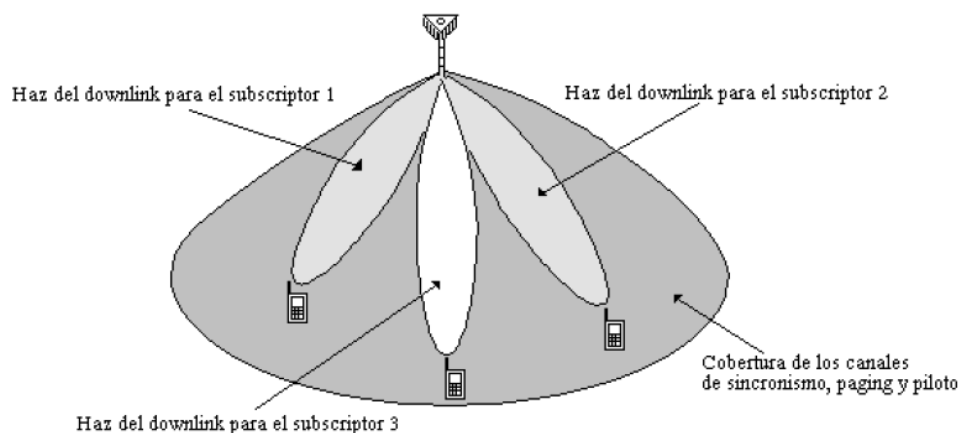
Las áreas con gran densidad de tráfico, son a menudo variables con el tiempo. Las antenas inteligentes pueden permitir balancear estos cambios bruscos de tráfico en cada celda. [24]

Usando re-sectorización dinámica, se puede proporcionar unos adecuados niveles de señal y cobertura, dependiendo de la densidad de tráfico requerida en cada instante. Es decir se provee cobertura solo donde y cuando es necesario. [24]

Es habilidad para acomodar la densidad de tráfico dinámica es muy importante, por ejemplo en sistemas CDMA. [24]

## **6.6 CONFORMACIÓN DEL HAZ DE DOWNLINK PARA SISTEMAS CDMA (Acceso múltiple por división de código)**

En un sistema CDMA los canales: sincronismo, piloto y paginación, requieren una cobertura continua en todo el sector de la celda. [24]



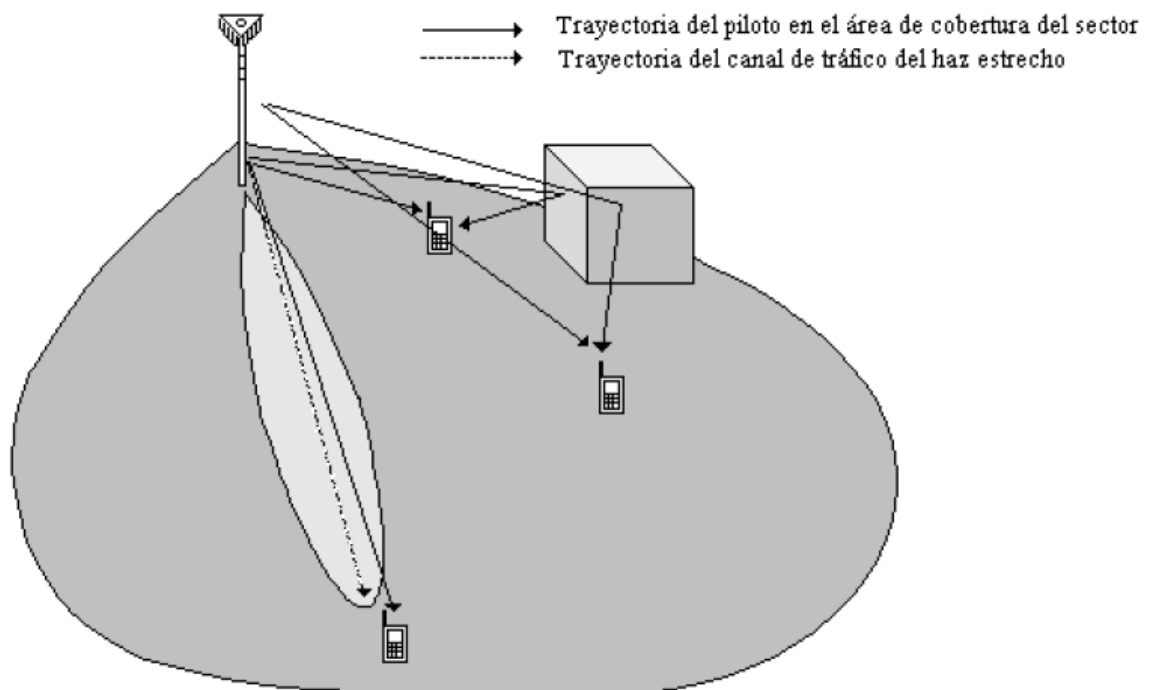
**Figura 63: Conformación de haces en el downlink.<sup>64</sup>**

<sup>64</sup> Tomado de: Smart Antennas for Wireless Communications; Joseph C. Liberti, Theodore S. Rappaport, Prentice Hall, Pág. 127.

La Figura 62, muestra como la estación base transmite los canales: piloto, sincronismo y paging mediante un haz para todo el sector. Y para cada usuario usa un haz específico para transmitir el canal de tráfico. [24]

La conformación de los haces en el downlink, reducen significativamente la potencia conjunta transmitida por la estación base, y se enfoca solamente en la potencia necesaria por el receptor requerido. Se debe asegurar que los haces del downlink estén libres de lóbulos laterales y posteriores. A demás cualquier cambio de fase o amplitud de la respuesta del amplificador, filtro, o la antena producirá un cambio en cualquiera de los haces conformados. Esto resulta en la formación de lóbulos laterales no deseados, que contribuyen en la interferencia de celdas adyacentes. Los errores de fase pueden distorsionar el haz principal, hasta cambiarle la dirección de enfoque. Por esta razón la calibración de los arreglos es muy importante y debe realizarse periódicamente. [24]

Se utilizan señales piloto auxiliares sobre el haz estrecho, para evitar una distorsión de fase entre la señal de tráfico y la del piloto, debido a que esta última se transmite por toda la celda. [24]



**Figura 64: Efecto multi-trayectoria.**<sup>65</sup>

<sup>65</sup> Tomado de: Smart Antennas for Wireless Communications; Joseph C. Liberti, Theodore S. Rappaport, Prentice Hall, Pág. 129.

### Extensión del rango

Uno de los importantes beneficios que presenta la utilización de antenas inteligentes, es la extensión del rango de cobertura. Con la extensión del rango, un móvil puede operar mas lejos de la estación base sin necesidad de incrementar la potencia de transmisión del uplink o la potencia de downlink desde el transmisor de la estación base. [24]

Por ejemplo, un sistema de CDMA usando un arreglo de 8 elementos [24]:

	Sectorización convencional	Sistema de antenas inteligentes
Potencia de tx del portatil (clase II).....(a)	23,0 dBm	23,0 dBm
Ganancia de la antena de tx del portatil:.....(b)	0,0 dBi	0,0 dBi
EIRP:.....(c=a+b)	23,0 dBm	23,0 dBm
Ganancia de un elemento de antena de la estación base (sector 120°):.....(d)	18,0 dBi	18,0 dBi
Ganancia de un proceso espacial ideal M=8:.....(e)		9,0 dB
Ganancia total de la antena receptora:.....(f=d+e)	18,0 dBi	27,0 dBi
CINR requerido:.....(g)	-12,3 dB	-12,3 dB
Ruido de fondo del receptor:.....(h)	-108,1 dBm	-108,1 dBm
Total de ruido e interferencia:.....(i)	-98,1 dBm	-98,1 dBm
Margen de sombra.....(j)	6,2 dB	6,2 dB
Potencia media recibida.....(k=g+i+j)	-104,2 dBm	-104,2 dBm
Pérdidas de trayectoria media tolerable.....(l=c+f-k)	145,2 dB	154,2 dB
Rango, $f_c=1920$ MHz	7,7 km	12,2 km

Tabla 12: Extensión del rango en un sistema CDMA.<sup>66</sup>

## 6.7 PRINCIPALES ALGORITMOS

### 6.7.1 Basados en la señal de referencia

#### Algoritmo LMS (Least Mean Square)

Este algoritmo utiliza la aproximación estocástica para el cálculo del gradiente de la función de costo MMSE (Minimum Mean Square Error). El método de minimización de la función de costo se conoce “descenso por gradiente” (steepest

<sup>66</sup> Tomado de: Smart Antennas for Wireless Communications; Joseph C. Liberti, Theodore S. Rappaport, Prentice Hall, Pág. 133.

descent), ya que de esta manera desciende más rápidamente. LMS es un algoritmo iterativo que hace correcciones sucesivas de los pesos, los cuales dirigen a menores errores cuadráticos medios. El método de descenso por gradiente presenta una expresión iterativa para la actualización del vector de pesos [22],

$$w(k+1) = w(k) - \frac{1}{2} \mu \nabla(E\{e^2(k)\})$$

Donde  $\mu$  es una constante fija que representa el tamaño del paso, el cual controla la covarianza característica del algoritmo, es decir cuán rápido esta técnica estima el vector de ponderación óptimo. [22]

A partir de un desarrollo matemático se obtiene que el gradiente de la función de costo sea [22],

$$\nabla(E\{e^2(k)\}) = -2x(k)e^*(k)$$

Teniendo en cuenta estas ecuaciones, se obtiene la forma generalizada del algoritmo LMS [22],

$$w(k+1) = w(k) + \mu_{LMS} x(k)e^*(k)$$

#### *Algoritmo NLMS (Normal Least Mean Square)*

El vector de pesos del algoritmo LMS depende directamente de los datos que ingresan al sistema, cuando estos datos son demasiado grandes, el algoritmo LMS experimenta un aumento del ruido, para resolver esta dificultad se utiliza el criterio de normalización del algoritmo LMS, la norma se aplica a los datos que ingresan al sistema [22],

$$y(t) = w^H * x(t)$$

$$e_n = d_n - z_n$$

$$w_{(k+1)} = w_{(k)} + \mu * \frac{x(k)}{\|x(k)\|^2} e_n^*$$

#### *Algoritmo RLS (Recursive Least Squares)*

Las antenas inteligentes requieren de algoritmos que se adapten rápidamente a los cambios existentes en el medio, los algoritmos LMS, NMLS no ofrecen un buen desempeño, con esos propósitos se crearon los algoritmos de rápida respuesta. Una manera de aumentar la velocidad de convergencia del algoritmo adaptativo es



calcular directamente el vector de pesos a través de la ecuación de Wiener. El algoritmo RLS realiza una búsqueda iterativa por el vector de coeficientes óptimos [22],

$$w_{opt} = R_{xx}^{-1}r_{dx}$$

Las aproximaciones estocásticas de las matrices  $R_{xx}$ , son actualizadas recursivamente en cada iteración [22],

$$R_{xx}(k) = \varphi R_{xx}(k-1) + x(k)x^H(k)$$

$$r_{dx}(k) = \varphi r_{dx}(k-1) + d^*(k)x(k)$$

Para obtener la ecuación de Wiener, se debe calcular la inversa de  $R_{xx}(k)$ . Para esto se utiliza la matriz de inversión de Lemma. [22]

$$R_{xx}^{-1}(k) = \varphi^{-1} \left[ R_{xx}^{-1}(k-1) - \frac{R_{xx}^{-1}(k-1)x(k)x^H(k)R_{xx}^{-1}(k-1)}{\varphi + x^H(k)R_{xx}^{-1}(k-1)x(k)} \right]$$

Teniendo en cuenta las ecuaciones anteriores, se obtiene la forma genérica del algoritmo RLS. [22]

$$w(k) = w(k-1) - \frac{\varphi^{-1}R_{xx}^{-1}(k-1)}{1 + \varphi^{-1}x^H(k)R_{xx}^{-1}(k-1)x(k)} x(k)e^*(k)$$

Haciendo [22],

$$\varphi_{RLS} = \frac{\varphi^{-1}R_{xx}^{-1}(k-1)}{1 + \varphi^{-1}x^H(k)R_{xx}^{-1}(k-1)x(k)}$$

Se resume la forma genérica del algoritmo [22],

$$w(k) = w(k-1) - \varphi_{RLS}x(k)e^*(k)$$

$\varphi_{RLS}$  es variable y se va adaptando a los cambios en el medio. De esta forma se obtiene un algoritmo RLS de rápida convergencia pero con mayor complejidad debido a la mayor carga de procesamiento de datos. [22]

## 6.7.2 Algoritmo con referencia espacial

Esta técnica, puede recurrir a los algoritmos: MMSE, Max SNR y LCMV, para encontrar el valor de pesos. [24]

En algunas aplicaciones ninguno de los algoritmos mencionados es satisfactorio, debido a que en algunos casos no es posible estimar la matriz de covarianza de la señal y del ruido, y este desconocimiento no permite la aplicación del criterio MMSE. Estas limitaciones pueden ser sobrellevadas con la aplicación del beamforming de varianza mínima restringida (LCMV), que aplica restricciones lineales al vector de pesos. El uso de restricciones lineales es un método general que permite un gran control sobre la respuesta adaptada del patrón de radiación de la antena inteligente (beamformer). El objetivo del beamforming de Varianza Mínima Restringida (LCMV) es de restringir la respuesta del beamformer para que las señales de la dirección de interés pasen con una ganancia y fase específicas y minimicen las contribuciones a la salida de señales interferentes y ruido que llegan en direcciones distintas. Por lo tanto restringiendo linealmente los pesos se puede satisfacer la siguiente expresión [24]:

$$W^H a(\phi) = g$$

*g = constante compleja, que asegura que cualquier señal de ángulo  $\phi_d$  y frecuencia  $\omega$  sea trasladada a la salida con respuesta g.*

