



**UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL ESTADO  
DE HIDALGO**



INSTITUTO DE CIENCIAS BASICAS E INGENIERIA

---

**“Antenas Inteligentes para Comunicaciones Móviles  
Celulares.”**

Monografía para obtener el Grado de:  
**Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones**

Presenta:

P.D.I.E.T. Edgar Mejía Chávez

Director de Tesis:  
ING. MARIANO ARUMIR RIVAS



Pachuca de Soto, Hidalgo, Diciembre de 2014

# RESUMEN

---

---

El surgimiento de nuevas tecnologías en materia de telecomunicaciones va aumentando de forma exponencial por lo que se tienen que desarrollar cada día más aplicaciones debido a la modernización de estas. Esto lleva a que la demanda creciente para las comunicaciones es cada vez mayor, la necesidad de una mejor cobertura, la capacidad y la calidad de los servicios aumenta, por lo que se tiene que aprovechar mejor el espectro radioeléctrico.

En el presente trabajo de investigación monográfica muestro un panorama global de los sistemas de antenas inteligentes aplicadas a las comunicaciones móviles celulares, ya que son capaces de utilizar de manera eficaz los recursos de comunicación, siendo una promesa de solución efectiva a los problemas de los actuales sistemas inalámbricos.

Pero una antena inteligente no es un invento del siglo XXI o algo parecido, más bien es la combinación de múltiples elementos de una antena con el procesamiento digital de señales. Esto mejora su radiación y su potencia haciendo más eficientes sus recursos y brindando a los usuarios una mejor comunicación sin interrupciones.

En este trabajo he observado que muchos de los investigadores e ingenieros consultados concuerdan con lo siguiente, las antenas inteligentes son la última innovación tecnológica que tiene el potencial para aumentar la funcionalidad de los sistemas de comunicaciones móviles celulares. Por que hace que su cobertura sea mayor, la calidad, la capacidad, el bajo consumo de potencia, localización de los usuarios y la reducción de la interferencia a otros usuarios.

Para centrarnos es nuestro tema principal el presente trabajo de investigación, se realizo extrayendo y consultando información de investigadores del CICESE en Ensenada B.C. México, y de otras consultas que han hecho un excelente trabajo de investigación.

---

---

El primer capítulo titulado Antecedentes y Definición de Antenas hace una reseña histórica de los hombres que por medio de sus aportes han originado la construcción de una antena, da una definición de antena, las propiedades de las antenas y la operación de los fenómenos de campos magnéticos y eléctricos que actúan en ella.

El capítulo, Fundamentos de Radiación y de Propagación presentes en una antena son fenómenos electromagnéticos los cuales de forma teórica se analizan su origen mediante las conocidas ecuaciones de Maxwell.

El capítulo tercero Parámetros fundamentales de una Antena analizo las características de una antena como el patrón de radiación, las regiones de campos que existen en una antena y otros parámetros como lo son la impedancia, directividad, ganancia, ancho de banda y haz de potencia.

El capítulo cuarto analiza los tipos de antenas en las cuales he clasificado en omnidireccionales y direccionales, en cada una de ellas se da una explicación detallada de su estructura y su patrón de radiación en cada caso.

El capítulo cinco hace una introducción de las antenas inteligentes, el tema central de esta monografía en el, analizo cual es la función principal y muestro una comparación de nuestro oído y cerebro con la función esencial de una antena inteligente. Además se muestran los tres tipos de implementación de ellas y la estructura que se proponen para su uso.

El último capítulo muestra la principal aplicación de una antena inteligente que es en las comunicaciones móviles celulares, se observa la estructura de telefonía celular y la implementación de estas antenas inteligentes en las comunicaciones.

# ABSTRACT

---

---

The emergence of new technologies in the field of telecommunications is growing exponentially by what you have to develop each day more applications due to the modernization of these. This leads to the growing demand for communications is increasing, the need for better coverage, capacity and quality of the services increases, so that you have to make better use of the radio spectrum.

In the present work of monographic research show an overall picture of the smart antenna systems applied to mobile cellular communications, since they are capable of effective use of communication resources, being a promise of effective solution to the problems of the present wireless systems.

But a smart antenna is not an invention of the twenty-first century or something like it, rather it is the combination of multiple elements of an antenna with the digital signal processing. This improves their radiation and its power by making more efficient their resources and providing users with a better communication without interruptions.

In this work I noticed that many of the researchers and engineers consulted agree with the following, smart antennas are the latest technological innovation that has the potential to increase the functionality of the systems of cellular mobile communications. Why does your coverage is greater, the quality, capacity, low power consumption, location of the users and the reduction of interference to other users.

To focus is our main theme this research work, it is carried out by removing and consulting information of researchers of the CICESE in Ensenada B. C. Mexico, and other queries that have done an excellent job of research.

---

---

The first chapter, entitled Background and definition of antennas recounts the history of the men that through their contributions have led to the construction of an antenna, gives a definition of antenna, the properties of the antennas and the operation of the phenomena of electric and magnetic fields that act on it.

The chapter, Fundamentals of Radiation Propagation and present in an antenna are electromagnetic phenomena which theoretically analyzing their origin through the known equations of Maxwell.

The third chapter basic parameters of an antenna analyzed the characteristics of an antenna as the radiation pattern, the regions of fields that exist in an antenna and other parameters as are the impedance, directivity, gain, bandwidth, and beam power.

The fourth chapter discusses the types of antennas in which i classified in omnidirectional and directional, in each one of them gives a detailed explanation of its structure and its radiation pattern in each case.

Chapter five makes an introduction of the smart antennas, the central theme of this monograph in the analyzed which is the main function and show you a comparison of our ear and brain with the essential function of a smart antenna. In addition, it samples the three types of deployment of them and the structure that are proposed for use.

The last chapter shows the main application of a smart antenna that is in mobile cellular communications, notes the cellular structure and implementation of these smart antennas in communications.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

---

---

<b>Temas</b>	<b>Págs.</b>
RESUMEN	i
ABSTRACT	iii
ÍNDICE DE CONTENIDO	v
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABLAS	xv
INTRODUCCIÓN	xvi

## Capítulo I

### Antecedentes y Definición de Antenas.

<b>1.1</b>	<b>Antecedentes Históricos.</b>	<b>1</b>
<b>1.2</b>	<b>Concepto de Antena</b>	<b>3</b>
<b>1.3</b>	<b>Bandas de frecuencia de radio</b>	<b>4</b>
<b>1.4</b>	<b>Fundamentos de Antenas</b>	<b>7</b>
<b>1.4.1</b>	<b>Ondas de Radio</b>	<b>7</b>
<b>1.4.1.1</b>	<b>Campos Magnéticos</b>	<b>7</b>
<b>1.4.1.2</b>	<b>Campo Eléctrico</b>	<b>8</b>
<b>1.4.1.3</b>	<b>Campos Magnético y Eléctrico en una línea de transmisión</b>	<b>9</b>

## Capítulo II

### Fundamentos de Radiación y de Propagación.

<b>2.1</b>	<b>Antecedentes de las ecuaciones de Maxwell</b>	<b>11</b>
<b>2.2</b>	<b>Detalle de las Ecuaciones</b>	<b>12</b>
2.2.1	Ley de Gauss	12
2.2.2	Ley de Gauss para el campo magnético	13
2.2.3	Ley de Faraday	14
2.2.4	Ley de Ampere generalizada	15
2.2.5	Orígenes de las ecuaciones	16
<b>2.3</b>	<b>En medios materiales</b>	<b>17</b>
<b>2.4</b>	<b>Ecuaciones de Maxwell</b>	<b>19</b>

## Capitulo III

### Parámetros fundamentales de una Antena.

<b>3</b>	<b>Introducción</b>	<b>21</b>
<b>3.1</b>	<b>Patrón de Radiación</b>	<b>21</b>
3.1.1	Diagramas tridimensionales	24
3.1.2	Patrones Isotrópico, Direccional y Omnidireccional	26
3.1.3	Parámetros del diagrama de radiación	29
3.1.4	Región de Campos	31
3.1.4.1	Región Reactiva de Campo Cercano	32

3.1.4.2	Región de radiación de Campo Cercano (llamada Región de Fresnel)	32
3.1.4.3	Región de Campo Lejano (llamada Región de Fraunhofer)	33
3.2	Impedancia	35
3.3	Directividad	36
3.4	Eficiencia de antena	38
3.5	Ganancia de Antena	39
3.5.1	Ganancia Directiva	40
3.5.2	Ganancia en Potencia	40
3.6	Potencia Isotrópica Efectiva Radiada (PIRE)	41
3.7	Polarización	42
3.8	Ancho de Banda (Bandwidth)	44
3.9	Ancho de Haz de Media Potencia (HPBW)	46

## **Capítulo IV**

### **Tipos de Antena.**

4.1	Antenas Omnidireccionales	49
4.1.1	Antena Hertz	49
4.1.2	Antena Marconi	51
4.2	Antenas Direccionales	51
4.2.1	Antena Yagi-Uda	51