La expresión de función de costo para el criterio del beamforming de Varianza Mínima Restringida [24],

$$J(W) = W^H R * W$$

Con los multiplicadores de Lagrange, se obtiene el vector del valor de los pesos para este algoritmo [24]:

$$W = g \frac{R^{-1} a(\phi)}{a^H(\phi) R^{-1} a(\phi)}$$

Si  $g=1$ , el beamforming es llamado de Respuesta en Varianza Mínima sin Distorsión (MVDR). La facilidad que brinda este criterio, es que la restricción lineal es generalizable a múltiples restricciones lineales, si se conoce una fuente de interferencia fija en la dirección conocida  $\phi_i$ , entonces puede ser deseable forzar una ganancia cero en esa dirección, además de mantener la respuesta  $g$ , para la señal de salida  $\phi_d$  [24],

$$\begin{bmatrix} a^H(\phi_d, \omega) \\ a^H(\phi_i, \omega) \end{bmatrix} \cdot W = \begin{bmatrix} g^* \\ 0 \end{bmatrix}$$

	MMSE	Max SNR	LCMV
<b>Criterio</b>	Minimiza la diferencia entre la salida del arreglo y la respuesta deseada.	Maximiza la relación de la componente señal deseada y la componente del ruido a la salida del arreglo.	Minimiza la varianza a la salida del arreglo sujeto a constantes lineales. Para una simple restricción se obliga al patrón del haz a apuntar a una determinada dirección.
<b>Función costo</b>	$J(W_k) = E \left[  W_k^H \cdot U_i(t) - d_{k,i} ^2 \right]$ Donde $y(t)$ , es la salida del arreglo. $d(t)$ , es la respuesta deseada.	$J(W_k) = \frac{W^H R_n W}{W^H R_s W}$ Donde $R_n$ , es la matriz de covarianza de la componente del ruido y $R_s$ , es la matriz de covarianza de la componente de la señal.	$J(W_k) = W^H R \cdot W$ Sujeto a una constante lineal $W^H \alpha(\phi) = g$ , cuando $g = 1$ , el beamforming es llamado Respuesta Mínima de Varianza sin Distorsión MVDR.
<b>Solución Óptima</b>	$W = R^{-1} \cdot p$ Donde $R = E \left[ u(t) \cdot u^H(t) \right]$ Y $p = E \left[ u(t) \cdot d^*(t) \right]$	$R_n^{-1} \cdot R_s \cdot W = \lambda_{\max} \cdot W$ Donde $\lambda_{\max}$ , es el máximo valor propio de $R_s$	$W = R^{-1} \cdot C \left[ C^H \cdot R^{-1} \cdot C \right]^{-1} \cdot g$ Donde $C = \alpha(\phi)$ , es el vector dirección.
<b>Ventajas</b>	No se requiere conocer la Dirección de Llegada (DoA)	Logra una maximización de la relación señal a ruido.	Sujeto a restricciones lineales.
<b>Desventajas</b>	Requiere una señal de referencia	Conocer la estadística del ruido y la dirección de llegada de la señal deseada.	Conocer la dirección de llegada de la componente deseada

Tabla 13: Técnicas de beamforming estadísticamente óptimo.<sup>67</sup>

## 6.8 SIMULACION DE UN ALGORITMO ADAPTATIVO PARA ANTENAS INTELIGENTES

En este trabajo, realizado por estudiantes de maestría de la Universidad de Tarapacá en Chile, se presentan los algoritmos LMS y el RLS; ambos son sometidos a un análisis matemático para su posterior simulación [26]. También se propone combinar los dos algoritmos para desarrollar uno híbrido (RLS/LMS), con el fin de potenciar las características favorables de cada uno. [26]

El algoritmo LMS se adapta bien a los sistemas de transmisión continua debido a su ajuste permanente, pero su velocidad de convergencia es constante. Mientras que el algoritmo RLS posee una velocidad de convergencia mayor, gracias al cálculo intensivo de datos, lo que lo hace más complejo por el mayor procesamiento. [26]

El algoritmo propuesto (RLS/LMS) ofrece una alta velocidad de convergencia con un procesamiento de datos sencillo. [26]

<sup>67</sup> Tomado de: Smart Antennas for Wireless Communications; Joseph C. Liberti, Theodore S. Rappaport, Prentice Hall, Pág. 217.

La forma generalizada de los algoritmos particulares es similar y tiene la siguiente forma [26]:

$$w(k + 1) = w(k) + \alpha_n x(k) e^*(k)$$

En la cual  $\alpha_n$  es un parámetro variable, que regula la velocidad de convergencia y la estabilidad del algoritmo. [26]

Para  $n < n_R$ ,  $\alpha = \varphi_{RLS}$ ; es igual al factor de olvido calculado por la inversión de las matrices de datos. De esta forma se obtiene una velocidad de convergencia adecuada para ambientes altamente dinámicos. Para obtener este factor se requiere bastante procesamiento de datos. [26]

Para  $n > n_R$ ,  $\alpha = \mu_{LMS}$ ; un valor constante asignado. Sin el cálculo intensivo de datos del caso anterior, se reduce la velocidad, ya que este valor no responderá a cambios en el medio. [26]

#### *Simulaciones de los algoritmos.*

Utilizando MatLab para la simulación de los algoritmos, se considero un arreglo lineal de 4 elementos separados por una distancia de  $d = \lambda/2$ , en el que inciden 4 señales, una de ellas proviene de un usuario deseado y el resto de fuentes de interferencia. La dirección de la señal deseada proviene de los  $30^\circ$  y los de interferencia son  $0^\circ$ ,  $-20^\circ$  y  $60^\circ$  respectivamente. [26]

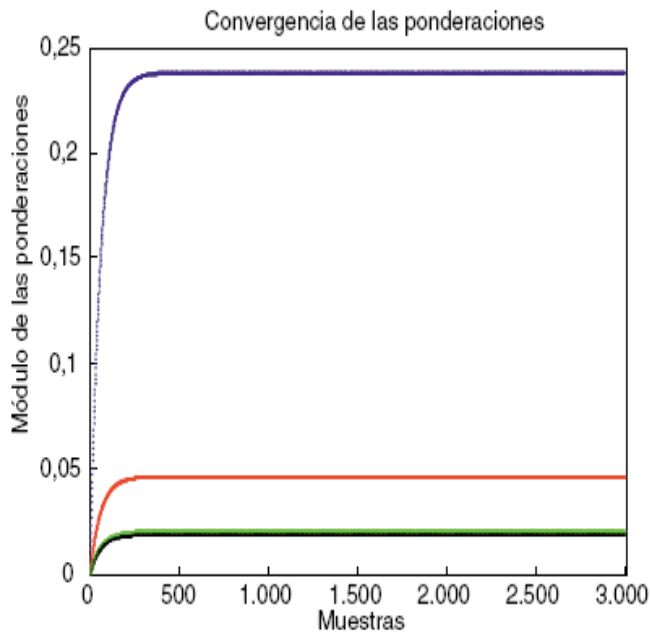
Como señal deseada  $s(t)$  se considera una señal modulada en fase y senoidal compleja, la que posee la siguiente expresión [26]:

$$s(t) = e^{j\text{sen}(\omega t)}$$

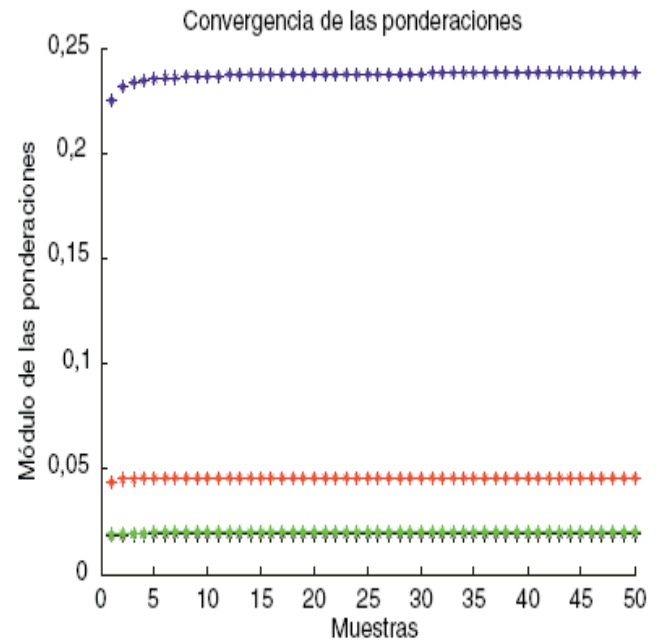
La señal de interferencia  $\mu_i(t)$  tiene la misma forma que la señal deseada. A cada algoritmo se le realizaron pruebas de convergencia, error cuadrático medio y seguimiento a la señal deseada o de referencia. [26]

Las imágenes de la Figura 64, representan el vector de peso  $\omega_m$  con  $m = 1, 2, 3$  y  $4$ ; obtenido por cada uno de los algoritmos correspondientes. De acuerdo al algoritmo aplicado, se tendrá diferencias de velocidad de convergencia de los pesos o ponderaciones [26]. La figura 65 muestra el error cuadrático medio obtenido a medida que converge cada algoritmo y también se puede apreciar la velocidad de convergencia de cada uno de ellos [26]. La figura 66 muestra el seguimiento de la salida a la señal de referencia.

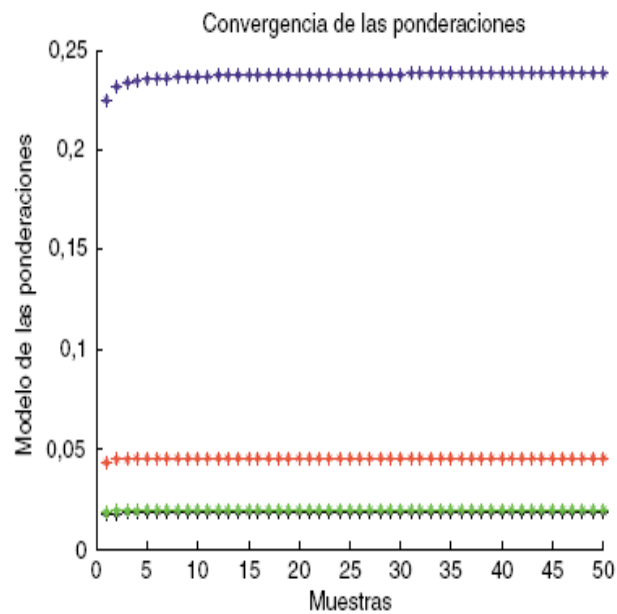
LMS:



RLS:



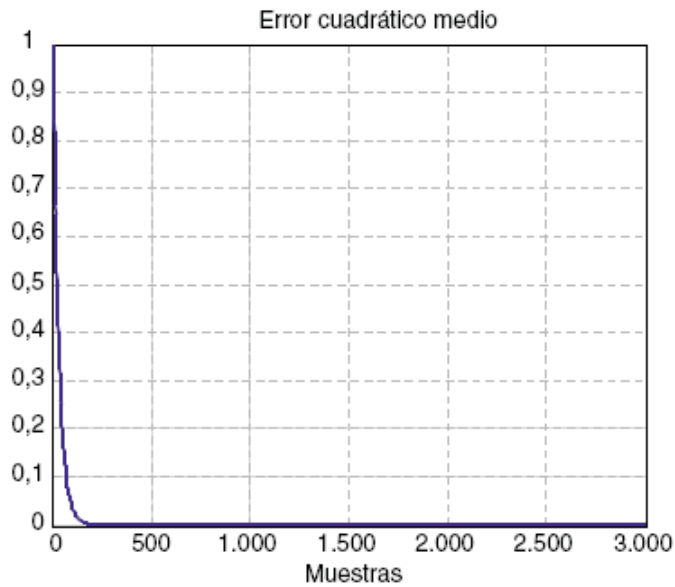
RLS/LMS:



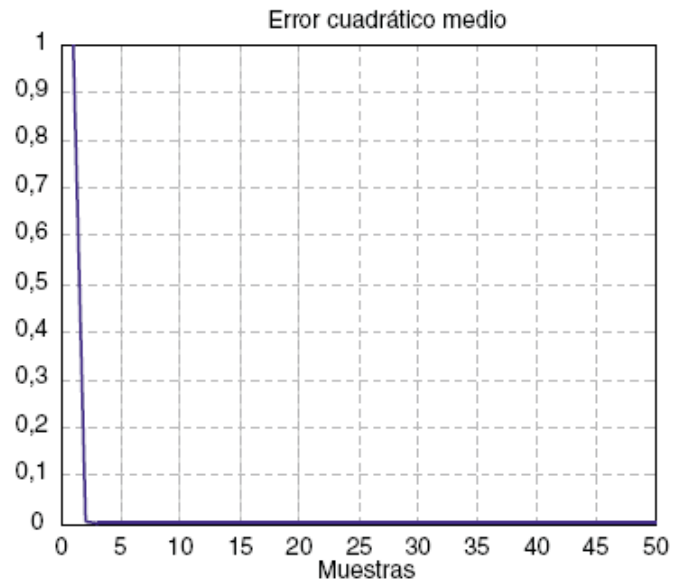
**Figura 65: Ponderaciones en un arreglo lineal de 4 antenas con diferentes algoritmos.**<sup>68</sup>

<sup>68</sup> Tomado de: Proposición y simulación de un algoritmo adaptativo para sistemas de antenas inteligentes; Perla Espinosa, Carlos Villarroel; Ingeniare, revista chilena de ingeniería, Vol. 15 N° 3, Pág. 348.

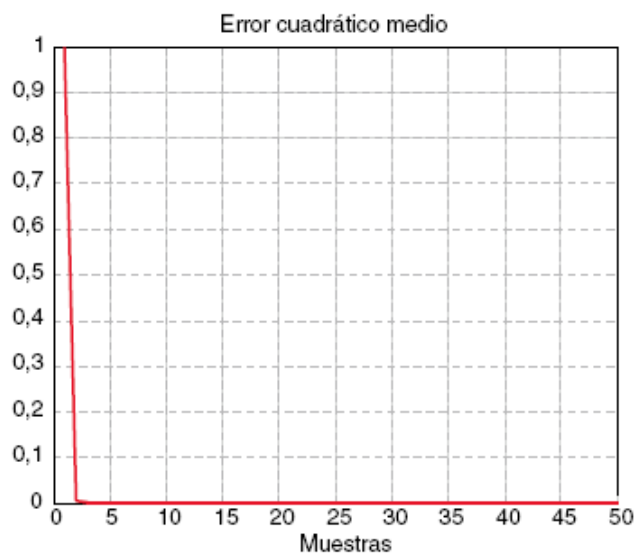
LMS:



RLS:



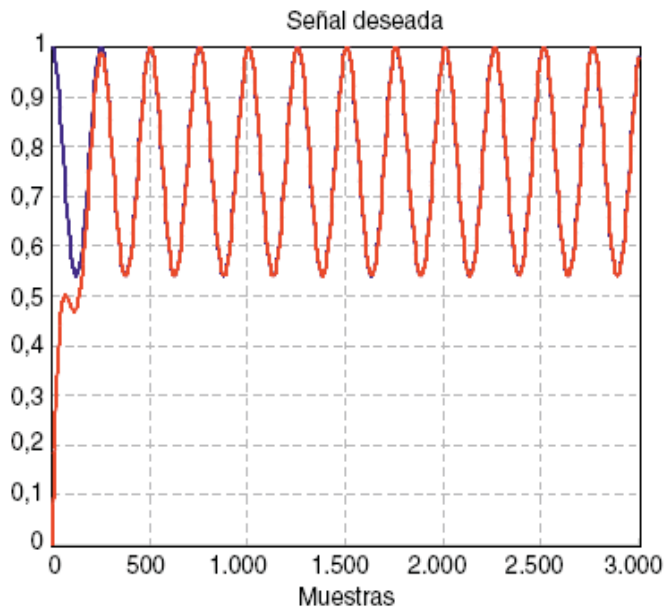
RLS/LMS:



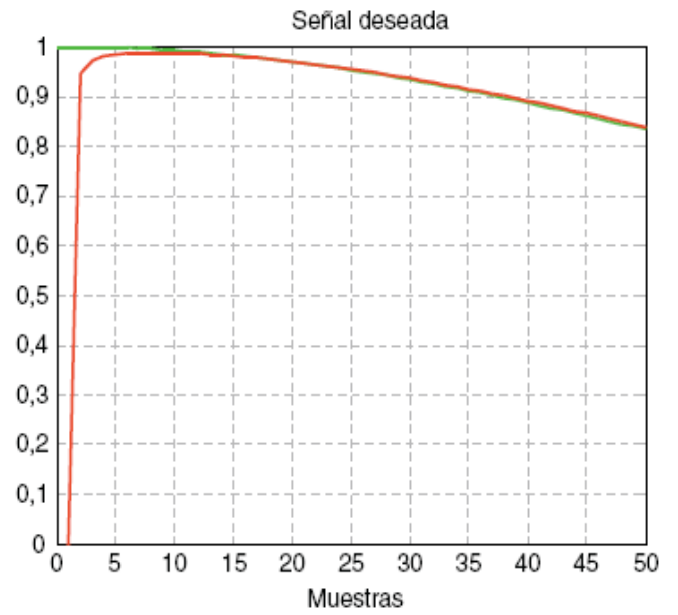
**Figura 66: Error cuadrático medio del sistema de antena lineal con diferentes algoritmos.<sup>69</sup>**

<sup>69</sup> Tomado de: Proposición y simulación de un algoritmo adaptativo para sistemas de antenas inteligentes; Perla Espinosa, Carlos Villarroel; Ingeniare, revista chilena de ingeniería, Vol. 15 N° 3, Pág. 349.

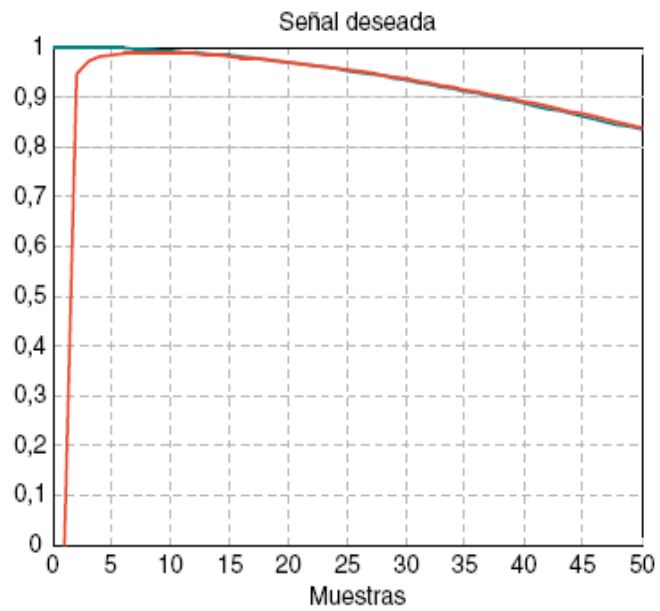
LMS:



RLS:



RLS/LMS:



### Figura 67: Seguimiento de la señal deseada. <sup>70</sup>

De acuerdo a los resultados obtenidos en las simulaciones, los autores afirman que:

- *“Los algoritmos que poseen una mayor convergencia son el RLS y RLS/LMS. Éstos se estabilizan a menos de 10 muestras. Mientras que el algoritmo LMS lo hace a las 300 muestras aproximadamente.” [26]*
- *“La complejidad de sistema se puede medir frente a la cantidad de datos procesados por el algoritmo. Sin duda, el sistema más complejo es el algoritmo RLS y el más simple el LMS. Mientras que el RLS/LMS al ser un híbrido posee un nivel medio de complejidad, el cual posee una ventaja comparativa con sus predecesores, ya que tiene una rápida convergencia de datos y requiere menos hardware que un algoritmo que entregue una respuesta similar a ésta.” [26]*

En conclusión, el algoritmo LMS es simple, de baja convergencia y estable. Tiene un buen comportamiento en ambientes invariables. El RLS es más complejo y de mayor convergencia, ideal para ambientes altamente dinámicos ya que tiene una rápida respuesta frente a los cambios del medio. Un algoritmo híbrido que recopile las principales cualidades de los dos (RLS/LMS), puede resultar menos complejo y más convergente, pero requiere de investigaciones y trabajos más extensos en el tema.

### 6.9 SIMULACION DEL BEAMFORMING EN ANTENAS INTELIGENTES PARA UN ENTORNO CDMA

Teniendo en cuenta que no existe reciprocidad en los enlaces ascendente y descendente, no es posible tomar los valores del factor de pesos obtenidos en el enlace ascendente y utilizarlos en el enlace descendente. Por este motivo se requiere estimar el ángulo de arribo de cada uno de los terminales, sean deseados o interferentes, lo cual se realiza en el enlace ascendente mediante la aplicación de los algoritmos de detección de ángulo de llegada DoA [27]. Luego, con la ayuda de algoritmos adaptativos o estadísticamente óptimos, se calcula el valor de los pesos que tendrá el arreglo de antenas en el enlace descendente, de tal forma que el haz principal del patrón de radiación generado apunte en la dirección del usuario deseado. [27]

---

<sup>70</sup> Tomado de: Proposición y simulación de un algoritmo adaptativo para sistemas de antenas inteligentes; Perla Espinosa, Carlos Villarroel; Ingeniare, revista chilena de ingeniería, Vol. 15 N° 3, Pág. 349.



En el artículo consultado (realizado por estudiantes de ingeniería electrónica, de la Escuela Politécnica del Ejército, Sangolquí, Ecuador), la simulación no realiza la estimación del ángulo de llegada, el usuario debe ingresar la dirección del terminal deseado y la cantidad de interferentes en el sistema, el simulador genera las direcciones para los interferentes y de esta forma se realiza la estimación del ángulo de llegada de los terminales que intervienen en el sistema. La Figura 67, ilustra el diagrama de flujo expuesto en el artículo, para la simulación del patrón de radiación de la antena en la dirección deseada.

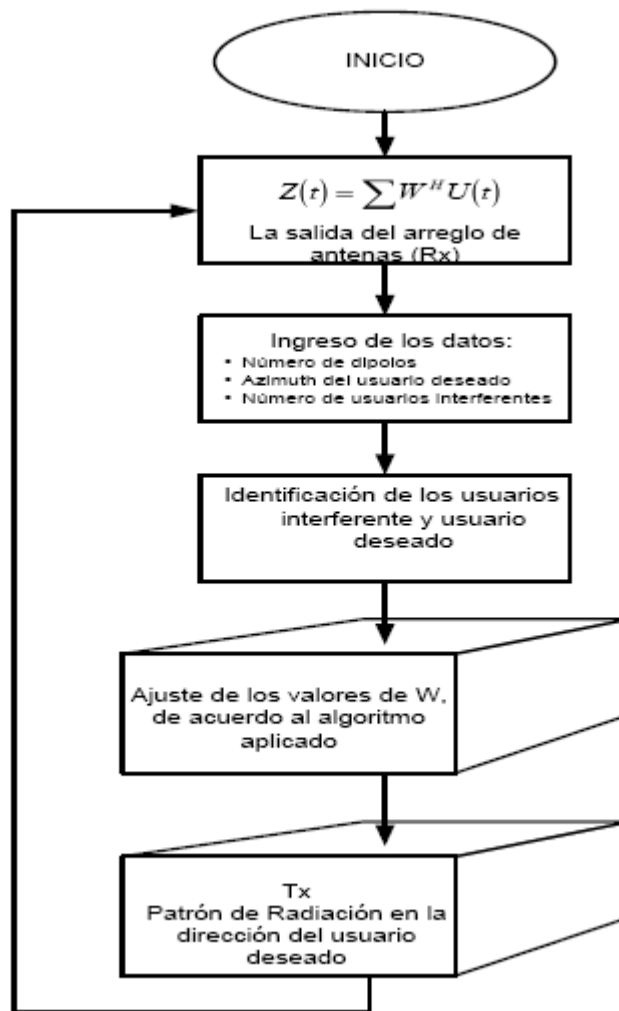


Figura 68: Diagrama de flujo del sistema de antenas inteligentes.<sup>71</sup>

<sup>71</sup> Tomado de: Estudio, análisis y simulación del beamforming en antenas inteligentes para un entorno de telefonía celular CDMA; Darío Duque, Gonzalo Olmedo; Escuela Politécnica del Ejército, Sangolquí, 2008.

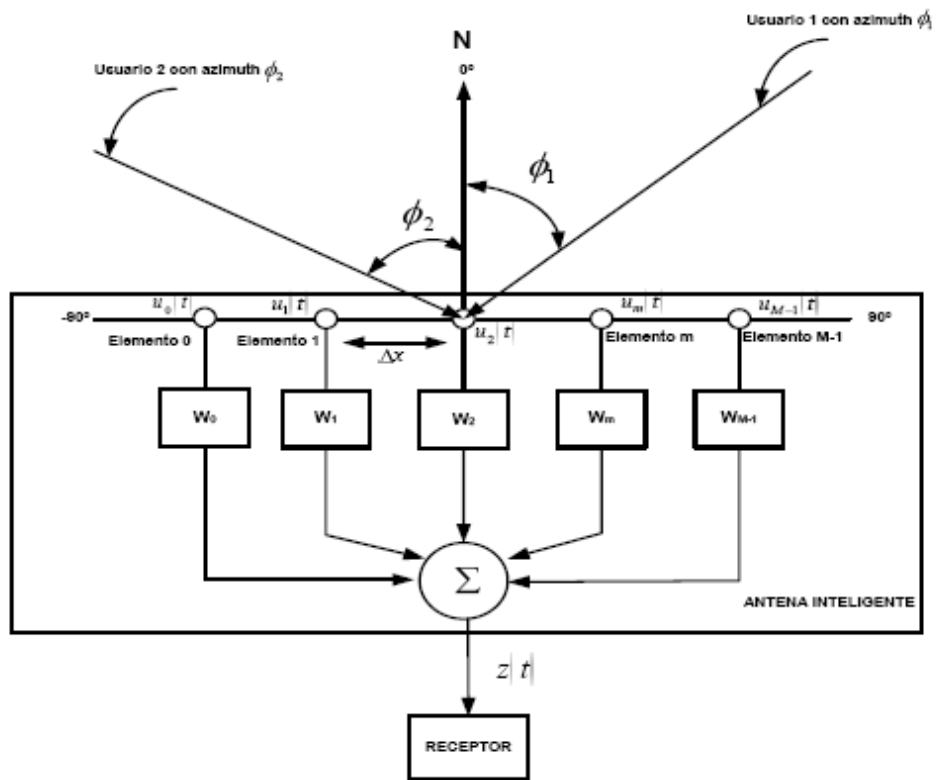
*El bloque de transmisión*, simula los datos que van a ser transmitidos por cada uno de los terminales, dichos datos son de tipo CDMA y son generados con la ayuda de los códigos Walsh y de acuerdo al valor establecido de la ganancia de procesamiento; los bits que transmitirán los terminales tendrán un valor de 1 lógico para facilitar el desarrollo del simulador, todos realizan la transmisión de la información al mismo tiempo, sistema síncrono. [27]

*El bloque de estimación de la señal de arribo*, combina los datos transmitidos por cada terminal, con su respectivo ángulo de incidencia, adicionalmente considera la incidencia del ruido blanco gaussiano en el sistema del mismo que se determina por la relación de energía de bit respecto a la densidad de ruido ( $E_b/N_0$ ), simulando de esta forma la señal que recibe cada uno de los dipolos del arreglo. [27]

*Ingreso de datos*, este bloque solicita el ingreso de los datos requeridos por el software de simulación, entre los datos requeridos se encuentran:

- Cantidad de dipolos que conforman el arreglo de antenas.
- Angulo de arribo del suscriptor deseado.
- Cantidad de suscriptores interferentes.