<b>4.2.2</b>	<b>Antena Loop ó de Lazo</b>	<b>54</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Antena Helicoidal</b>	<b>55</b>
<b>4.2.4</b>	<b>Antena de Apertura</b>	<b>57</b>
<b>4.2.4.1</b>	<b>Bocina Rectangular</b>	<b>59</b>
<b>4.2.4.2</b>	<b>Antena Reflector Parabólico</b>	<b>61</b>
<b>4.2.4.2.1</b>	<b>Reflectores Parabólicos</b>	<b>63</b>
<b>4.2.4.2.2</b>	<b>Mecanismos alimentadores</b>	<b>65</b>
<b>4.2.4.2.2.1</b>	<b>Alimentación central</b>	<b>65</b>
<b>4.2.4.2.2.2</b>	<b>Alimentación cónica o por bocina</b>	<b>66</b>
<b>4.2.4.2.2.3</b>	<b>Alimentación de Cassegrain</b>	<b>67</b>
<b>4.2.4.3</b>	<b>Antena de Ranura</b>	<b>68</b>
<b>4.2.4.4</b>	<b>Antena de Lentes</b>	<b>69</b>
<b>4.2.5</b>	<b>Antenas Patch ó Microstrip</b>	<b>72</b>
<b>4.2.5.1</b>	<b>Ventajas y Desventajas de las Antenas Microstrip Patch</b>	<b>73</b>
<b>4.2.5.2.</b>	<b>Técnicas de Alimentación</b>	<b>75</b>
<b>4.2.5.2.1</b>	<b>Alimentación de línea Microstrip</b>	<b>75</b>
<b>4.2.5.2.2</b>	<b>Alimentación Coaxial</b>	<b>76</b>
<b>4.2.5.2.3</b>	<b>Alimentación por Acoplamiento de Apertura</b>	<b>77</b>
<b>4.2.5.2.4</b>	<b>Alimentación de Acoplamiento de Proximidad</b>	<b>78</b>

## **Capitulo V**

### **Introducción a las Antenas Inteligentes.**

<b>5.1</b>	<b>Introducción</b>	<b>80</b>
<b>5.2</b>	<b>Concepto de Antenas Inteligentes</b>	<b>81</b>
<b>5.2.1</b>	<b>Antenas Inteligentes en nuestro cuerpo humano</b>	<b>81</b>
<b>5.3</b>	<b>Tipos de implementación de las Antenas Inteligentes</b>	<b>84</b>
<b>5.3.1</b>	<b>Haz Conmutado (Switched Beam)</b>	<b>87</b>
<b>5.3.2</b>	<b>Haz de Seguimiento (Dynamically Phased Array)</b>	<b>88</b>
<b>5.3.3</b>	<b>Haz Adaptativo (Adaptive Array)</b>	<b>89</b>
<b>5.4</b>	<b>Arquitectura de un Sistema de Antenas Inteligentes</b>	<b>91</b>
<b>5.4.1</b>	<b>Arquitectura de Recepción</b>	<b>91</b>
<b>5.4.2</b>	<b>Arquitectura de Transmisión</b>	<b>94</b>

## **Capitulo VI**

### **Antenas Inteligentes en Comunicaciones Móviles Celulares.**

<b>6.1</b>	<b>Estructura de la Telefonía Celular</b>	<b>98</b>
<b>6.1.1</b>	<b>Movimiento entre dos celdas</b>	<b>102</b>
<b>6.2</b>	<b>Evolución del Sistema Celular</b>	<b>103</b>
<b>6.2.1</b>	<b>Frecuencia Reutilizada</b>	<b>104</b>
<b>6.2.2</b>	<b>Cell Splitting (Division Celular)</b>	<b>105</b>
<b>6.2.3</b>	<b>Handoff</b>	<b>105</b>

<b>6.3</b>	<b>Aplicaciones de las Antenas Inteligentes en Sistemas de Comunicación Móviles</b>	<b>107</b>
<b>6.3.1</b>	<b>Razones para el Uso de Antenas Inteligentes</b>	<b>108</b>
<b>6.3.1.1</b>	<b>Capacidad y Cobertura</b>	<b>108</b>
<b>6.3.1.2</b>	<b>Reducción y Rechazo de la Interferencia</b>	<b>110</b>
<b>6.3.1.3</b>	<b>Otros Beneficios</b>	<b>111</b>
<b>6.3.1.4</b>	<b>Inconvenientes de las Antenas Inteligentes</b>	<b>112</b>
<b>6.4</b>	<b>Modos de Aplicación en Redes de Comunicación Móviles</b>	<b>113</b>
<b>6.4.1</b>	<b>Receptor de Alta Sensibilidad</b>	<b>113</b>
<b>6.4.2</b>	<b>Rechazo de Interferencia por Filtrado Espacial (SFIR)</b>	<b>114</b>
<b>6.4.3</b>	<b>Acceso Múltiple por División Espacial (SDMA)</b>	<b>114</b>
<b>6.5</b>	<b>Conclusión</b>	<b>116</b>
	<b>GLOSARIO</b>	<b>xix</b>
	<b>ACRÓNIMOS</b>	<b>xxii</b>
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>xxiii</b>
	<b>VITA</b>	<b>xxvii</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

No.	Figura	Págs.
1.1	Campo Magnético alrededor de un conductor .....	7
1.2	Campos Eléctrico y Magnético alrededor de una línea de transmisión .....	9
1.3	Campos Eléctrico y Magnético en un cable coaxial .....	10
3.1	Sistemas de coordenadas esfericas .....	22
3.2	Orientacion vectorial en el espacio Transport Adjacency .....	23
3.3	Sistema de coordenadas esferico .....	23
3.4	Diagrama de radiacion tridimensional .....	24
3.5	Diagrama de radiacion en coordenadas polares .....	25
3.6	Diagrama de radiacion en coordenadas cartesianas .....	26
3.7	Representación grafica de las características de radiación de las antenas .....	26
3.8	Haz de Pincel .....	27
3.9	Haz Contorneado .....	27
3.10	Diagrama Multihaz .....	28
3.11	Parámetros del diagrama de radiación (A Y B) .....	30
3.12	Movimiento de campo Eléctrico y Magnético .....	31
3.13	Ilustración de campos .....	32
3.14	Región de Campos .....	34
3.15	Directividad .....	37

<b>3.16</b>	<b>Polarización lineal</b> .....	<b>43</b>
<b>3.17</b>	<b>Polarización Lineal y Circular</b> .....	<b>44</b>
<b>3.18</b>	<b>Medición del ancho de banda de el trazo del coeficiente de reflexión</b>	<b>45</b>
<b>3.19</b>	<b>Medición del ancho banda del VSWR</b> .....	<b>46</b>
<b>3.20</b>	<b>Ancho de Haz</b> .....	<b>47</b>
<b>3.21</b>	<b>HPBW y FNBW</b> .....	<b>47</b>
<b>4.1</b>	<b>Distribuciones ideales de voltaje y corriente a lo largo de un dipolo de <math>\frac{1}{2} \lambda</math></b> .....	<b>50</b>
<b>4.2</b>	<b>Antena aterrizada de cuarto de onda</b> .....	<b>51</b>
<b>4.3</b>	<b>Antena Yagi-Uda</b> .....	<b>53</b>
<b>4.4</b>	<b>Antena Yagi-Uda de banda estrecha</b> .....	<b>54</b>
<b>4.5</b>	<b>Antena Yagi-Uda de banda ancha</b> .....	<b>54</b>
<b>4.6</b>	<b>Antena Yagi-Uda multibanda</b> .....	<b>54</b>
<b>4.7</b>	<b>Varias Formas de Lazo</b> .....	<b>55</b>
<b>4.8</b>	<b>Antena de hélice de modo axial</b> .....	<b>56</b>
<b>4.9</b>	<b>Antena helicoidal</b> .....	<b>57</b>
<b>4.10</b>	<b>Antenas de apertura</b> .....	<b>59</b>
<b>4.11</b>	<b>Tipos de Antenas de bocina</b> .....	<b>60</b>
<b>4.12</b>	<b>Esquema del Reflector Parabólico</b> .....	<b>62</b>
<b>4.13</b>	<b>Geometría de una Parabólica</b> .....	<b>64</b>
<b>4.14</b>	<b>Antena Parabólica con alimentación central</b> .....	<b>65</b>
<b>4.15</b>	<b>Antena Parabólica con alimentador por cuerno</b> .....	<b>67</b>
<b>4.16</b>	<b>Antena Parabólica con alimentación de Cassegrain</b> .....	<b>67</b>

<b>4.17</b>	<b>Antena de Ranura</b> .....	<b>68</b>
<b>4.18</b>	<b>Tipos de Ranuras</b> .....	<b>69</b>
<b>4.19</b>	<b>Lente de Antena</b> .....	<b>71</b>
<b>4.20</b>	<b>Lente Escalonada</b> .....	<b>71</b>
<b>4.21</b>	<b>Estructura de una Antena Patch Microstri</b> .....	<b>72</b>
<b>4.22</b>	<b>Formas comunes de Antenas Patch</b> .....	<b>73</b>
<b>4.23</b>	<b>Alimentación línea Microstrip</b> .....	<b>75</b>
<b>4.24</b>	<b>Sonda de alimentación rectangular</b> .....	<b>77</b>
<b>4.25</b>	<b>Alimentación por Acoplamiento de Apertura</b> .....	<b>77</b>
<b>4.26</b>	<b>Alimentación de acoplamiento de proximidad</b> .....	<b>79</b>
<b>5.1</b>	<b>Función humana auditiva</b> .....	<b>82</b>
<b>5.2</b>	<b>Dos elementos eléctricos de antenas inteligentes</b> .....	<b>83</b>
<b>5.3</b>	<b>Principio de un sistema de antenas inteligentes</b> .....	<b>84</b>
<b>5.4</b>	<b>Formas de implementación de las antenas inteligentes</b> .....	<b>85</b>
<b>5.5</b>	<b>Patrones del área de cobertura para Haz conmutado (Switched Beam) y Antena de arreglo adaptativo (Adaptive Array)</b> .....	<b>86</b>
<b>5.6</b>	<b>Patrones de Haz para las configuraciones: conmutado y adaptativo</b>	<b>87</b>
<b>5.7</b>	<b>Antena de Haz Conmutado</b> .....	<b>88</b>
<b>5.8</b>	<b>Antena de Haz de Seguimiento</b> .....	<b>89</b>
<b>5.9</b>	<b>Antena de Haz Adaptativo</b> .....	<b>90</b>
<b>5.10</b>	<b>Parte de Recepción de una antena inteligente</b> .....	<b>91</b>
<b>5.11</b>	<b>Diferentes geometrías de arreglo para antenas inteligentes</b> .....	<b>92</b>