El sistema genera aleatoriamente los ángulos de los terminales interferentes, en un sistema real dichos valores se determinan mediante los algoritmos de detección de llegada DoA: pero en la investigación consultada, la simulación solicita el ingreso del valor del ángulo deseado y genera aleatoriamente el ángulo de arribo de los suscriptores interferentes. [27]



**Figura 69: Representación de los ángulos de arribo de los usuarios deseados e interferentes.** <sup>71</sup>

Un factor importante en la simulación, es el ingreso de la cantidad de terminales que interactúan en el sistema simulado ya que dicho valor no debe superar la cantidad de dipolos que conforman el arreglo de antenas, esto se debe a que los sistemas de antenas inteligentes deben guardar un determinado grado de libertad para mantener una respuesta adecuada. [27]

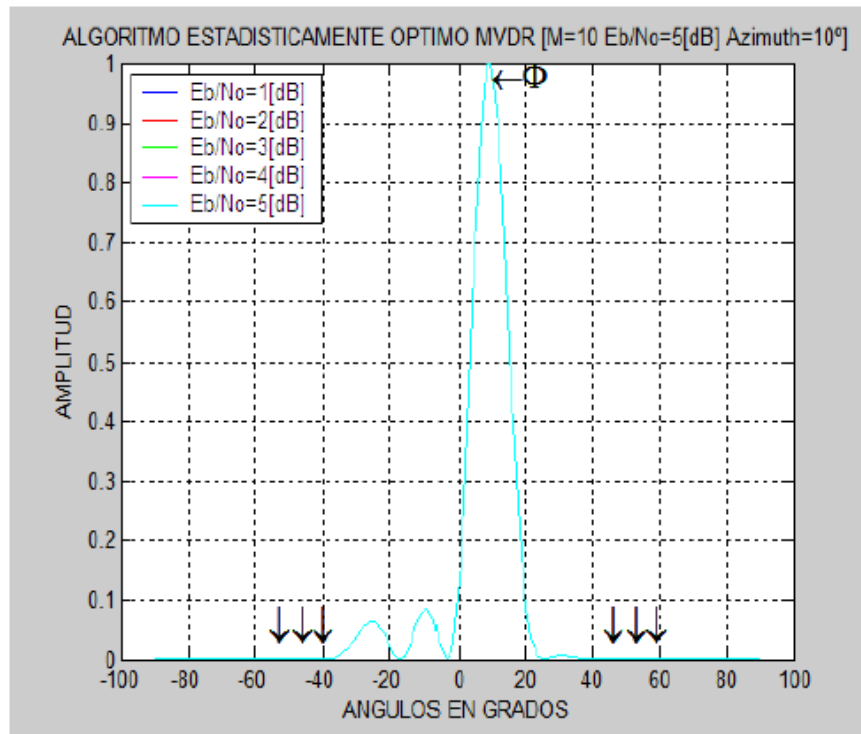
Los algoritmos adaptativos RLS, LMS, NLMS, requieren conocer la señal que transmite el usuario deseado, dichos algoritmos se encargan de ajustar el valor del factor de pesos de tal forma que se obtenga el menor error posible a la salida del arreglo lo cual permitirá orientar al patrón de radiación en la dirección del usuario deseado. [27]

Una vez establecido los valores del factor de pesos, el sistema de antenas inteligentes simula el patrón de radiación obtenido por los algoritmos. [27]

### *Simulación*

El software solicita el ingreso de la cantidad de dipolos, el azimuth del terminal deseado y la cantidad de terminales interferentes; a modo de ejemplo se establecieron 10 dipolos, el azimuth del terminal deseado  $10^\circ$  y 6 terminales





**Figura 71: Respuesta del Algoritmo estadísticamente óptimo.**<sup>71</sup>

Las siguientes figuras ilustran el comportamiento de los algoritmos adaptativos y la forma en cada uno de ellos se aproxima a la respuesta deseada para los diferentes valores de Eb/No simulados. [27]

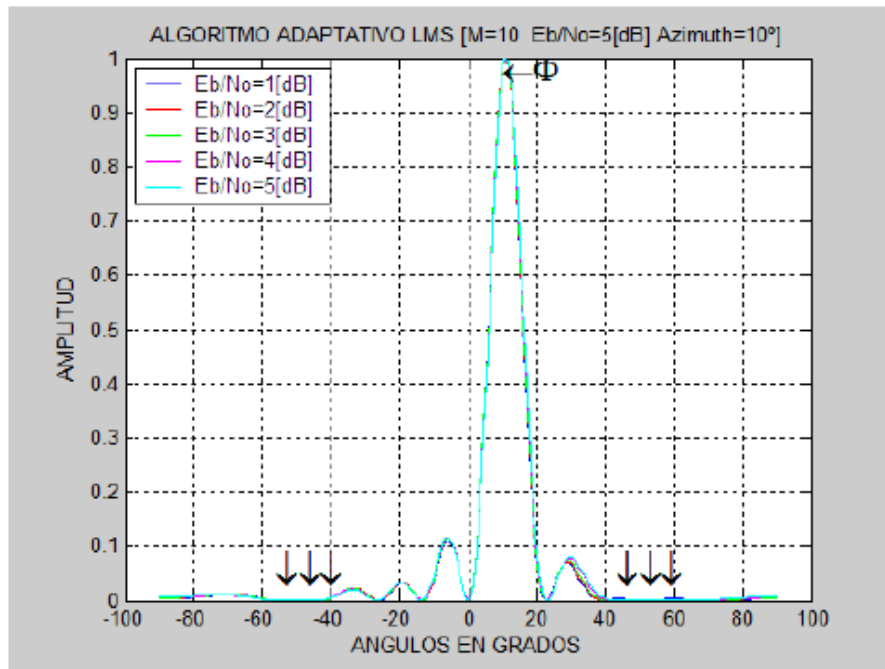


Figura 72: Respuesta del Algoritmo LMS.<sup>71</sup>

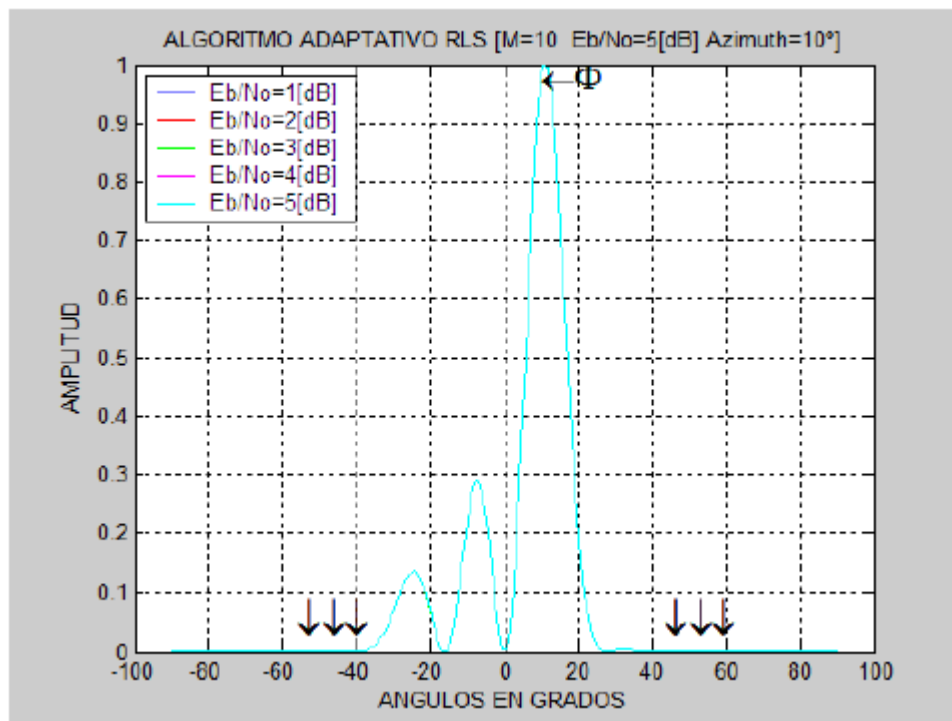
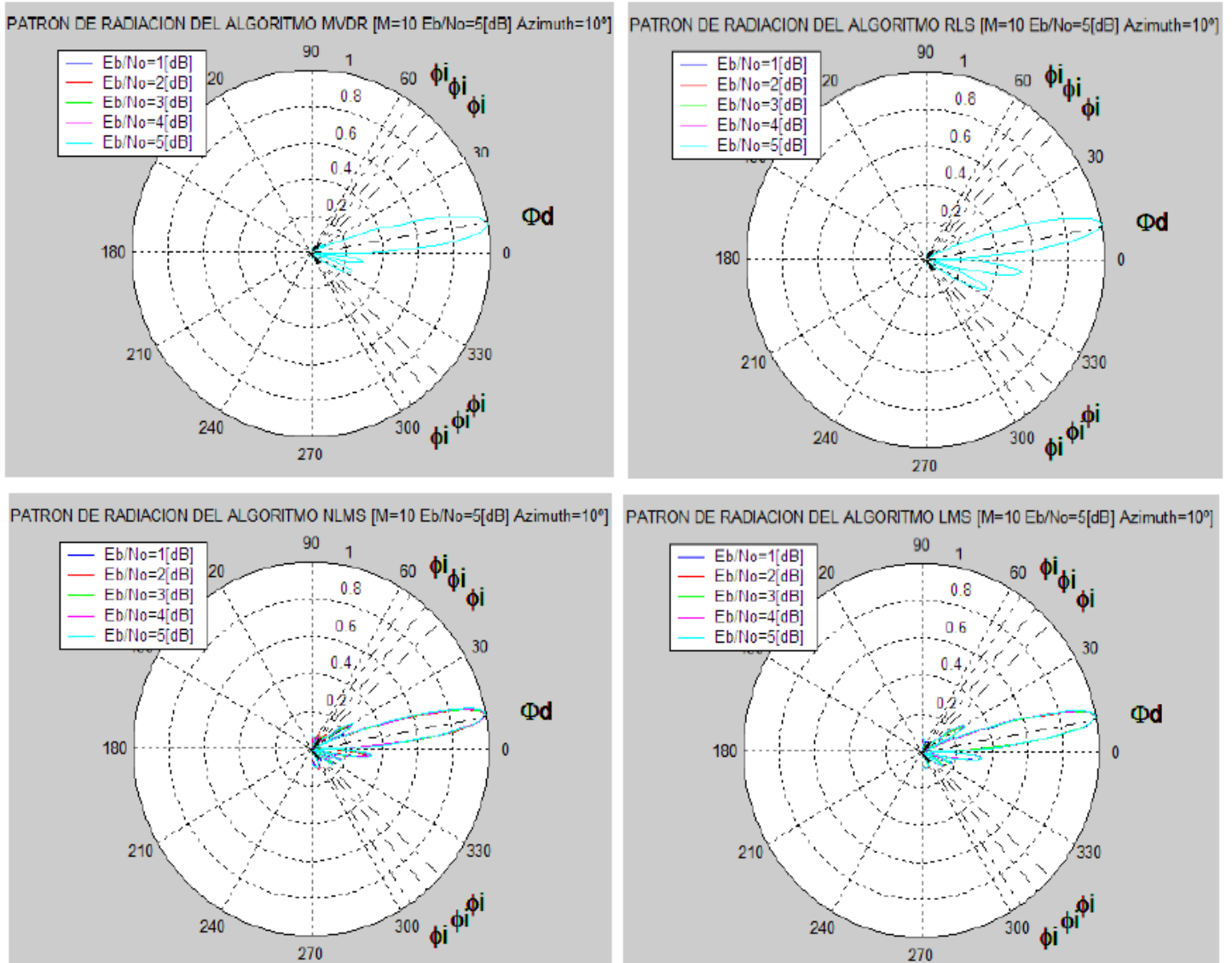


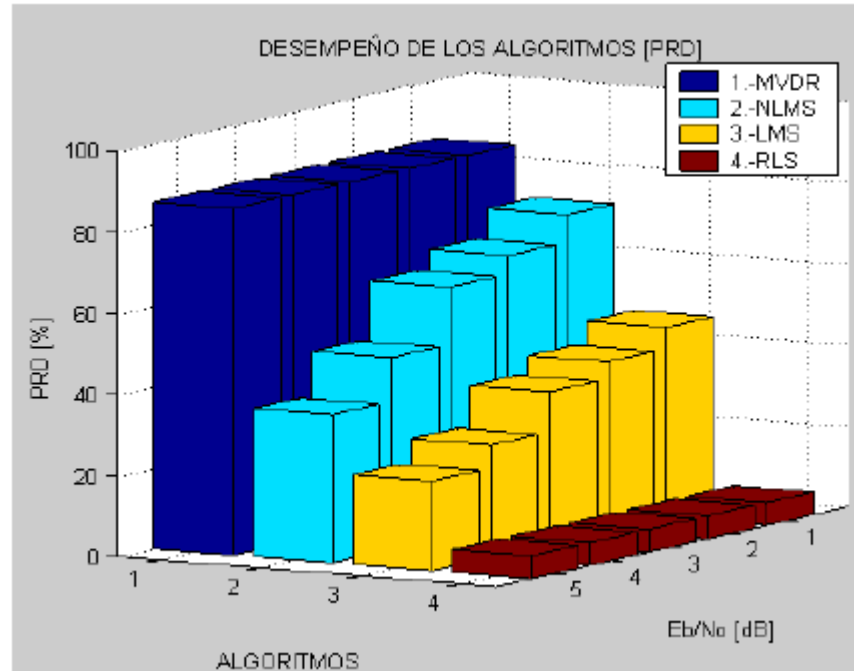
Figura 73: Respuesta del Algoritmo RLS.<sup>71</sup>

En las siguientes figuras se puede apreciar el patrón de radiación en forma polar de los algoritmos simulados.



**Figura 74: Patrón de radiación en forma polar de lo diferentes algoritmos.**<sup>71</sup>

Para determinar el desempeño de cada uno de los algoritmos se realizó, en la investigación consultada, la simulación del criterio PRD (Percentage root difference), este criterio permite medir el desempeño de los algoritmos simulados calculando el error entre la señal original y la señal filtrada. El que menor valor presente será el algoritmo de mejor desempeño. Según los resultados de la simulación el algoritmo de mejor desempeño es el RLS. [27]



**Figura 75: Gráfico del criterio PRD.** <sup>71</sup>

Para terminar, este artículo concluye afirmando que el algoritmo RLS es el de mejor desempeño para arreglos de antenas inteligentes en un entorno CDMA. [27]

## 6.10 ANTENAS INTELIGENTES CON APLICACIÓN EN SDMA

Este es el tema de investigación publicado en un artículo por el grupo de telecomunicaciones y señales, de la Universidad del Norte en Barranquilla, Colombia [23]. En dicho artículo se propone el desarrollo de un prototipo Hardware/software de un sistema de antenas adaptativas que ofrezca una mejora en la calidad de los enlaces de acceso a la red celular. [23]

El sistema planteado se encuentra dividido en tres bloques funcionales separados: el transmisor, el modelador de canal y el receptor.

### *Transmisor*

El bloque transmisor tiene la función de generar los chips de cada usuario y que se superpondrán en el canal de acuerdo con el ángulo de incidencia al arreglo de antenas. El bloque está formado por sub-bloques que simulan los transmisores de los usuarios. Cada sub-bloque genera las diferentes tramas, correspondientes a cada usuario del sistema. La generación de las señales se hace mediante mapeo de bits de los campos de datos, de tal forma que concuerden con modulación



QPSK, se realiza la canalización (cada símbolo es transformado en un número de chips) y el *scrambling* (multiplicación chip a chip entre la secuencia dada para cada celda y la suma de canales de cada usuario). [23]

### *Modelador de Canal*

El modelador de canal emula los cambios que la señal sufrirá al pasar a través del canal de acuerdo con el modelo utilizado. Está constituido por el bloque VCIR y AWGN. [23]

EL bloque VCIR modela las señales recibidas en el arreglo, provenientes de cada usuario como ondas planas provenientes de una dirección determinada y con un retardo determinado. [23]

El bloque AWGN se encarga de adicionar el ruido blanco gaussiano que afecta cada señal al atravesar el canal [23]. Este ruido es generado en MatLab siguiendo una distribución gaussiana con varianza dependiente del valor de Eb/No seleccionado por el usuario en la interfaz gráfica. Posteriormente se envía al sistema por medio de la interfaz serial RS232. [23]

### *Receptor*

Está conformado por el bloque LMS y el bloque receptor monousuario [23]. El bloque LMS combina las señales que inciden en cada elemento de antena, sumando versiones ponderadas de estas. El bloque monousuario desensancha la señal filtrada y recibida con el fin de reconstruir un estimado de la señal transmitida por el usuario deseado, además cuenta los errores que se presentaron en cada trama recibida. [23]

Para calcular el ángulo de incidencia del usuario deseado, mediante el método de Capón, se envía desde la tarjeta de desarrollo hacia MatLab, a través de la comunicación serial (RS232), las señales que inciden a cada elemento de antena, y a partir de estas estimar la matriz de autocorrelación, que se requiere para calcular la Densidad Angular de Potencia. Luego se genera el vector de dirección con base en los ángulos de incidencias digitados por el usuario en la interfaz gráfica. Para ello en MatLab se calcula el vector en base a la siguiente ecuación [23]:

$$\alpha_m(\theta, \phi) = \cos\left(m \frac{\pi}{2} \cos(\phi)\right) + \sin\left(m \frac{\pi}{2} \cos(\phi)\right)$$

Para  $m = 1, 2, 3, 4$ .

Donde  $\phi$  es el ángulo de incidencia.

Finalmente, teniendo la matriz de auto correlación y el vector de dirección, se procede a determinar (en Matlab) la potencia de salida del arreglo como función del ángulo de incidencia [23],

$$P_{Capon}(\phi) = \frac{1}{a^H(\phi)R_{uu}^{-1}a(\phi)}$$

Para la interacción de los operadores con el prototipo, se implementa una interfaz desarrollada en MatLab y el puerto RS232 presente en el procesador Nios embebido en la tarjeta de desarrollo utilizada para el prototipo.

### *Pruebas*

Para corroborar el funcionamiento del sistema, se supone un arreglo conformado por 4 elementos de antenas, los parámetros: Tasa de error de bits (BER) Vs. relación señal a ruido (Eb/No), y Densidad Angular de Potencia (Potencia Vs. Angulo de incidencia).

La primera medida se realizó evaluando la transmisión de 244 Mbits de usuarios, 1M trama. También se fijaron los ángulos de incidencia de las señales provenientes de los usuarios [23]:

Ángulo de Incidencia Usuario 0 = 45°

Ángulo de Incidencia Usuario 0 = 80°

Ángulo de Incidencia Usuario 0 = 10°

Se llevaron a cabo 50 mediciones para 16 valores de Eb/No dentro del rango preestablecido por la interfaz de usuario. Finalmente se repitió el mismo procedimiento de prueba para un sistema basado únicamente en acceso múltiple por división de código (Sistema Monousuario), con dos usuarios interferentes [23].

La investigación concluye, en base a los resultados, que un arreglo de antenas inteligentes es más resistente al efecto del ruido para razones bajas de Eb/No en comparación con los receptores monousuarios. Con esta afirmación, se argumenta que el uso de antenas inteligentes puede incrementar la capacidad del sistema permitiendo ofrecer servicios a más usuarios dentro de una misma celda sin aumentar los canales de radio ni los códigos utilizados. [23]

## **6.11 APLICACIÓN DE ANTENAS INTELIGENTES A UMTS**

En un entorno UMTS el número de usuarios que utilizaran la misma frecuencia al mismo tiempo será muy alto, por esta razón se deben distinguir unos de otros

mediante un código *scrambling* [28]. Por otro lado, la configuración SFIR (*Rechazo de interferencia por filtrado espacial*) es más beneficiosa por que presenta mejoras en la calidad, seguridad y aumento en la capacidad del sistema [28]. Dicha configuración puede implementarse con cualquiera de los esquemas de antenas inteligentes. [28]

La elección del algoritmo que rige la conformación de haces depende de las prestaciones que se le quieran dar al sistema, teniendo en cuenta que no son aconsejables algoritmos que demanden una fuerte carga computacional a los procesadores, lo más aconsejable sería utilizar algoritmos adaptativos que solo requieren cálculos mínimos para actualizar la conformación del haz. [28]

De la estructura de canales de transporte definida en UMTS, no todos permiten transmitir o recibir a través de una antena de haz conformado, algunos requieren el uso de una antena omnidireccional o sectorial. Los únicos canales que admiten conformación de haz son el canal dedicado (DCH) y el canal de acceso dirigido (FACH) [28]:

- El DCH es el canal bidireccional que lleva los datos y la señalización asociada a un usuario. [28]
- El FACH es un canal *downlink* que lleva los avisos (*pages*) para los terminales móviles cuya situación es conocida por la red.

La componente *uplink*, en el canal DCH, puede ser de gran utilidad. En el enlace descendente se puede apuntar al usuario deseado haciendo uso de algoritmos de detección de la DoA y de una síntesis del haz. [28]

En el artículo [28] se menciona como afectan las antenas inteligentes algunos procedimientos:

*Sincronización y búsqueda de celda.* No se ven modificados, estos procedimientos se realizan a través de los canales de difusión, acceso aleatorio, etc. Al igual que el procedimiento de reelección de celda, que se realiza cuando el móvil se encuentra en modo de espera. [28]

*Control de potencia.* Las antenas inteligentes deberían mejorar las prestaciones del control de potencia, al conseguir una reducción en la potencia transmitida por ambas partes. [28]

*Establecimiento de llamadas.* En el momento en que el móvil hace uso del canal de acceso aleatorio para solicitar el establecimiento de una comunicación, el Nodo B podría utilizar estas señales que recibe para estimar la DoA del usuario, de modo que se puede generar un diagrama de radiación, apuntando hacia él, que será utilizado por el canal dedicado durante toda la llamada. [28]

*Localización.* Este procedimiento podría mejorarse si se emplea la dirección de apuntamiento de las antenas. Pero también se pueden dar conclusiones incorrectas, en el caso que no exista línea de vista entre el móvil y la base, la comunicación puede darse mediante rayos reflejados y la antena a punta a las direcciones de las que provienen estos rayos. [28]

*Llamadas.* En este momento, en el que se está usando un canal dedicado bidireccional que puede ser transmitido y recibido mediante una antena inteligente, los algoritmos de conformación de haz y de detección de las DoAs deben ejecutarse con precisión para que la llamada prospere. [28]

*Handover.* Este es el procedimiento más afectado por el uso de antenas inteligentes. Si un móvil esta en mitad de una llamada y necesita cambiar de celda, la nueva estación base a partir de los mensajes que intercambie con él tendrá que evaluar su DoA. Una vez conocida ésta, ya podrá generar el diagrama de radiación directivo. [28]

### **6.11.1 Comparación de dos tecnologías distintas de antenas inteligentes en UMTS**

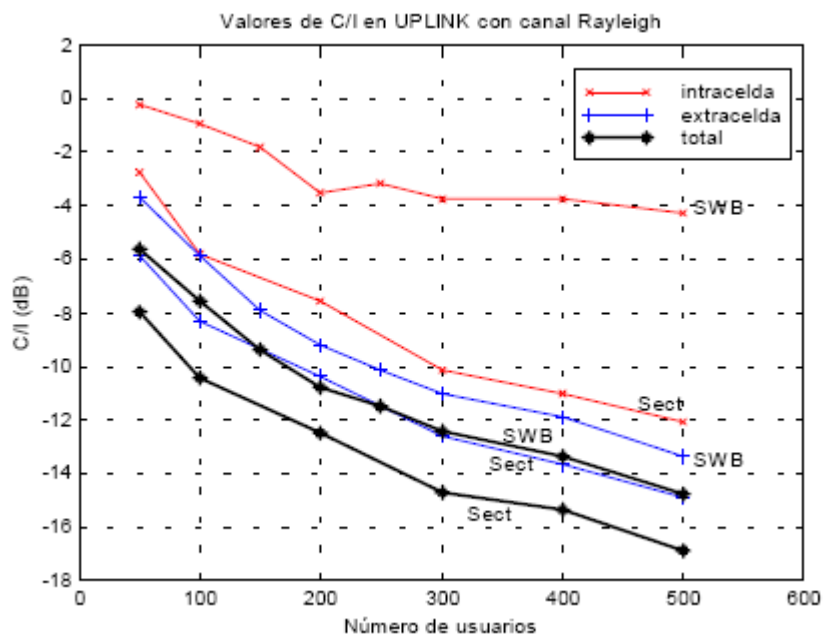
Dentro de los métodos para dar cabida a más usuarios en los nuevos sistemas de comunicaciones móviles de tercera generación UMTS, se mencionan la asignación de más bandas de frecuencia o la reducción del tamaño de las celdas del sistema. Pero se cree que no serian soluciones viables a largo plazo. [29]

Discriminar a los usuarios por su posición espacial utilizando antenas inteligentes en las estaciones base, sería otra posible solución, además de otras ventajas como la extensión de la zona de cobertura y la disminución de la interferencia procedente de usuarios no deseados. [29]

#### *a) Antenas de haces conmutados*

Estas antenas presentan un funcionamiento más simple que otras configuraciones. Dispone de un conjunto fijo de haces para dar cobertura a cada sector o celda de 120° (típicamente, 4 haces de 30°). El receptor de la estación base asignara a cada móvil el mejor haz de acuerdo con algún criterio de optimización. [29]

En el caso de utilizar redes de Butler, los haces son ortogonales entre si y se cortan a un nivel de -4dB respecto del máximo de radiación [24].



**Figura 76: Valores medios de C/I (enlace ascendente).<sup>72</sup>**

En la Figura 74, se muestran los valores de relación  $C/I$  (*Relación portadora a interferencia*) intracelda, extracelda y total en el enlace ascendente obtenido con antes sectoriales de  $120^\circ$  y con antenas de haces conmutados para un determinado entorno rural definido por los autores del artículo [29]. Las simulaciones se hicieron para diferentes densidades de usuarios de voz (8 kbps); modelos de propagación, canal de Rayleigh y desvanecimiento lento; diferentes algoritmos de control de potencia y handover entre celdas [29]. Según los resultados, aumenta la relación de  $C/I$  (reducción de interferencias), haciendo posible la aparición de un mayor número de usuarios.