<b>5.12</b>	<b>Parte de Transmisión de una antena inteligente</b>	<b>95</b>
<b>6.1</b>	<b>Enlace telefónico</b>	<b>99</b>
<b>6.2</b>	<b>Estación base</b>	<b>100</b>
<b>6.3</b>	<b>Celdas de Cobertura (tipo panel)</b>	<b>101</b>
<b>6.4</b>	<b>Proceso de comunicación celular</b>	<b>101</b>
<b>6.5</b>	<b>Movimiento entre celdas</b>	<b>103</b>
<b>6.6</b>	<b>Agrupamiento de celdas</b>	<b>105</b>
<b>6.7</b>	<b>División celular</b>	<b>106</b>
<b>6.8</b>	<b>Sistema Handoff</b>	<b>106</b>
<b>6.9</b>	<b>Rango de extensión utilizando una antena inteligente</b>	<b>107</b>
<b>6.10</b>	<b>(a) Cluster Tradicional de siete celdas y (b) Cluster de tres celdas</b>	<b>109</b>
<b>6.11</b>	<b>Reducción de interferencia utilizando antenas inteligentes</b>	<b>111</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

No.	Figura	Págs.
1-1	Clasificación de bandas de frecuencias .....	4
1-2	Bandas I a V para VHF y UHF (TV y Radio) .....	5
1-3	Clasificación de la banda de microondas .....	5
2-1	Agrupación de Leyes .....	18
2-2	Ecuaciones de Maxwell en forma Diferencial e Integral .....	19
2-3	Valores de Símbolos .....	20
4-1	Técnicas de alimentación para antenas Microstrip Patch	79

# INTRODUCCIÓN

---

---

Muchos de los avances tecnológicos han sido planteados o implementados desde la observación de algunos fenómenos de la naturaleza, como la construcción de los aviones que actualmente conocemos que tiene una masa en la escala de toneladas, se basaron en el diseño y entendimiento de cómo las aves pueden volar.

De manera parecida el hombre ha observado que cuando usted tiene una conversación de cualquier índole y esta le es de su interés no importa que interferencias tenga a su alrededor su oído captara dicha conversación sin sufrir ningún cambio.

Reflexione por un minuto, existe una conversación entre dos personas, en el ambiente donde se realiza esta hay ruidos externos, pero aunque estos estén presentes usted y su interlocutor no se verán afectados en su comunicación. ¿A qué se debe dicho fenómeno? ¿Puede este fenómeno ser aplicado en los avances tecnológicos? ¿Cuál son sus ventajas y desventajas?

Le interesaría saber que este fenómeno ya es una realidad en la aplicación tecnológica y se debe que su principal utilidad es en las comunicaciones móviles celulares, en esta monografía se analiza, como lo que nosotros relacionamos con nuestro oído y cerebro va a mejorar la calidad de un servicio y es en este trabajo de investigación donde le mostrare su origen, funcionamiento y su aplicación tecnológica con las tendencias futuras.

---

---

## **Objetivo General**

La prioridad de esta monografía es recabar y ordenar información relacionada con el tema a investigar para contribuir a una mejor comprensión de las antenas inteligentes para comunicaciones móviles celulares.

## **Objetivos Específicos**

- ❖ Conocer las propiedades básicas de una antena.
- ❖ Conocer su patrón de radiación ya que depende de la aplicación final al tema
- ❖ Conocer cuáles de donde surgió el concepto de antena inteligente
- ❖ Analizar su uso en las comunicaciones celulares
- ❖ Tener un conocimiento de las posibles aplicaciones en la industria
- ❖ Elaborar un documento de consulta que sirva de apoyo a docentes y alumnos de la U.A.E.H.

## **Justificación.**

Hoy en día la telefonía móvil está avanzando exponencialmente en las aplicaciones y los servicios que esta ofrece por lo que muchos de sus servicios tienen una demanda cada día mayor, pero las operadoras de ellos no pueden dejar de ofertar a sus clientes un producto que se encuentre limitado.

Por tal motivo los usuarios van observando que la practicidad en sus actividades escolares y/o laborales gracias a estos servicios les facilita la vida. Pero cuando un servicio es muy demandado por los usuarios este llega a presentar complicaciones tales como una falta de estructura, capacidad, cobertura, mucha interferencia entre otras más.

---

En particular me ocupare de analizar los aspectos teóricos que plantean la solución de a las problemáticas ya conocidas y sus diferentes técnicas con que se logra una eficiente comunicación en la telefonía celular.

# Capítulo I

## Antecedentes y Definición de Antenas.

---

---

### 1.1 Antecedentes Históricos.

Las comunicaciones mediante métodos eléctricos no comenzaron hasta la introducción de la telegrafía en 1844, seguida de la telefonía en 1878. En estos sistemas, las señales eléctricas se enviaban sobre líneas bifilares. Desde el punto de vista físico la idea de fenómeno electromagnético nace de la capacidad de relacionar las teorías eléctrica y magnética. En 1819 Hans Cristian Oersted observó cómo un hilo por el que circulaba corriente hacía que se desviase una aguja imantada, demostrando que la electricidad producía magnetismo.

Un año después André Marie Ampere amplió estas observaciones. En 1831 Michael Faraday profundizó en este fenómeno demostrando el efecto inverso, que un campo magnético variable induce corriente en un hilo conductor próximo. Estos son los precedentes del trabajo de James Clark Maxwell que comienzan en 1854 en el Kings College of London y culminan con la publicación del “Treatise on Electricity and Magnetism” mejor conocido como las “*Ecuaciones de Maxwell*” en 1873. En estos trabajos Maxwell, además de incluir las ecuaciones necesarias para relacionar estos campos, postuló la naturaleza electromagnética de la luz. Este marca, de alguna forma, el comienzo de la teoría electromagnética. Al igual que ocurriera con otros grandes personajes, Maxwell generó escepticismo entre la comunidad científica, siendo éste un indicativo de lo excepcional del descubrimiento. [1] Lo ciertamente sorprendente es que la teoría de Maxwell no fue un modelo matemático desarrollado para dar respuesta a una experimentación exhaustiva de un fenómeno físico. Por el contrario, esta teoría predijo y modeló el efecto electromagnético veinte años antes de que en 1887 Heinrich Rudolf

Hertz demostrase experimentalmente la propagación de ondas electromagnéticas, ondas radio u ondas hertzianas.

En 1897 Marconi patentó un sistema completo de telegrafía sin hilos Marconi realizó sus primeros experimentos con ondas radio en la parte superior (ático) de la casa de sus padres en Bolonia. Inicialmente sólo consiguió transmitir a distancias de unos pocos metros, pero hizo progresos importantes hasta que logró alcanzar distancias de 2 kilómetros. Conocedor de la importancia de estos experimentos decidió hacer una demostración a las autoridades de su país, que no se hicieron eco del potencial de la radiocomunicación. Marconi decidió hacer la propuesta en el Reino Unido. [2] En 1897 Marconi demostró la posibilidad de conectar dos puntos separados por agua uniendo las orillas del canal de Bristol y eliminando así la necesidad de cables submarinos. En 1899 enlaza el canal de la Mancha, es la primera radiocomunicación internacional. A esta demostración le siguió enlazar la estación de Polhu en Inglaterra con la estación de Newfoundland en Canadá. [3]

La letra “s” se escuchó en Newfoundland el 12 de Diciembre de 1901. La primera transmisión empleó un transmisor de salto de chispa, a 60 KHz, conectado entre tierra y un hilo horizontal suspendido entre dos mástiles de 60 metros del que colgaban 50 varillas verticales. La antena receptora la elevó a 200 metros sobre el nivel del suelo empleando cometas. Marconi desafiaba así a los matemáticos de la época que limitaban el alcance de las ondas electromagnéticas a la distancia de visibilidad óptica. El Daily Telegraph no dio crédito a la transmisión, argumentando que se recibiría de algún barco o corriente terrestre. Desde Marconi hasta la década de los 40 la tecnología de radio se centró en el empleo de diversas antenas de hilo alcanzando las frecuencias de la banda de UHF (Ultra High Frequency).

Durante la 2ª Guerra Mundial se introdujeron nuevas antenas (guías, bocinas, reflectores) para aplicaciones radar a frecuencias de microondas (a partir de 1 GHz) gracias al descubrimiento de nuevos generadores como el klystron y el magnetrón. Estas

nuevas frecuencias y antenas se aprovecharon rápidamente para establecer radioenlaces fijos. El siguiente impulso se ha dado desde los años 60 hasta ahora con las comunicaciones de espacio profundo y comunicaciones vía satélite. La introducción de los ordenadores y la aplicación masiva de métodos numéricos (Método de los Momentos, Métodos Modales....) han permitido además analizar y sintetizar nuevas antenas optimizadas para cada aplicación.

## 1.2 Concepto de Antena.

Una antena es definida por el Diccionario Webster's como *“un dispositivo metálico normalmente (como una barra o cable) para radiación o recepción de ondas de radio”*. El *“Institute of Electrical and Electronics Engineers”* (IEEE) define una antena como **“aquella parte de un sistema transmisor o receptor diseñada específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas”** [4] (IEEE Std. 145-1983).

Las propiedades de una antena en transmisión son las mismas que las de una antena en recepción. Por lo que en vez de radiar, la antena puede recibir esa radiación que, una vez guiada hasta el receptor, se traducirá en energía eléctrica. Esto permite el diseño de variados sistemas de radiocomunicación, con la característica de movilidad como máximo exponente de este tipo de comunicaciones. Las antenas tienen en común el hecho de ser una región de transición entre la zona donde existe una onda electromagnética guiada y una onda en espacio libre, a la cual se le puede asignar un carácter direccional dependiendo de la aplicación en concreto.

Por ejemplo en radiodifusión o comunicaciones móviles se querrá radiar sobre la zona de cobertura de forma omnidireccional, mientras que en radioenlaces fijos interesará que las antenas sean direccionales. Si se estudia la antena en recepción, toda antena es capaz de captar energía del espacio, absorberla y entregarla al receptor. La representación de una onda se realiza por tensiones y corrientes (hilos conductores) o por campos (guías de onda) en espacio libre mediante campos. [5]

La misión de la antena es de *radiar potencia que se le suministra con las características de direccionalidad adecuadas para la aplicación*. Por aplicación se entiende la función que desarrollara la antena, como por ejemplo para que llegue al máximo numero de usuarios. En cada aplicación se impondrán unos requisitos sobre la zona en la que se quiere concentrar la energía, para así poder captar en algún punto del espacio la onda radiada. Es por ello que las dos funciones básicas de una antena es: **transmitir** y **recibir**, [6] imponiendo en cada caso las condiciones particulares sobre la direccionalidad (su capacidad de radiar o recibir en determinadas direcciones) de la antena, los niveles de potencia que se deben soportar, las frecuencias de trabajo y otros parámetros que definiré mas adelante.

### 1.3 Bandas de frecuencia de radio.

La banda de frecuencia de trabajo va a definir el tipo de antena, e incluso sus propiedades mas importantes, porque estas propiedades van a depender del *tamaño eléctrico* de las antenas, es decir, de la relación entre su longitud ( $l$ ) y la longitud de onda ( $\lambda = c/f$ , siendo  $c$  la velocidad de la luz en vacio  $3 \cdot 10^8$  m/s y  $f$  la frecuencia).

Se incluyen tres tablas [1] con clasificaciones de bandas de frecuencias. En la primera de ella, Tabla 1-1, se incluye una clasificación ampliamente aceptada. Nótese que los incrementos de una banda a otra se realizan en décadas, de forma que el ancho de la banda se va multiplicando por 10.

Banda	Denominación	frec. mínima	frec. máxima	l máxima	l mínima
ELF	Extremely Low Frequency	-	3 kHz	-	100 km
VLF	Very Low Frequency	3 kHz	30kHz	100 km	10 km
LF	Low Frequency	30 kHz	300 kHz	10 km	1 km
MF	Medium Frequency	300 kHz	3 MHz	1 km	100 m
HF	High Frequency	3 MHz	30 MHz	100 m	10 m
VHF	Very High Frequency	30 MHz	300 MHz	10 m	1 m
UHF	Ultra High Frequency	300 MHz	3 GHz	1 m	10 cm
SHF	Super High Frequency	3 GHz	30 GHz	10 cm	1 cm
EHF	Extremely High Frequency	30 Ghz	300 GHz	1 cm	1 mm

Tabla 1-1 Clasificación de bandas de frecuencias.

En la Tabla 1-2 se incluye una subdivisión de las bandas VHF y UHF, donde se opera en la radiodifusión de audio y video.

Banda	frec. mínima	frec. máxima	canales
I	47 MHz	68 MHz	2,3,4 VHF
II	88 MHz	108 MHz	FM
III	174 MHz	230 MHz	5 al 12 VHF
IV	470 MHz	606 MHz	21 al 37 UHF
V	606 MHz	862 MHz	38 al 69 UHF

Tabla 1-2 Bandas I a V para VHF y UHF (TV y Radio)

En la tabla 1-3 se incluye también una subdivisión de las últimas bandas, las correspondientes a los Giga Hz. Estas denominaciones son muy comunes en algunos sistemas como los de comunicaciones por satélite.

Banda	frec. mínima	frec. máxima	l máxima	l mínima
L	1 GHz	2 GHz	30 cm	15 cm
S	2 GHz	4 GHz	15 cm	7.5 cm
C	4 GHz	8 GHz	7.5 cm	3.75 cm
X	8 GHz	12.4 GHz	3.75 cm	2.42 cm
Ku	12.4 GHz	18 GHz	2.42 cm	1.66 cm
K	18 GHz	26.5 GHz	1.66 cm	1.11 cm
Ka	26.5 GHz	40 GHz	11.1 mm	7.5 mm
mm	40 GHz	300 GHz	7.5 mm	1 mm

Tabla 1-3 Clasificación de la banda de microondas.

Por ejemplo, en las frecuencias de radiodifusión AM (en banda de 540 a 1600 kHz), la longitud de onda es del orden de 300 metros (calculada a 1000 kHz), por lo que ninguna antena va a ser eléctricamente grande (de varias longitudes de onda). Como se verá más adelante, las antenas eléctricamente cortas nunca pueden ser muy directivas, por lo que ya se puede vislumbrar que ésta será una de las características primordiales de las antenas en estas bandas de frecuencia.

Por el contrario, en frecuencias de microondas (10 GHz) la longitud de onda es de 3 cm, con lo que construir una antena eléctricamente grande es mucho más fácil. En estas frecuencias las antenas podrán ser muy directivas.

Si las propiedades de las antenas varían fuertemente con la frecuencia de trabajo, lo mismo pasa con los mecanismos de la propagación de las ondas. Al igual que las antenas se miden con su *longitud eléctrica* los distintos objetos naturales o artificiales que pueden afectar a la propagación de las ondas (una colina, un edificio...) también se van a medir con sus dimensiones eléctricas. Los efectos que produce un obstáculo de una determinada dimensión van a depender de la frecuencia de la onda. Según el “modo de radiación e impedancia” se definen los bloques de antenas como por ejemplo: [5,6]

- ❖ **Antenas Alámbricas.** Se distinguen por estar construidas con hilos conductores que soportan las corrientes que dan origen a los campos radiados. Formadas por hilos rectos, espiras y hélices. Este tipo de antenas se caracterizan por corrientes y cargas que varían de forma armónica con el tiempo y con amplitudes que también varían a lo largo de los hilos.
- ❖ **Antenas de Onda Progresiva.** Se suelen construir con hilos conductores eléctricamente largos terminados en cargas adaptadas o con guías dieléctricas.
- ❖ **Antenas de Agrupación ó Arrays.** son un conjunto de antenas iguales donde se controla la amplitud y fase de la alimentación de cada elemento para conseguir unas propiedades de radiación u otras. En ciertas aplicaciones se requieren características de radiación que no pueden lograrse con un solo elemento; sin embargo, con la combinación de varios de ellos se consigue una gran flexibilidad que permite obtenerlas. Estas agrupaciones pueden realizarse combinando, en principio, cualquier tipo de antena.
- ❖ **Antenas de Apertura.** la radiación se produce en función de los campos de la onda que atraviesa dicha apertura. Ejemplos de antenas de este tipo son el

extremo de una guía de onda en circuito abierto, guías abocinadas (bocina) y estructuras más complejas como reflectores o lentes.

## 1.4 Fundamentos de Antenas.

### 1.4.1 Ondas de Radio.

La señal de radio se denomina *onda electromagnética*, ya que se constituye de campos eléctricos y magnéticos. Al aplicar voltaje en una antena, se genera un campo eléctrico, este voltaje hace una corriente en la antena, produciendo un campo magnético. Los campos eléctrico y magnético están en ángulos rectos, uno respecto al otro. Estos campos (eléctrico y magnético) los emite la antena y se propagan por el espacio a muy grandes distancias a la velocidad de la luz.

#### 1.4.1.1 Campos Magnéticos.

Un campo magnético es el campo de fuerza invisible que produce un imán. La antena es un tipo de electroimán. Cuando fluye corriente a través de él, se genera un campo magnético alrededor de un conductor. La figura 1-1 muestra el campo magnético o flujo, alrededor de un alambre que conduce corriente.

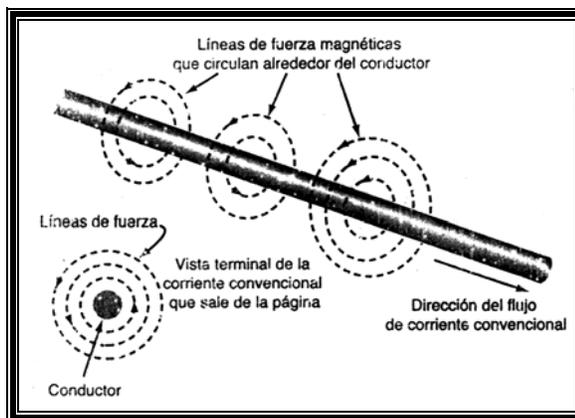


Figura 1.1 Campo Magnético alrededor de un conductor con conducción de corriente.  
La intensidad del campo magnético,  $H$ , en ampere-vueltas por metro  $=1/2 \pi d$ .

Pero el campo magnético es un campo de fuerza continuo, para propósitos de cálculo y mediciones se representa por líneas de fuerza individuales. La fuerza y dirección del campo magnético dependen de la magnitud y dirección del flujo de la corriente.

La fuerza de un campo magnético ( $H$ ) producido por una antena de alambre [7] se expresa por:

$$H = \frac{I}{2\pi d}. \quad (1.1)$$

Donde  $I$ = corriente (A)

$d$ = distancia al alambre (m)

#### 1.4.1.2 Campo Eléctrico.

También el campo eléctrico es una fuerza invisible producida por la presencia de una diferencia de potencial entre dos conductores. Como el campo eléctrico que genera un capacitor cargado entre sus dos placas. Por lo que un campo eléctrico existe entre cualquiera de dos puntos a través de los cuales hay diferencia de potencial.