#### b) Antenas adaptativas

En este caso el control del diagrama de radiación se hace por medio de un algoritmo adaptativo a partir de una referencia en el receptor de la estación base. Para ello es necesario definir un modelo de canal que tenga en cuenta todas las características del canal [29]. El modelo de señal utilizado en el artículo [29], considera la dispersión temporal y angular. El vector de señales recibidas en cada elemento del array procedente de  $N$  usuarios con  $N_{taps}$  multirrayectos puede expresarse como:

<sup>72</sup> Tomado de: Estudio preliminar de prestaciones de antenas inteligentes para UMTS; Ramón Martínez, David Trosa, Leandro de Haro, Miguel Calvo; Universidad Politécnica de Madrid, 2001.

$$\underline{Y}(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^{Ntaps} c(\phi_i + \Delta\phi_{il}) \alpha_{il} \exp(j2\pi v_{il}t) u_i(t - \tau_{il}) + \underline{N}(t)$$

Donde  $\alpha_{il}$ ,  $\tau_{il}$  y  $v_{il}$  son la amplitud, retardo y frecuencia *Doppler* del trayecto *l*-ésimo,  $u_i(t)$  es la señal de datos en banda base del usuario *i*-ésimo, y  $\underline{N}(t)$  es el ruido térmico;  $\phi_i$  es el ángulo incidente en azimut del trayecto principal del usuario *i*-ésimo y  $\Delta\phi_{il}$  es la dispersión acimutal respecto de  $\phi_i$ ; la respuesta del *array* viene dada por el *steering* vector de cada uno de los *M* elementos.

$$c(\phi) = [1 \dots \exp(-j(M-1)\pi \sin\phi)]^T$$

La señal de referencia en el receptor se genera a partir de los códigos CDMA usados por los diferentes usuarios. Con esta señal se obtienen los pesos apropiados del *array* para reducir la interferencia recibida de usuarios no deseados y seguir a la señal deseada. [29]

Mediante la ortogonalidad entre los códigos de los diferentes usuarios, puede generarse una señal de error  $e(t)$  cuya potencia se minimizará con el procesamiento adaptativo, esta señal estará compuesta de la interferencia de otros usuarios y por ruido por lo que es necesario filtrarla. El algoritmo genera un vector de peso  $\underline{w}$ , que minimizará la potencia del error  $e(t)$ , con el fin de conformar adecuadamente la relación señal frente a interferencias (SIR). [29]

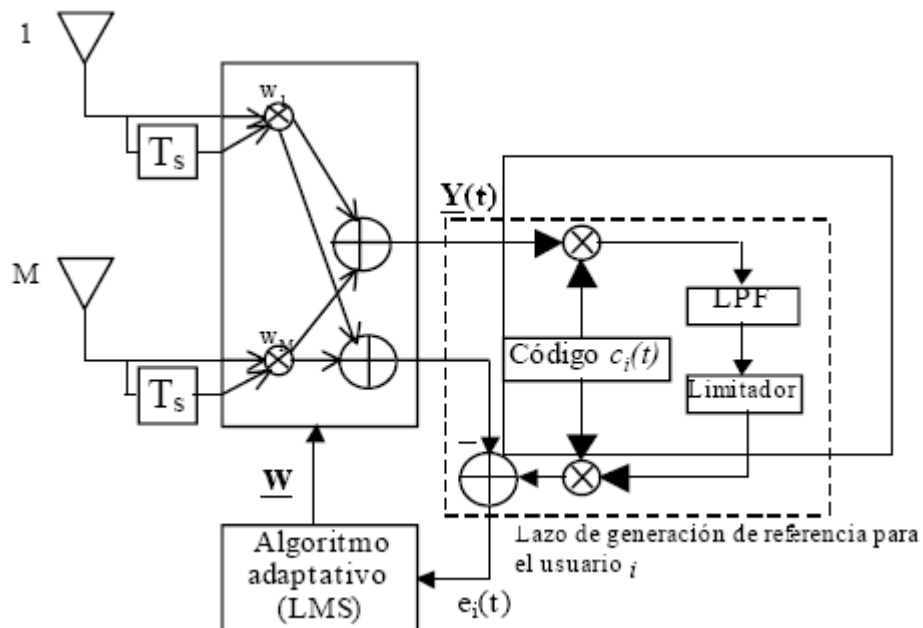
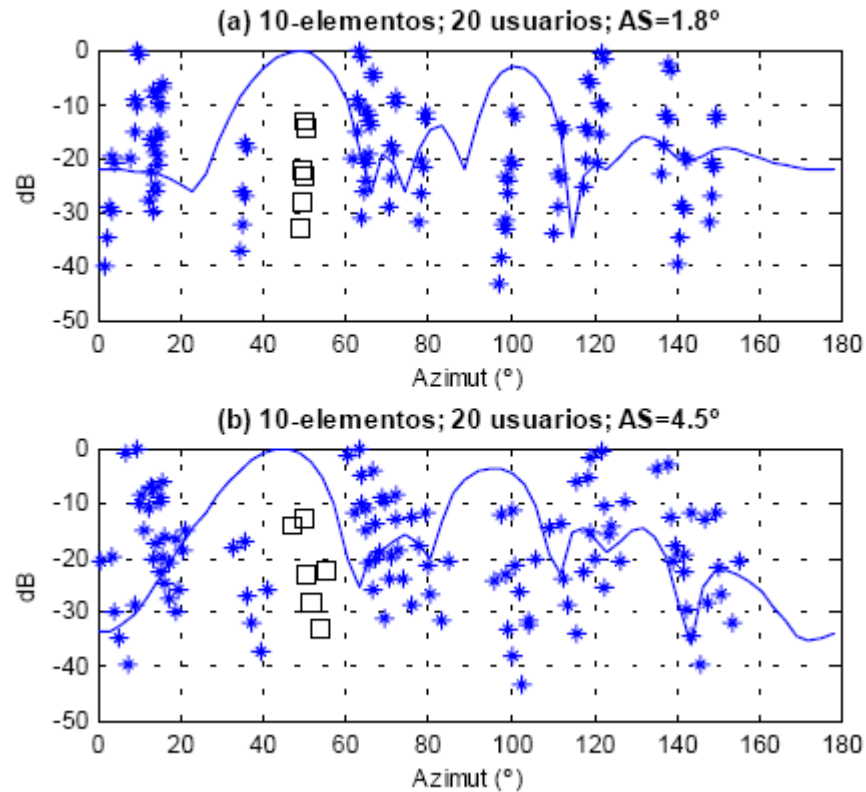


Figura 77: Diagrama de bloques del receptor de la estación base y lazo de generación de la referencia.<sup>72</sup>

Las simulaciones basadas en algoritmos LMS normalizados, señales moduladas BPSK, y elementos del array equiespaciados media longitud de onda. La dispersión angular se genera siguiendo una distribución laplaciana, con 1.8 y 4.5° de dispersión acimutal, típicos de entornos rurales. [29]



**Figura 78: Diagramas de radiación conformados de un array de 10 elementos y diferentes dispersiones angulares.<sup>72</sup>**

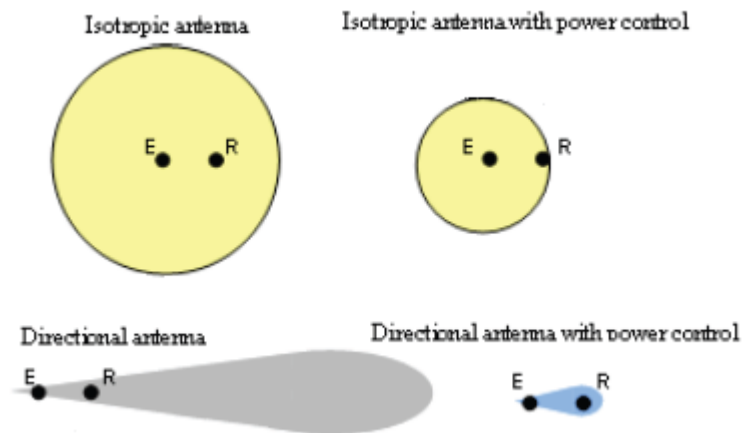
La Figura 76, muestra los diagramas de radiación obtenidos para un array de 10 elementos y 20 usuarios, cada uno de los cuales alcanza el receptor con un numero de trayectos igual a  $N_{taps}=6$ . En las direcciones de las interferencias aparecen nulos y máximos hacia el usuario deseado. La mejora en el valor de la SIR para el usuario deseado es mayor para el caso de menor dispersión angular (17 dB frente a 11 dB).

En conclusión ambas antenas presentan mejoras importantes de capacidad para sistemas UMTS. Las de haces conmutados se despliegan más fácilmente, pero ofrecen prestaciones menores a las que se obtienen con antenas adaptativas. [29]

## 6.12 ANTENAS INTELIGENTES EN LAS REDES DE SENSORES

Las redes de sensores son uno de los campos de las comunicaciones móviles, en el que se han venido adelantando estudios con el fin de implementar la tecnología de antenas inteligentes.

Los recientes avances en transmisión y en banda milimétrica permiten el uso de esta tecnología de antenas, gracias a la longitud de onda y el tamaño de los circuitos. [30]

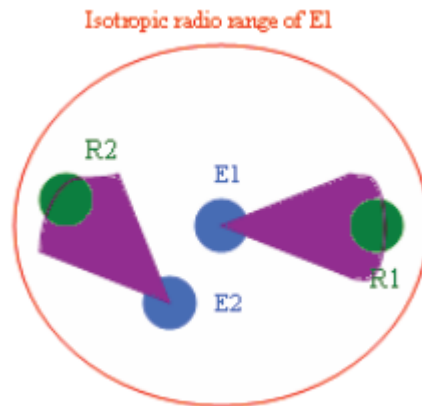


**Figura 79: Ilustración de la ganancia de antena isotrópica y antena dirección con control de potencia.**<sup>73</sup>

Las antenas inteligentes son mucho más convenientes para las redes de sensores que las antenas convencionales; gracias a sus haces directivos, se puede reducir la emisión de potencia, y este es un factor de vital importancia en las redes de sensores [30]. Estos dos elementos, los haces directivos y la reducción en la emisión de potencia, hacen más eficiente el consumo de energía tanto en la transmisión como en la recepción [30]. Además al ser emitida la señal en un cono, en lugar de una esfera, se logra reducir significativamente el número de colisiones y en consecuencia la retransmisión.

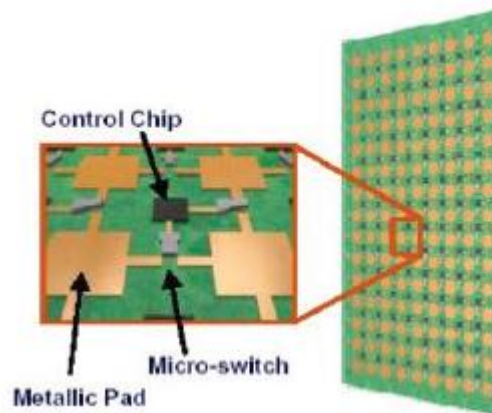
<sup>73</sup> Tomado de: <http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/35/68/52/PDF/fet-final.pdf>, consultado 11 de Enero del 2010.





**Figura 80: Incremento de la capacidad gracias a las antenas inteligentes.**<sup>73</sup>

Recientes avances en sistemas micro-electromecánicos han hecho posible el desarrollo de switches muy eficientes para antenas inteligentes de haz conmutado. Gracias a estos switches, dichas antenas tienen mejor ganancia que las que son solo electrónicas. [30]



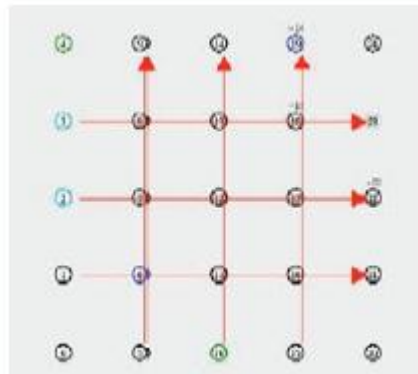
**Figura 81: Antena inteligente con micro switch.**<sup>73</sup>

En el artículo [30], comparan el rendimiento del protocolo D802.15.4 con el IEEE 802.15.4 estándar, con el software NS-2. En primer lugar se evalúa el impacto de la topología de la red y los patrones de tráfico. [30]

Number of nodes	25
Distance between nodes	10 m
Transmission range of directional antennas	20 m
Transmission range of isotropic antenna	10 m
Main lobe gain	15 dBi
SNR threshold	6 dB
Reception threshold	-94dbm

**Tabla 14: Parámetros del escenario simulado.**<sup>73</sup>

Este escenario se ilustra en la Figura 80. y consiste en una topología cuadriculada con las corrientes de trafico representadas por flechas rojas. [30]



**Figura 82: Topología de la red simulada.**<sup>73</sup>

El objetivo de este escenario es presentar los resultados de D802.15.4 con topología lineal. Cabe destacar que estas topologías no son las más favorables para D802.15.4 debido a la superposición entre las diferentes corrientes.

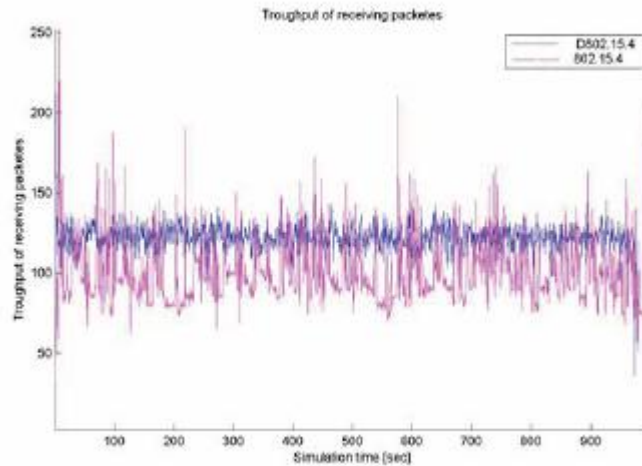


Figura 83: Rendimiento promedio en función del tiempo de simulación.<sup>73</sup>

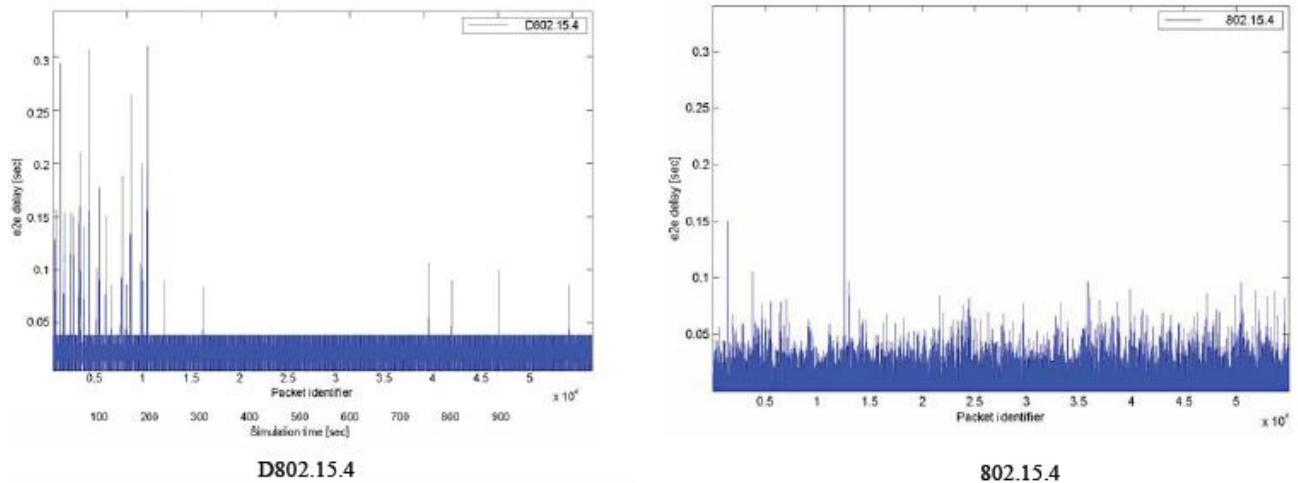


Figura 84: Retraso extremo a extremo respecto a identificador de paquete para D802.15.4 y 802.15.4.<sup>73</sup>