La fuerza de un campo eléctrico ( $E$ ) se expresa por:

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon d^2}. \quad (1.2)$$

Donde  $q$ = carga entre los dos puntos (C)

$\epsilon$ = permitividad

$d$ = distancia entre los conductores (m)

*Permitividad* es la constante dieléctrica del material entre los dos conductores. El dieléctrico por lo regular es el aire o el espacio libre, el cual tiene un valor  $\epsilon$  de aproximadamente  $8.85 \times 10^{-12} \epsilon_r$ , donde  $\epsilon_r$  es la constante *dieléctrica del medio*. [7]

### 1.4.1.3 Campos Magnético y Eléctrico en una línea de transmisión.

La figura 1.2a) muestra los campos eléctrico y magnético alrededor de una línea de transmisión de dos conductores. Observe que en cualquier tiempo dado, los conductores tienen polaridades opuestas, durante medio ciclo de la entrada de ca, un conductor es positivo y el otro negativo; durante el semiciclo negativo, la polaridad se invierte. Esto significa que la dirección del campo eléctrico entre los conductores se invierte una vez por ciclo. La figura 1-2b) es un ejemplo de un campo eléctrico entre conductores. También hay que observar que la dirección del flujo de la corriente en un conductor es siempre opuesta a la del otro conductor. Por lo tanto, los campos magnéticos se combinan, como muestra la figura 1-2c). Las líneas del campo magnético se apoyan en forma directa unas a otras entre los conductores, pero a medida que las líneas de fuerza se separan, la dirección del campo magnético de un conductor es opuesta a la del otro conductor, de manera que los campos tienden a cancelarse entre si. Dicha cancelación no es completa y la fuerza del campo magnético resultante es muy pequeña. En tanto que los campos magnético y eléctrico se muestran separados en la figura 1-2b) y c) por claridad, debe recordarse que aparecen de manera simultanea y en ángulo recto uno respecto del otro.

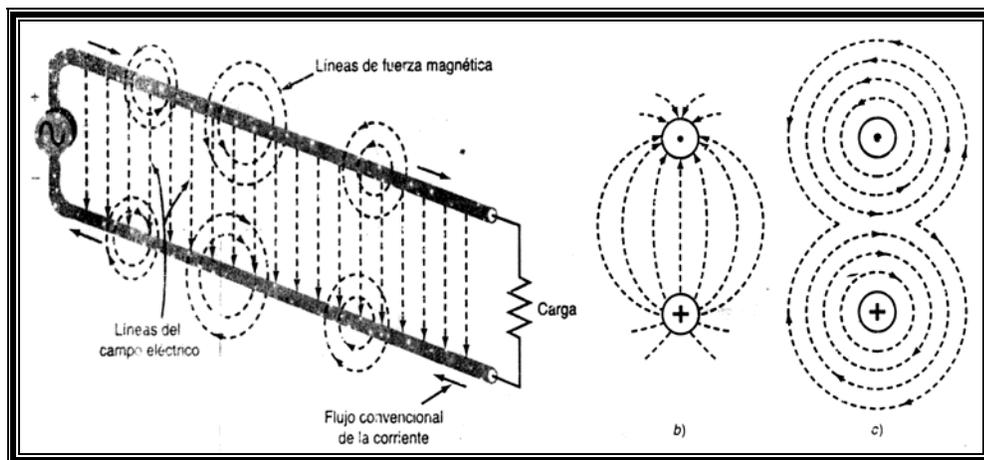


Figura 1.2 a) Campos eléctrico y magnético alrededor de una línea de transmisión; b) campo eléctrico, y c) campos magnéticos.

Una línea de transmisión, como una antena, esta hecha de un conductor o conductores, sin embargo, las líneas de transmisión, a diferencia de las antenas, no radian con eficacia las señales de radio. La figura 1-3a) muestra los campos eléctricos asociados a un cable coaxial y la 1-3b) describe los campos magnéticos combinados con un cable coaxial, las líneas del campo eléctrico están contenidas del todo por el blindaje externo del cable, de manera que ninguna es radiada. La dirección de las líneas del campo eléctrico se invierte una vez en cada ciclo.

El campo magnético alrededor del conductor central pasa a través del blindaje exterior. Sin embargo, cabe destacar que el campo magnético que produce el conductor exterior esta en dirección opuesta del que produjo el conductor interior. Como la amplitud de la corriente es la misma en ambos conductores, las fuerzas del campo magnético son iguales. Los campos magnéticos interior y exterior se cancelan entre si y por lo tanto, un cable coaxial no radia cantidad alguna de energía electromagnética. Por ello, el cable coaxial es la línea de transmisión preferida para la mayor parte de aplicaciones. [7]

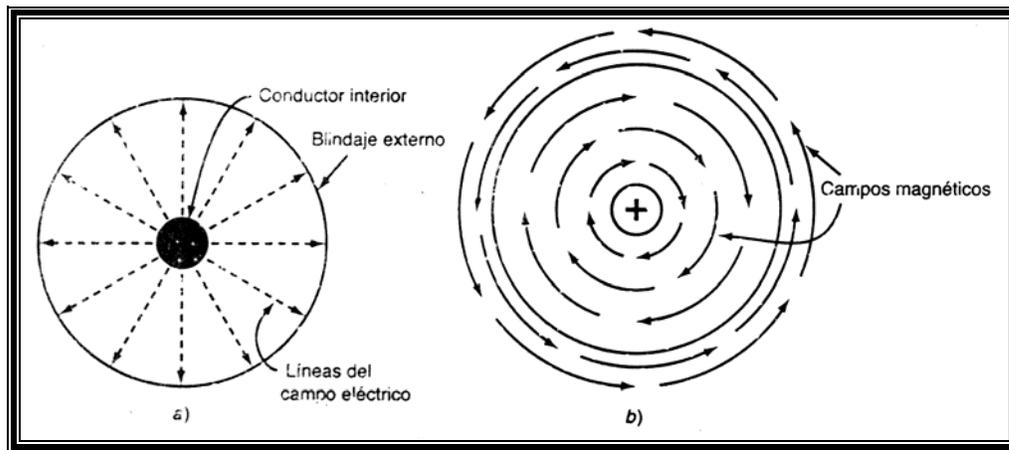


Figura 1.3 Campo eléctrico y magnético en un cable coaxial (vista en corte transversal): a) campo eléctrico, b) campos magnéticos

# Capítulo II

## Fundamentos de Radiación y de Propagación

---

---

Los fenómenos de radiación de una antena y de propagación de ondas son fenómenos electromagnéticos, y como tales se rigen por las ecuaciones de Maxwell que tienen una gran importancia en antenas dado que de ellas se derivan todas sus propiedades ya que relacionan campos eléctrico y magnético con las fuentes (corrientes y cargas).

### 2.1 Antecedentes de las ecuaciones de Maxwell.

Alrededor de 1860, el gran físico escocés James Clerk Maxwell dedujo que las leyes experimentales de la electricidad y el magnetismo (leyes de Coulomb, Gauss, Biot-Savart, Ampere y Faraday) podían resumirse de una forma matemática concisa que hoy es conocida como Ecuaciones de Maxwell. En una de ellas (la de Ampere) aparecía una inconsistencia que Maxwell fue capaz de eliminar. Además, los experimentos individuales que condujeron a las leyes nunca dieron una indicación de sus implicaciones, entre ellas la existencia de ondas electromagnéticas.

Las ecuaciones de Maxwell son un conjunto de cuatro ecuaciones que aparecieron de manera separada en la publicación de 1861 *On Physical Lines of Force* por parte del científico James Clerk Maxwell. El trabajo no era obra sólo de Maxwell, en las ecuaciones notamos la ley de Faraday, la ley de Ampere con correcciones hechas por él y la ley de Gauss. Éstas expresan respectivamente como el cambio de los campos magnéticos producen campos eléctricos, la ausencia experimental de monopolos magnéticos, cómo una corriente eléctrica y el cambio en los campos eléctricos producen campos magnéticos y cómo cargas eléctricas producen campos eléctricos. En el trabajo original de Maxwell se podían encontrar muchas otras ecuaciones pero se llegó a simplificarlas a estas cuatro. [8]

El aspecto más importante del trabajo de Maxwell en el electromagnetismo es el término que introdujo en la ley de Ampere; la derivada temporal de un campo eléctrico, conocido como *corriente de desplazamiento*. El trabajo que el científico James Clerk Maxwell publicó en el año 1865, *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*, modificaba la versión de la ley de Ampere con lo que se predecía la existencia de ondas electromagnéticas propagándose, dependiendo del medio material, a la velocidad de la luz en dicho medio. De esta forma Maxwell identificó la luz como una onda electromagnética, unificando así la óptica con el electromagnetismo. [9]

En 1884, Oliver Heaviside junto con Willard Gibbs agrupó estas ecuaciones y las reformuló en la notación vectorial actual. Sin embargo, es importante conocer que al hacer eso, Heaviside usó derivadas parciales temporales, diferentes a las derivadas totales usadas por Maxwell, la ley de Faraday provocó que se perdiera el término  $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$  que aparecía en la ecuación posterior del trabajo de Maxwell. En la actualidad, este término se usa como complementario a estas ecuaciones y se conoce como fuerza de Lorentz.

## 2.2 Detalle de las Ecuaciones.

### 2.2.1 Ley de Gauss.

La ley de Gauss explica la relación entre el flujo del campo eléctrico y una superficie cerrada. Se define como flujo eléctrico ( $\psi$ ): la cantidad de *fluido eléctrico* que atraviesa una superficie dada. Análogo al flujo de la mecánica de fluidos, éste fluido eléctrico no transporta materia, pero ayuda a analizar la cantidad de campo eléctrico ( $\vec{E}$ ) que pasa por una superficie.[10]

Matemáticamente se la expresa como:

$$\psi = \oint_S \vec{E}_{(r)} \cdot d\vec{s} \quad (2.1)$$

La ley dice que el flujo del campo eléctrico a través de una superficie cerrada es igual al cociente entre la carga (q) o la suma de las cargas que hay en el interior de la superficie y la permitividad eléctrica en el vacío ( $\epsilon_0$ ), así: [11] [12]

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (2.2)$$

La forma diferencial de la ley de Gauss es

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2.3)$$

Donde  $\rho$  es *densidad de carga*. Esta expresión es para una carga en el vacío, para casos generales se debe introducir una cantidad llamada *densidad de flujo eléctrico* ( $\vec{D}$ ) y nuestra expresión obtiene la forma:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (2.4)$$

### 2.2.2 Ley de Gauss para el campo magnético.

Experimentalmente se llegó al resultado de que los campos magnéticos, a diferencia de los eléctricos, no comienzan y terminan en cargas diferentes. Esta ley primordialmente indica que las líneas de los campos magnéticos deben ser cerradas. En otras palabras, se dice que sobre una superficie cerrada, sea cual sea ésta, no seremos capaces de encerrar una fuente o sumidero de campo, esto expresa la no existencia del monopolo magnético.[7] Matemáticamente esto se expresa así:[12]

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.5)$$

donde  $\vec{B}$  es la densidad de flujo magnético, también llamada *inducción magnética*.

Su forma integral equivalente:

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (2.6)$$

Como en la forma integral del campo eléctrico, esta ecuación sólo funciona si la integral está definida en una superficie cerrada.

### 2.2.3 Ley de Faraday.

La ley de Faraday o ley de la inducción nos habla sobre la inducción electromagnética, la que origina una fuerza electromotriz en un campo magnético. Esta ley es muchas veces llamada como *ley de Faraday-Lenz*, debido a que Heinrich Lenz descubrió ésta inducción de manera separada a Faraday pero casi simultánea.[13] Lo primero que se debe introducir es la fuerza electromotriz ( $\mathcal{E}$ ), si tenemos un campo magnético variable con el tiempo, una fuerza electromotriz es inducida en cualquier circuito eléctrico; y esta fuerza es igual a menos la derivada temporal del flujo magnético, así:[14]

$$\mathcal{E} = -\frac{d\phi_B}{dt} \quad (2.7)$$

como el campo magnético es dependiente de la posición tenemos que el flujo magnético es igual a:

$$\phi_B = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (2.8)$$

Además, el que exista fuerza electromotriz indica que existe un campo eléctrico que se representa como:

$$\mathcal{E} = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (2.9)$$

con lo que finalmente se obtiene la expresión de la ley de Faraday:[12]

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (2.10)$$

Lo que indica que un campo magnético que depende del tiempo implica la existencia de un campo eléctrico, del que su circulación por un camino arbitrario cerrado es igual a menos la derivada temporal del flujo magnético en cualquier superficie limitada por el camino cerrado.

La forma diferencial de esta ecuación es:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.11)$$

Esta ecuación relaciona los campos eléctrico y magnético, pero tiene también muchas otras aplicaciones prácticas. Esta ecuación describe cómo los motores eléctricos y los generadores eléctricos funcionan. Más precisamente, demuestra que un voltaje puede ser generado variando el flujo magnético que atraviesa una superficie dada.

#### 2.2.4 Ley de Ampere generalizada.

Ampere formuló una relación para un campo magnético inmóvil y una corriente eléctrica que no varía en el tiempo. La ley de Ampere nos dice que la circulación en un campo magnético ( $\vec{B}$ ) a lo largo de una curva  $C$  es igual a la densidad de corriente ( $\vec{j}$ ) sobre la superficie encerrada en la curva  $C$ , matemáticamente así:[12]

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 \int_S \vec{j} \cdot \vec{n} \cdot dS \quad (2.12)$$

Donde  $\mu_0$  es la permeabilidad magnética en el vacío.

Pero cuando esta relación se considera con campos que sí varían a través del tiempo llega a cálculos erróneos, como el de violar la conservación de la carga.[15] Maxwell corrigió esta ecuación para lograr adaptarla a campos no estacionarios y posteriormente pudo ser comprobada experimentalmente. Maxwell reformuló esta ley así:[12]

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 \int_S \vec{j} \cdot \vec{n} \cdot dS + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int_S \vec{E} \cdot \vec{n} \cdot dS \quad (2.13)$$

En el caso específico estacionario esta relación corresponde a la ley de Ampere, además confirma que un campo eléctrico que varía con el tiempo produce un campo magnético y además es consecuente con el principio de conservación de la carga.[15]

En forma diferencial, ésta ecuación toma la forma:

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.14)$$

### 2.2.5 Orígenes de las ecuaciones.

Las dos primeras ecuaciones (llamadas Ley de Gauss (1777-1855) para campos magnéticos y Ley de Gauss para campos eléctricos) relacionan cómo se extienden los campos magnéticos y eléctricos, respectivamente por el espacio estando presentes sus fuentes. La tercera y la cuarta relacionan los campos eléctricos y magnéticos cuando ellos dependen del tiempo [16].

La primera ( $\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$ ) proviene del hecho de que no se han encontrado monopolos magnéticos (polos aislados), ni siquiera para campos magnéticos dependientes del tiempo. Es decir, experimentalmente se ha observado que siempre las líneas de campo magnético no divergen de ningún punto ni convergen a ningún punto, es decir, su divergencia es nula (forma diferencial). O lo que es equivalente, [16] que el flujo de campo magnético a través de cualquier superficie cerrada es nulo (forma integral).

La segunda ( $\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho_L$ ) es una generalización de la Ley de Coulomb (1736-1806). La Ley de Coulomb es sólo válida para cargas estáticas, mientras que la Ley de Gauss vale también para campos que varían con el tiempo, es decir, cargas no estacionarias. Esta ley describe cómo convergen las líneas de campo sobre una carga negativa, y cómo

divergen desde una carga positiva (forma diferencial). Es lo mismo interpretarla como que el flujo del vector desplazamiento a través de una superficie cerrada es numéricamente igual a la carga libre encerrada (no carga inducida). Es una consecuencia de la Ley de Coulomb.

La tercera es la Ley de Faraday (1791-1867). Es históricamente posterior a la de Ampere, y establece que todo campo magnético que varíe con el tiempo inducirá un campo eléctrico.

La cuarta es la Ley de Ampere (1775-1836) original describe la relación entre el campo magnético y la corriente que la origina. Es decir, la electricidad produce magnetismo (hilo por el que circula corriente). Sin embargo Maxwell (1831-1879) introdujo un término adicional, que corresponde a la llamada corriente de desplazamiento [16]. En la Ley de Ampere original había una falla cuando las corrientes eran variables, que Maxwell solucionó.

### 2.3 En medios materiales.

Para el caso de que las cargas estén en medios materiales, y asumiendo que éstos son lineales, homogéneos, isótropos y no dispersivos, podemos encontrar una relación entre los vectores intensidad e inducción a través de dos parámetros conocidos como permitividad eléctrica y la permeabilidad magnética:[17]

$$\epsilon_0 = 10^{-9}/36\pi \text{ F/m} \quad (2.15)$$

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ H/m} \quad (2.16)$$

En general:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} \quad (2.17)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad (2.18)$$

Pero estos valores también dependen del medio material, por lo que se dice que un medio es lineal cuando la relación entre E/D y B/H es lineal. Si esta relación es lineal, matemáticamente se puede decir que  $\epsilon$  y  $\mu$  están representadas por una matriz 3x3. Si un medio es isótropo es porque esta matriz ha podido ser diagonalizada y consecuentemente es equivalente a una función  $\epsilon(x, y, z)$ ; si en esta diagonal uno de los elementos es diferente al otro se dice que es un medio anisótropo. Estos elementos también son llamados constantes dieléctricas y cuando estas constantes no dependen de su posición, el medio es homogéneo.[16]

El valor de  $\epsilon$  y  $\mu$  en medios lineales no dependen de las intensidades del campo. Por otro lado, la permitividad y la permeabilidad son escalares cuando las cargas están en medios homogéneos e isótropos. Los medios heterogéneos e isótropos dependen de las coordenadas de cada punto por lo que los valores, escalares, van a depender de la posición. Los medios anisótropos son tensores. [17] Finalmente, en el vacío tanto  $\rho$  como  $\vec{J}$  son cero porque suponemos que no hay fuentes.

En la Tabla 4 encontramos las ecuaciones como se formulan en el vacío y en la forma más general. [18]

Diferencial	Ley de Ampère	Ley de Faraday	Ley de Gauss	Ley de Gauss
Caso general	$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$	$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	$\nabla \cdot \vec{D} = \rho$	$\nabla \cdot \vec{B} = 0$
Espacio libre	$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$	$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	$\nabla \cdot \vec{D} = 0$	$\nabla \cdot \vec{B} = 0$
Armónica	$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + (\sigma + j\omega\epsilon) \vec{E}$	$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu \vec{H}$	$\nabla \cdot \vec{D} = \rho$	$\nabla \cdot \vec{B} = 0$
Estacionario	$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}$	$\nabla \times \vec{E} = 0$	$\nabla \cdot \vec{D} = \rho$	$\nabla \cdot \vec{B} = 0$

Tabla 4. Agrupación de leyes.

En el espacio libre las corrientes y las cargas son cero y las ecuaciones de Maxwell se pueden simplificar eliminando los términos correspondientes. Asimismo si las fuentes varían armónicamente con el tiempo, las ecuaciones electromagnéticas y sus soluciones se simplifican, utilizando para ello una notación fasorial, de forma que las derivadas respecto al tiempo se transforman en productos por el factor  $j\omega$ . Finalmente para casos sin variación temporal, las ecuaciones toman las formas de electrostática y magnetostática. [18]

## 2.4 Ecuaciones de Maxwell.

Las ecuaciones de Maxwell como ahora las conocemos son las cuatro citadas anteriormente y a manera de resumen se pueden encontrar en Tabla 5.

Nombre	Forma Diferencial	Forma Integral
<b>Ley de Gauss:</b>	$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$	$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{q}{\epsilon_0}$
<b>Ley de Gauss para el campo magnético:</b>	$\nabla \cdot \vec{B} = 0$	$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$
<b>Ley de Faraday:</b>	$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{s}$
<b>Ley de Ampere generalizada:</b>	$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$	$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \int_S \vec{j} \cdot \vec{n} \cdot ds + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int_S \vec{E} \cdot \vec{n} \cdot ds$

Tabla 5. Ecuaciones de Maxwell en forma Diferencial e Integral.

De las ecuaciones anteriores se deduce la ecuación de continuidad. Para ello se toma la divergencia de la ley de Ampere.