Para este escenario, se observan rendimiento y retraso similares entre los protocolos D802.15.4 y el IEEE 802.15.4. Sin embargo, el retraso es más estable en D802.15.4 debido a la menor tasa de colisión. Esta variación del retardo de extremo a extremo se llama *jitter*. Este parámetro es una cifra importante en la evaluación del rendimiento, especialmente para aplicaciones en tiempo real. Los resultados de la simulación han demostrado que a diferencia del protocolo IEEE 802.15.4, el D802.15.4 permite reducir al mínimo fluctuaciones y variaciones de retardo. [30]



## 7 BREVE EVOLUCIÓN CRONOLÓGICA Y ALGUNAS APLICACIONES

### 7.1 MARTIN COOPER LLEGA CON BUENAS VIBRACIONES<sup>74</sup>

El ingeniero norteamericano Martin Cooper, hijo de inmigrantes ucranianos, nació en 1928 en Chicago (EE UU), su infancia transcurrió durante la Gran Depresión, para poder costearse los estudios en el Illinois Institute of Technology se enroló en un destructor de la Armada y participó en la guerra de Corea. En 1954 empezó a trabajar en la multinacional Motorola mientras, por las noches, cursaba el doctorado.

Después de casi dos décadas dedicado a la investigación creativa en lo que se puede considerar como prehistoria de la telefonía móvil, el día tres de abril del año 1973, Cooper estaba en la esquina de una calle en Manhattan, camino de una conferencia de prensa en un hotel, y decidió probar su terminal experimental Dyna-Tac e intentar hacer una llamada personal. Presionó la tecla para conectar el prototipo de móvil que había construido y el aparato logró enlazarse a la red fija. Entonces Cooper marcó el número de su rival, Joel Engel, jefe del departamento de investigación de Bell Labs. Ese fue el instante seminal de la telefonía móvil que ha revolucionado a la humanidad.

Tres años después el invento de Martin Cooper empezó a generar ingresos para Motorola. «Costó mucho y llevó mucho tiempo», señaló en una ocasión Cooper, que siempre ha tenido una visión a largo plazo de su proyecto. Precisamente esa seguridad y tenacidad del inventor chocó en muchas ocasiones con la impaciencia o sentido del ahorro en las inversiones de sus jefes que no veían aparecer los frutos de tanto esfuerzo.

El prototipo Dyna TAC, que pesaba un kilogramo, contaba con una batería que tenía una duración de apenas 35 minutos. Cooper consiguió reducir su peso a la mitad y en 1983 salió a la venta con un precio de unos 2.900 euros.

En 1983 Cooper dejó Motorola y fundó ArrayComm, una compañía que trabaja en la investigación de antenas inteligentes y la mejora de la tecnología inalámbrica de redes.

---

<sup>74</sup> Tomado de: <http://www.lne.es/sociedad-cultura/2009/10/20/cooper-llega-buenas-vibraciones/823266.html>, consultado el 15 de Enero del 2010.

En alguna ocasión, el flamante premio «Príncipe de Asturias» de Investigación 2009 llegó a confesar que fue precisamente viendo al Capitán Kirk usar su comunicador en la serie de ciencia ficción «Star Trek» lo que le inspiró para desarrollar el teléfono móvil.

## **7.2 MEJORAN ANTENAS INTELIGENTES CALIDAD DE LA COMUNICACIÓN (EL NORTE, NOVIEMBRE 30, 1998).<sup>75</sup>**

Byline: Carlos A. Velázquez

Las antenas inteligentes proporcionarán mayor capacidad a las comunicaciones inalámbricas, lo que permitirá acceder otros servicios además de voz, indicó Reinaldo Valenzuela.

El director del departamento de investigación en comunicaciones inalámbricas de Laboratorios Bell, explicó que las antenas inteligentes están a punto de salir al mercado y que pueden ser utilizadas para mejorar la calidad o aumentar la capacidad en la transmisión.

"La calidad y capacidad son los dos extremos en los que nos podemos mover, es decir una combinación de ambas, o algún punto intermedio dependiendo de cuales sean los intereses del operador celular", añadió.

"Hablamos de antenas múltiples para recibir copias múltiples. Es como recibir un fax que esta medio ruidoso y no de muy buena calidad, por lo que si te lo mandan 3 ó 4 veces, mirando las copias puedes corregir los errores o ver que estaba detrás del manchón, esta es una analogía bien visual de lo que son las antenas inteligentes".

## **7.3 ANTENAS INTELIGENTES (EL DÍA, DICIEMBRE 27, 2003).<sup>76</sup>**

La utilización de antenas inteligentes para los servicios de telefonía móvil de tercera generación permitirá dar servicio a un mayor número de usuarios con los mismos recursos, con lo que se puede reducir el número de emplazamientos con la consiguiente reducción de costes para el operador.

---

<sup>75</sup> Tomado de: [http://www.accessmylibrary.com/coms2/summary\\_0286-1201852\\_ITM](http://www.accessmylibrary.com/coms2/summary_0286-1201852_ITM), consultado el 15 de Enero del 2010.

<sup>76</sup> Tomado de: <http://www.eldia.es/2003-12-27/comunicacion/comunicacion6.htm>, consultado 15 de Enero del 2010.

Esta es una de las conclusiones del estudio sobre antenas inteligentes en sistemas de comunicaciones móviles de tercera generación, que recibió el premio a la mejor tesis doctoral en la convocatoria de Telefónica Móviles.

La tesis de Ramón Martínez, fue dirigida por Leandro de Haro Ariet, de la escuela técnica superior de ingenieros de telecomunicaciones donde se está desarrollando un prototipo de antena inteligente adaptativa para el sistema W-CDMA.

La diferencia entre una antena convencional y una inteligente es que la primera tiene un diagrama de radiación fijo que no varía mientras que la segunda modifica este diagrama de radiación para adaptarse al entorno electromagnético, de forma que apunta a los usuarios deseados en cada momento en lugar de hacerlo a todos como en las convencionales. De esta manera se reduce la contaminación electromagnética.

Este tipo de antenas permiten incrementar la cobertura de una zona y son especialmente interesantes para las zonas rurales con poca población ya que hacen que sea necesario instalar un menor número de estaciones base.

Además, siempre según el estudio, con estas antenas se ahorra potencia de transmisión lo que permite aumentar la duración de las baterías del móvil y las estaciones consumen menos y aumenta la capacidad por reducción de interferencias.

Finalmente mejora la eficiencia del espectro, la calidad de las comunicaciones y la seguridad.

El estudio aborda las razones por las que las operadoras todavía no se han decidido a instalar este tipo de antenas y dice que se debe a una mayor complejidad en su implementación ya que para poder sintetizar los diagramas de radiación óptimos se necesitaban costosos y complejos sistemas de procesamiento de señal que encarecían el coste total de la antena.

No obstante, dice que, en los últimos años, gracias al avance de los circuitos integrados, se ha podido reducir el coste asociado y se han desarrollado potentes plataformas de procesamiento digital.

Por otra parte, dice, el incremento del coste se ve compensado por el aumento del número de usuarios a que se puede dar servicio y a las nuevas posibilidades que ofrece.

#### **7.4 SIEMENS CONSIGUE TRANSMITIR DATOS POR COMUNICACIONES MÓVILES A 1 GBPS (COMUNICACIONES WORLD, DICIEMBRE 16, 2004).<sup>77</sup>**

Los laboratorios de investigación de la división de Comunicaciones de Siemens han batido un récord mundial al conseguir por primera vez transferir datos en tiempo real mediante comunicaciones móviles a una velocidad de 1 Gbps.

Para lograr esta velocidad, Siemens ha combinado un sistema de antenas inteligentes, formado por tres antenas transmisoras y otras cuatro receptoras, con multiplexación por división ortogonal de frecuencia (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM). En opinión de los investigadores, estas tecnologías, que hacen un uso especialmente eficaz de la banda de frecuencias, presentan un potencial muy elevado para las comunicaciones móviles del futuro.

Según las previsiones más conservadoras, la capacidad necesaria para transmitir voz, datos, imágenes y multimedia con la próxima generación de sistemas de comunicaciones móviles (cuya aparición se espera para el año 2015) será 10 veces mayor que la actual. “En el futuro, los sistemas de comunicaciones móviles tendrán que utilizar la banda de frecuencias de la forma más eficaz posible y con la mínima potencia de transmisión”, explica Christoph Caselitz, presidente de la división de Redes Móviles de Siemens Comunicaciones. “Nuestro sistema experimental nos ha permitido demostrar las posibilidades de las antenas inteligentes combinadas con OFDM y, de esta forma, crear un módulo muy importante para los sistemas de comunicaciones móviles del futuro”.

Según la técnica de “sistemas de antenas múltiples” o “sistemas de múltiple entrada y múltiple salida” (Multiple Input - Multiple Output, MIMO), varias antenas transmiten simultáneamente distintos flujos de datos en un solo canal radioeléctrico y en la misma banda de frecuencias. Es como si varios grupos de personas en una habitación mantuvieran al mismo tiempo conversaciones dentro de su propio grupo y con los otros grupos, pero sin interferencias entre las distintas conversaciones. A diferencia de las antenas convencionales, que cada una de ellas transmite en una frecuencia distinta, el método MIMO permite multiplicar las velocidades de transmisión de datos al hacer un uso mucho más eficiente de la banda de frecuencias.

Uno de los motivos por los que todavía no se ha generalizado el uso de sistemas de antenas múltiples es que requieren una potencia de computación muy elevada en el extremo receptor. Esto se debe a que se utilizan antenas múltiples para transmitir simultáneamente y recibir la información, por lo que es necesario reconstruirla en tiempo real para enviarla al sistema receptor. Esta operación supera la capacidad de los chips convencionales que se emplean actualmente en

---

<sup>77</sup> Tomado de: <http://www.networkworld.es/Siemens-consigue-transmitir-datos-por-comunicacion/seccion-moviles/noticia-38947>, consultado 15 de Enero del 2010.



el sector de las comunicaciones móviles. Los investigadores de Siemens superaron esta dificultad desarrollando y optimizando algoritmos de procesamiento de señales que se pueden aplicar a los módulos hardware disponibles hoy en día.

El sistema experimental funciona en la banda de 5 GHz y tiene un ancho de banda de 100 MHz. El método de transmisión con multiplexación por división ortogonal de frecuencia (OFDM) que utiliza el sistema protege las señales contra la mayor parte de las interferencias, como los ecos que se producen cuando las señales se reflejan en edificios. Este método, que se conoce desde hace ya algún tiempo y está considerado como una tecnología de transmisión muy prometedora para las comunicaciones móviles del futuro, ya se está utilizando en LAN inalámbrica, así como en televisión (DVB) y radio (DAB) digital. El equipo de investigación de Siemens ya ha comenzado a trabajar para aumentar todavía más la velocidad de transmisión de datos y mejorar la movilidad de dispositivos equipados con antenas múltiples.

Siemens ha desarrollado este sistema experimental para transmisión a un gigabit de velocidad, que se presentará al público en general en Cannes en el Congreso Mundial sobre 3GSM del año 2005, en colaboración con el Instituto Fraunhofer de Telecomunicaciones (Instituto Heinrich Hertz) y el Instituto de Tecnología Aplicada para Sistemas Radioeléctricos.

#### **7.5 NAVINI NETWORKS Y ULTRANET2GO ANUNCIAN EL LANZAMIENTO COMERCIAL DE BANDA ANCHA INALÁMBRICA PERSONAL EN MÉXICO (JUNIO 29, 2005).<sup>78</sup>**

RICHARDSON, Texas, 29 de junio /PRNewswire/ -- Ultranet2go, una división recientemente formada de ZOMA Telecom de México, y Navini Networks, Inc., el proveedor líder de equipos de redes de banda ancha inalámbrica personal non- line-of-sight (NLOS sin línea de vista), y zero-install(TM) (sin instalación), anunció hoy el lanzamiento comercial de sus servicios en Puebla, México.

"Estamos ofreciendo verdadero acceso de banda ancha inalámbrica personal a México", manifestó Patricio Zorrilla, CEO de Ultranet2go. La red de Navini ofrece acceso instantáneo de alta velocidad a 3 millones de usuarios potenciales y ofrece una incomparable cobertura contigua de más de 60 millas cuadradas para satisfacer las necesidades de los usuarios de los sectores residencial, empresarial y profesional".

Navini Networks ofrece una solución de red de banda ancha inalámbrica portátil exclusiva que beneficiará a los usuarios inmediatamente. El sistema de banda ancha inalámbrica de área amplia de Navini es una solución NLOS capacitada

---

<sup>78</sup> Tomado de: <http://www.sys-con.com/node/105327>, consultado 15 de Enero del 2010.

por antenas inteligentes. La tecnología ofrece una gama muy amplia de cobertura y con su activación fácil similar al teléfono celular, los usuarios puedan estar en total operación rápidamente.