Teniendo en cuenta que la divergencia del rotacional es cero, se obtiene la relación entre las cargas y las corrientes.

$$\begin{aligned} \mathbf{0} &= \nabla \cdot \mathbf{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} &= 0 \end{aligned} \quad (2.19)$$

Estas cuatro ecuaciones junto con la fuerza de Lorentz son las que explican cualquier tipo de fenómeno electromagnético. Una fortaleza de las ecuaciones de Maxwell es que permanecen invariantes en cualquier sistema de unidades, salvo de pequeñas excepciones, y que son compatibles con la relatividad especial y general. Además Maxwell descubrió que la cantidad  $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$  era simplemente la velocidad de la luz en el vacío, por lo que la luz es una forma de radiación electromagnética. Los valores aceptados actualmente para la velocidad de la luz, la permitividad y la permeabilidad magnética se resumen en la siguiente Tabla 6:

Símbolo	Nombre	Valor numérico	Unidad de medida SI	Tipo
$c$	Velocidad de la luz	$2.998 \times 10^8$	metros por segundo	definido
$\epsilon_0$	Permitividad	$8.854 \times 10^{-12}$	faradios por metro	derivado
$\mu_0$	Permeabilidad magnética	$4\pi \times 10^{-7}$	henrios por metro	definido

Tabla 6. Valores de Símbolos

# Capítulo III

## **Parámetros fundamentales de una Antena.**

---

---

### **3. Introducción**

Para describir el funcionamiento de una antena, definiremos primero varios parámetros necesarios. Una antena formara parte de un sistema más amplio, por lo que caracterizarla en una serie parámetros que la describan y permitan evaluar el efecto sobre el sistema de una determinada antena o bien especificar el comportamiento deseado de una antena para incluirla en ese sistema.

Las definiciones que se recogen aquí están en consonancia con el estándar de la **IEEE (IEEE Std 145-1983)** y van a permitir tratar la antena como una caja negra, para ser insertada en un sistema de radiocomunicaciones. *De hecho, lo habitual es que el ingeniero de sistemas especifique la antena como un conjunto de parámetros conectados con los requisitos de un radioenlace (buena calidad y bajo nivel de interferencias con otros servicios), y será tarea del ingeniero de antenas el diseño de la estructura radiante que cumpla estos requisitos.* [5] Se van a definir parámetros de tipo circuito, parámetros de tipo direccional, y parámetros específicos para transmisión o para recepción; aunque aplicando el principio de reciprocidad se establece una equivalencia entre ambas situaciones.

#### **3.1 Patrón de Radiación.**

Cada antena tiene su propia forma de irradiar una señal. Hay antenas que irradian más en una dirección que en otra, hay otras que tienden a irradiar casi por igual en todas las direcciones, y hay antenas que irradian solo en ciertas direcciones. En algunas circunstancias es necesaria la representación grafica de la fase del campo eléctrico. Esta representación recibe el nombre de *Diagramas de fase* o *Patrón de Radiación*.

*Patrón de Radiación*: es un diagrama o grafica polar que representa las intensidades de los campos o las densidades de potencia en varias posiciones angulares en relación con una antena, [19] o simplemente la forma característica que tiene una antena de emitir la señal. [20]

Si la grafica de radiación se traza en términos de *intensidad del campo eléctrico* ( $E$ ) o de *densidad de potencia* ( $P$ ) se llama grafica de radiación *absoluta* (distancia variable y potencia fija). Si se grafica intensidad de campo o densidad de potencia con respecto al valor de algún punto de referencia se llama grafica de radiación *relativa* (potencia variable y distancia fija).

En un patrón de irradiación hay direcciones en las que se emite mucha energía, y direcciones en donde no se emite energía del todo. Estos vienen a formar las llamadas direcciones "sordas" de las antenas, en donde prácticamente no se reciben señales.

Para representar las graficas características de radiación en función de la dirección angular emplearemos un sistema de coordenadas que nos permita definir cómodamente una dirección del espacio. El sistema de coordenadas utilizado habitualmente en antenas es el esférico. Para especificar una dirección del espacio se utilizan las tres variables de ángulos de un sistema esférico ( $r, \theta, \phi$ ) y son demostradas en la figura 3.1.

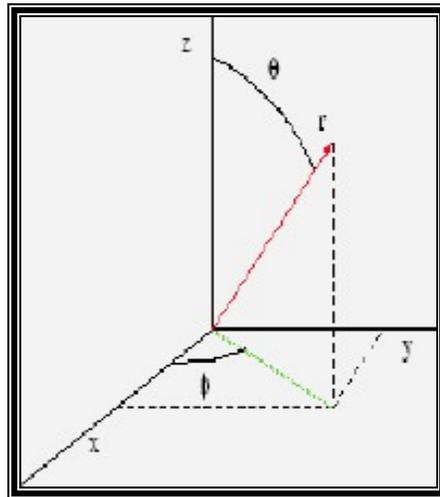


Figura 3.1 Sistema de coordenadas esféricas.

La orientación de los vectores se determina mediante la intersección de una esfera de radio  $r$ , un cono de ángulo  $\theta$ , y un semiplano  $\phi$  que pasa por el eje  $z$ , como se muestra en las figuras 3.2 y 3.3 [6].

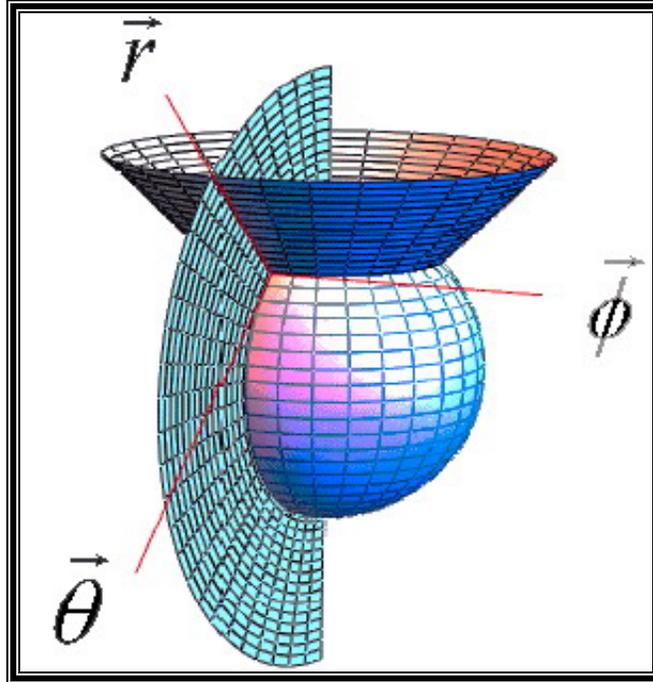


Figura 3.2 Orientación vectorial en el espacio.

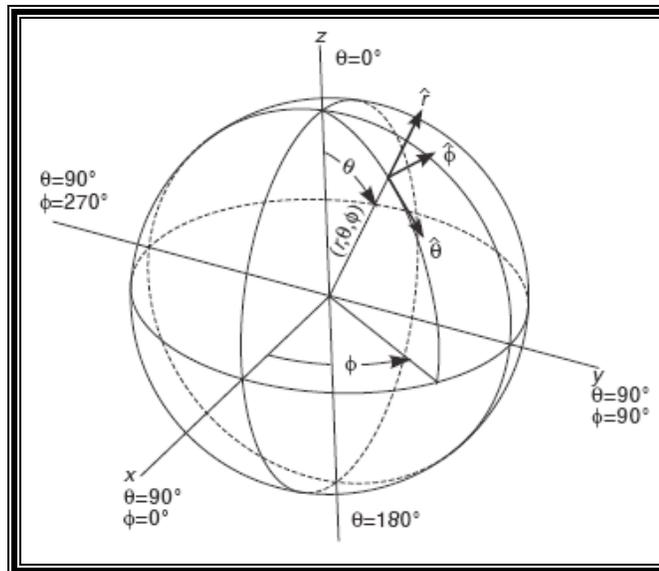


Figura 3.3 Sistema de coordenadas esférico.

### 3.1.1 Diagramas tridimensionales.

Utilizar este tipo de diagramas se puede representar el campo eléctrico, magnético o la densidad de potencia radiada. Dado que los campos son magnitudes vectoriales se pueden representar el módulo o la fase de sus componentes. Las formas de representación pueden ser tridimensionales o bidimensionales, en escalas lineal o logarítmica. La siguiente figura es la representación tridimensional de los campos radiados por una antena y los planos E y H (figura 3.4). Para antenas linealmente polarizadas se define el *Plano E* como el que forman la dirección de máxima radiación y el campo eléctrico en dicha dirección. El *Plano H* es el formado por la dirección de máxima radiación y el campo magnético de dicha dirección. Ambos planos son perpendiculares y su intersección determina una línea que define la *dirección de máxima radiación de la antena*.

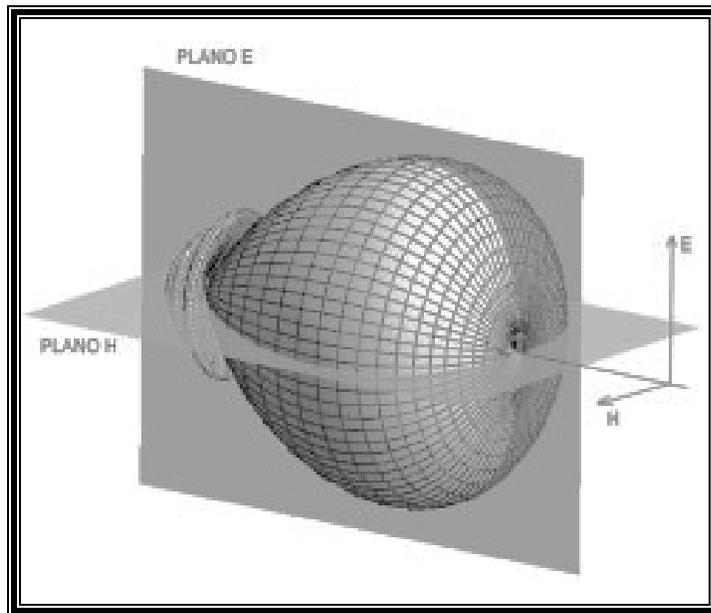


Figura 3.4 Diagrama de radiación tridimensional.