"Con el acceso de banda ancha inalámbrica personal de Navini los usuarios en México podrán disfrutar la libertad que sólo la banda ancha portátil puede ofrecer, acceso a Internet de alta velocidad a cualquier hora, y desde cualquier lugar dentro del área de servicios", manifestó Roger Dorf, presidente y CEO de Navini Networks. "Además, estarán magníficamente posicionados para aprovechar el acceso móvil de banda ancha inalámbrica de próxima generación, WiMAX basado en 802.16e con Navini Networks".

"Navini Networks nos presentó una valiosa propuesta muy atractiva para nuestro mercado", añadió Zorrilla. "Con servicio portátil para los usuarios, precios competitivos e instalación plug-n-play, los usuarios pueden utilizar su banda ancha en el trabajo, en sus hogares o en el parque... en cualquier lugar que deseen".

La expansión ya está programada para mercados tales como: Veracruz, Tampico, Matamoros, Xalapa, Coatzacoalcos, Cuernavaca, Aguascalientes, Chilpancingo, Iguala.

#### **7.6 LA UPV DISEÑA ANTENAS ACCESIBLES Y BARATAS PARA VER TELEVISIÓN VÍA SATÉLITE EN AUTOMÓVILES (ELMUNDO.ES, NOVIEMBRE 01, 2008).<sup>79</sup>**

Investigadores de la Universidad Politécnica de Valencia están diseñando nuevas antenas de telecomunicaciones y avanzados sistemas de radiofrecuencia inalámbricos "accesibles y baratos" capaces de ofrecer el ancho de banda necesario para la futura generación de comunicaciones móviles (4G).

Estas antenas darán incluso la posibilidad de ver la televisión vía satélite mientras se viaja en vehículo de turismo o en tren por cualquier rincón del mundo, y todo ello con la mejor calidad posible.

"El haz de la antena situada en el coche o el convoy debe poder redireccionarse constantemente hacia el satélite, de modo que el desplazamiento del vehículo no interfiera en la recepción de la señal", según ha explicado el profesor Alejandro Valero, coordinador del proyecto.

---

<sup>79</sup> Tomado de: <http://www.elmundo.es/elmundo/2008/01/11/valencia/1200083213.html>, consultado 15 de Enero del 2010.

Los investigadores del Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (iTEAM) de la UPV trabajan para conseguir "una solución barata y accesible al consumidor medio", ha porcisado el profesor Valero.

Los equipos, según ha dicho Valero, incluirán antenas de bajo perfil con alta ganancia y poco consumo, que serán capaces de soportar sistemas de comunicaciones con velocidades de transmisión de gigabit.

"El objetivo final -ha señalado- es construir un demostrador multi-antena para plataformas móviles (tren, coche), que sean capaces de transmitir información a gran velocidad, en entornos exteriores e interiores".

"Nuestro trabajo se centra exclusivamente en el diseño de antenas, con la vista puesta en futuras aplicaciones como las descritas", ha añadido el coordinador del proyecto.

Se trata de una tecnología todavía incipiente que empezará a extenderse en los próximos años y en la que trabajan centros de investigación de todo el mundo.

Por otro lado, los investigadores del Instituto iTEAM están trabajando también en el diseño de antenas inteligentes para coches.

Entre las aplicaciones que se empiezan a desarrollar y que precisan de estas antenas destacan las que tienen que ver con la mejora de la seguridad en las carreteras.

Según explican los investigadores del iTEAM, los futuros sistemas, instalados en los vehículos, permitirán que estén permanentemente interconectados entre sí.

De este modo, ante un atasco, accidente o cualquier otra incidencia que se produzca en la vía, podrá transmitirse esta información de uno a otro vehículo en tiempo real y de forma inmediata.

"La transmisión de esta información será muy útil para el conductor, que ante una incidencia podrá optar por tomar una alternativa en su ruta, sin pasar por el punto en el que tráfico esté congestionado", ha señalado el profesor Alejandro Valero.

## **7.7 UN PROYECTO PARA OPTIMIZAR LAS TRANSMISIONES TELEFÓNICAS, DE RADIO Y TELEVISIÓN (NOVIEMBRE 9, 2009).<sup>80</sup>**

Cambiando la frecuencia y la tensión de red que llega a los convertidores electrónicos de potencia se puede mejorar el rendimiento del amplificador y avanzar en la optimización de las transmisiones de telefonía móvil, de radio o de televisión. Éste es uno de los proyectos más ambiciosos del área de Tecnología Electrónica de la Universidad vinculado a antenas inteligentes y que

---

<sup>80</sup> Tomado de: <http://www.lne.es/gijon/2009/11/09/proyecto-optimizar-transmisiones-telefonicas-radio-television/831581.html>, consultado 15 de Enero del 2010.

explica así el catedrático Javier Sebastián: “Se trata de sistemas electrónicos de alimentación de respuesta muy rápida, capaces de mejorar el rendimiento de los amplificadores de radiofrecuencia que trabajan con señales modulares de amplitud no constante”.

En definitiva, se pretende mejorar la vida útil de los aparatos que emiten señales de radio, con una pérdida mínima de energía para perfeccionar de esta forma las comunicaciones móviles desde el origen.

El proyecto se inició a finales de 2007 y cuenta con financiación del plan nacional de proyectos de I+D. La investigación en cuestión tiene aplicación directa en el mundo de la telefonía y la televisión y en todas las transmisiones de radio donde la amplitud de la señal varía con la información a transmitir. Sebastián, que también es miembro del grupo de Sistemas Electrónicos de Alimentación (SEA), explica que se trata de «un problema muy abierto». Ahora están trabajando con amplificadores de frecuencia más baja para estaciones base de telefonía.

El grupo de Sistemas de Electrónicos de Alimentación cuenta con la patente de un dispositivo convertidor de corriente alterna/continua. También ofrecen docencia sobre microprocesadores y microcontroladores, instrumentación electrónica, electrónica de comunicaciones y electrónica de potencia.

## CONCLUSIONES

- Teniendo en cuenta la problemática ambiental por la que atraviesa el mundo y los efectos de contaminación (visual como de radiación) de las antenas convencionales, las Antenas Inteligentes resultan ser una alternativa para mitigar dichos inconvenientes ya que al proporcionar un mayor área de cobertura es posible reducir el número de estaciones base y soportar un mayor número de usuarios, además al no irradiar constantemente reduce significativamente el consumo de energía tanto en la transmisión como en la recepción.
- Las antenas en general juegan un papel fundamental en todos los sistemas de comunicaciones inalámbricas. Cualquier adelanto o avance en estos dispositivos se ven reflejados en mejoras de intensidad y cobertura de señal, tal como lo muestra la tecnología de Antenas Inteligentes.
- Existen diferentes tipos de implementaciones para antenas inteligentes y gran variedad algorítmica, que es la base fundamental del funcionamiento de las antenas y sobre la cual es protagonista la intervención humana.
- Según la documentación y bibliografía consultada, la tecnología de antenas inteligentes se encuentra todavía en una etapa muy temprana de su desarrollo, por lo que son necesarios más esfuerzos para impulsar esta tecnología en el ámbito comercial y académico.
- Es importante indagar el área de la propagación para ampliar el conocimiento de esta e incentivar nuevas investigaciones, ya que en la región su estudio es escaso y este es un factor determinante en el desarrollo y mejoramiento de las telecomunicaciones.

## REFERENCIAS

- [1] M. A. Criado. "Martin Cooper", entrevista. Diario: Público. Madrid. Vol. 06/09/2009.
- [2] C. A. Velázquez. "Mejoran antenas inteligentes calidad de la comunicación", artículo. Diario: El Norte. México. Vol. 30/11/1998.
- [3] J. Delgado. "Telefónica Móviles satisfecha con el lanzamiento precomercial del UMTS", artículo. www.noticias.com. Madrid. Vol. 05/12/2003.
- [4] C. Hernández. "TELEVES presenta la DAT HD, la primera antena 'inteligente' para la TDT y la futura televisión de alta definición (HDTV)". www.televes.com. Colonia. Vol. 26/05/2009.
- [5] A. Gil, B. Guarné, D. López, I. Rodríguez, A. Vítóres. Tecnologías sociales de la comunicación. Capítulo 5. Editorial UOC. Barcelona. 2005.
- [6] J. Katz, R. Rice. Consecuencias sociales del uso de internet. Capítulo XI. Editorial Eureka Media. Barcelona. 2005.
- [7] M. Medina, T. Kwiatkowska. Ciencia, tecnología/naturaleza, cultura en el siglo XXI. Capítulo VI. Editorial Anthropos. México. 2000.
- [8] W. Tomasi. Sistemas de comunicaciones electrónicas. Capítulo 1. Pearson Educación. México 2003.
- [9] D. Muñoz. Sistemas inalámbricos de comunicación personal. Capítulo 1. Marcombo. México. 2001.
- [10] W. Tomasi. Sistemas de comunicaciones electrónicas. Capítulo 9. Pearson Educación. México. 2003.
- [11] J. Krauss. Antennas. Capítulo 2. McGraw-Hill. New York. 1997.
- [12] C. Balanis. Antenna Theory, analysis and design. Capítulo 2. John Wiley & Sons, INC. New York. 1997.

- [13] C. Pérez, J. Zamanillo, A. Casanueva. Sistemas de telecomunicaciones. Capitulo 6. Publicaciones Universidad de Cantabria. Madrid. 2007.
- [14] T. Mosca. Física para la ciencia y la tecnología. Capitulo 31. Editorial Reverté. Barcelona. 2007.
- [15] O. Sallent, J. Valenzuela, R. Agustí. Principios de comunicaciones móviles. Capitulo 2. Ediciones UPC. Barcelona. 2003.
- [16] R. Blake. Sistemas electrónicos de comunicaciones. Capitulo 15. Thomson. Buenos Aires. 2004.
- [17] J. A. Hernández. Antenas: principios básicos, análisis y diseño. Capitulo 2. Universidad Autónoma de Baja California. Mexicali. 1998.
- [18] A. García. Calculo de antenas. Capitulo 3. Marcombo S.A. Barcelona. 1994.
- [19] M. Gorricho, J. Gorricho. Comunicaciones Móviles. Capitulo 1. Ediciones UPC. Barcelona. 2002.
- [20] M. Jiménez, J. Pascual, L. Rubio. Problemas de comunicaciones móviles. Capitulo 2. Editorial Universidad Politécnica de Valencia. Valencia. 2006.
- [21] P. Ortega, O. Enríquez, J. Morales. Estudio de antenas inteligentes y principales aplicaciones en telefonía móvil. Artículo. Escuela Politécnica Nacional de Ecuador. JIEE, Vol. 19, Quito, 2005.
- [22] P. Espinosa, C. Villarroel. Proposición y simulación de un algoritmo adaptativo para sistemas de antenas inteligentes. Artículo. Ingeniare, revista chilena de ingeniería. Vol. 15 N°3. Arica, 2007.
- [23] H. Campanella, Y. Comas. Antenas inteligentes con aplicación en SDMA. Artículo, Grupo de Telecomunicaciones y Señales, Universidad del norte. Barranquilla, 2007.
- [24] J. Liberti, T. Rappaport. Smart Antennas for Wireless Communications. Capitulo 3. Prentice-hall. Virginia, 1999.
- [25] C. Mansilla, E. Muñoz, N. Fierro. Antenas inteligentes y su desempeño en redes wireless. Artículo, Revista Guital Sintensis Tecnologica. Vol. 3 N° 2. Valdivia, 2007.
- [26] P. Espinosa, C. Villarroel. Proposición y simulación de un algoritmo adaptativo para sistemas de antenas inteligentes. Artículo, Revista chilena de ingeniería. Vol. 15 N°3. Arica, 2007.

[27] D. Duque, G. Olmedo. Estudio, análisis y simulación del beamforming en antenas inteligentes para un entorno de telefonía celular CDMA. Artículo, Nokia Siemens Networks. Quito, 2008.

[28] O. Moreno, I. Franco, J. Miranda. Introducción a la tecnología de antenas inteligentes. Aplicación a UMTS. Artículo, Comunicaciones de Telefónica, Nº 21. Madrid, 2001.

[29] R. Martinez, D. Trosa, L Haro, M. Calvo. Estudio preliminar de prestaciones de antenas inteligentes para UMTS. Artículo, Grupo de radiación. Universidad Politécnica de Madrid, 2001.

[30] G. Boudour, A. Leconintre, P. Berthou, D. Dragomirecu, T. Gayraud. On desing sensoer networks with smart antennas. Articulo publicado en, 7th IFAC intenational conference on fieldbuses and networks in industrial and embledded systems. Tolouse, 2007.



## BIBLIOGRAFIA

Hernández, Fernández y Baptista, “Metodología de la investigación“, McGraw-Hill, Primera Edición, México 1991.

Constantine A. Balanis, “Antenna Theory”, WIE WILEY, New York 1989.

Wayne Tomasi, Sistemas de Comunicaciones Electrónicas, Prentice Hall, Cuarta Edición México 2003.

Roy Blake, Sistemas Electrónicos de Comunicaciones, Thompson, Segunda Edición, México 2004.

Hernández Rueda José, Antenas: Principios básicos, análisis y diseño, Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali 1998.

Muñoz Rodríguez David Sistema inalámbricos de comunicación personal, Marcombo Editores, México 2001.

Gorricho Moreno Mónica, Gorricho Moreno Juan Luis, Comunicaciones Móviles, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona 2001.

Sallent Roig Oriol, Valenzuela González José Luis, Agustí Comes Ramón, Principios de Comunicaciones Móviles; Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona 2003.

Liberti Joseph C., Rappaport Theodore S., Smart Antennas for Wireless Communications, Prentice Hall, Virginia 1999.

Kaiser Thomas, Smart Antennas – state of the arte, Hindawi Publishing, New York 2005.

El Zooghby Ahmed, Smart Antennna Engineering, Artech House, London 2005

Ebsco – Host, Base de datos, <http://search.ebscohost.com/login.aspx>.

Science Direct, Base de datos, [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).