Si bien la información de la radiación es tridimensional, puede ser de interés, representar un corte del diagrama. Los cortes pueden hacerse de infinitas formas. Los más habituales son los que siguen los meridianos en una hipotética esfera (cortes para  $f$  constante) o los

paralelos (cortes con  $q$  constante). La información de todos los cortes del diagrama es excesiva, por lo que se recurre a representar dicha información sólo en los planos principales.

Los cortes bidimensionales del diagrama de radiación se pueden representar en coordenadas polares o cartesianas. En el primer caso el ángulo en el diagrama polar representa la dirección del espacio, mientras que el radio representa la intensidad del campo eléctrico o la densidad de potencia radiada. En coordenadas cartesianas se representa el ángulo en abscisas y el campo o la densidad de potencia en ordenadas.

La representación en coordenadas cartesianas permite observar los detalles en antenas muy directivas, mientras que el diagrama polar suministra una información más clara de la distribución de la potencia en las diferentes direcciones del espacio. Las figuras 3.5 y 3.6 muestran ejemplos de ambas representaciones.

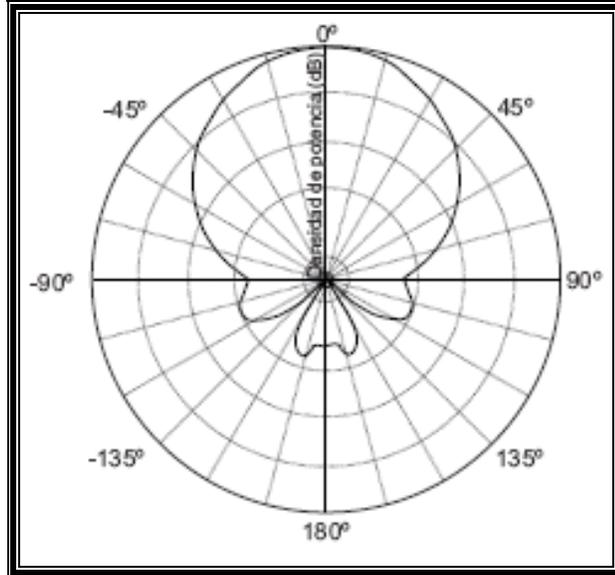


Figura 3.5 Diagrama de radiación en coordenadas Polares.

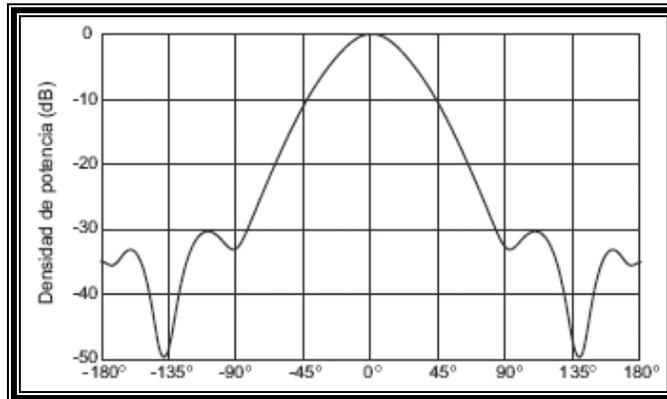


Figura 3.6 Diagrama de radiación en coordenadas cartesianas

### 3.1.2 Patrones Isotrópico, Direccional y Omnidireccional.

Según la forma del diagrama de radiación, las antenas se pueden clasificar [20] (figura 3.7) en:

- **Isotrópicas:** Antenas hipotéticas, sin pérdidas, que emiten o reciben señales con igual intensidad en todas direcciones.
- **Omnidireccionales:** Antenas que tienen un patrón de radiación no direccional en un plano y uno direccional en un plano ortogonal
- **Direccionales:** Antenas que radian o reciben señales mejor en unas direcciones que en otras.
  - ❖ Unidireccionales: una dirección,
  - ❖ Multidireccionales: varias direcciones.

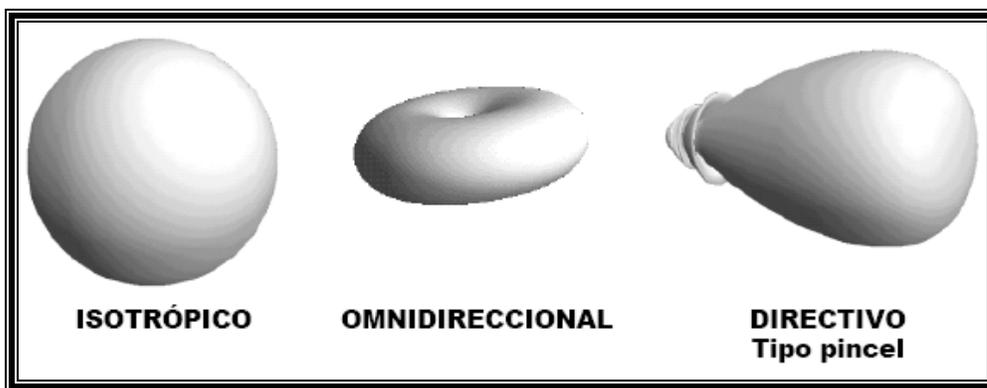


Figura 3.7 Representación gráfica de las características de radiación de las antenas.

- ❖ **Haz pincel:** cuando es un haz cónico, estrecho en ambas coordenadas angulares. La aplicación típica es para comunicaciones punto a punto y como ejemplo tenemos las antenas reflectoras (figura 3.8).

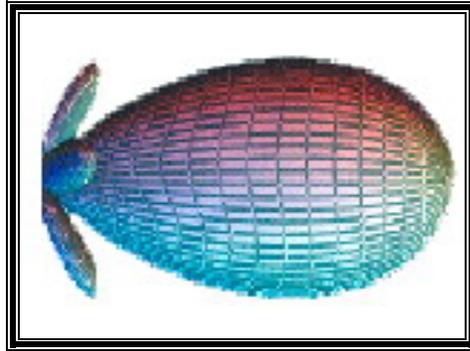


Figura 3.8 Haz de Pincel.

- ❖ **Haz en abanico (o haz sectorial):** cuando en un plano tenemos un haz muy estrecho y en el otro más ancho. Como ejemplo de aplicación tenemos las antenas sectoriales de telefonía móvil, que en elevación presentan un haz muy estrecho, típicamente  $8^\circ$ , mientras que en azimut cubren un sector de  $120^\circ$ , con anchos de haz de  $65^\circ$ . Estas antenas son arrays lineales verticales de dipolos o parches. Otro ejemplo son las antenas de los radares de navegación marítima, para poder discernir la costa o la presencia de otro barco.

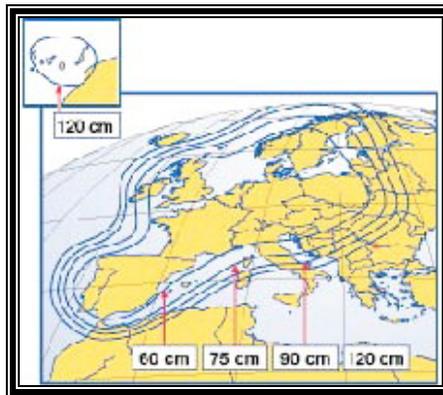


Figura 3.9 Haz Contorneado

- ❖ **Haz contorneado:** cuando la forma del haz se ajusta a un contorno específico. Por ejemplo se utilizan en las antenas de satélite para conseguir la cobertura deseada. En la Figura 3.9 se presenta la cobertura de HISPASAT para España. Las antenas pueden ser reflectores con superficies conformadas y alimentados con estructuras complejas.
- ❖ **Haz conformado:** cuando el diagrama de radiación se ajusta a una función (por ejemplo es típica la función cosecante cuadrado). Se utilizan por ejemplo en radares de vigilancia o en sistemas LMDS.
- ❖ **Multihaz:** cuando la antena tiene varios lóbulos principales (figura 3.10).

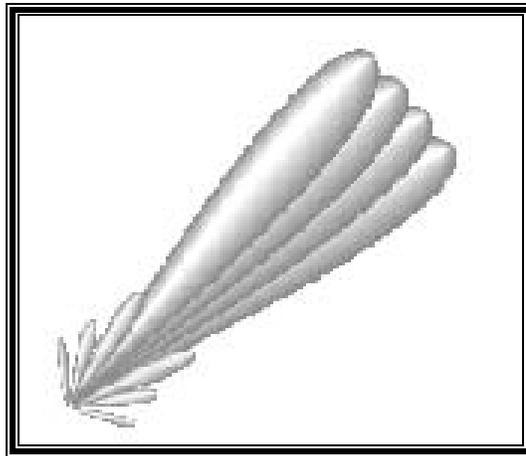


Figura 3.10 Diagrama Multihaz

- **Haz Reconfigurable:** cuando se puede controlar el diagrama de radiación de forma remota según las necesidades del sistema de comunicaciones. Esta característica puede ser muy interesante en antenas embarcadas en satélite, y se puede conseguir con arrays de antenas, cambiando la excitación de los elementos, o con reflectores multialimentados, cambiando la excitación de alguno de los alimentadores.
- **Haz Adaptativo:** cuando el diagrama de radiación se adapta instantáneamente al entorno radioeléctrico.

### 3.1.3 Parámetros del diagrama de radiación.

Asociados al diagrama de radiación, se definen una serie de parámetros, que son los que frecuentemente se utilizan a la hora de especificar el comportamiento de una antena. Para ello, se define un *lóbulo de radiación* como la porción del diagrama limitada por regiones de menor radiación (nulos). Varias partes de un diagrama de radiación están referidas como *lóbulos*, los cuales se sub clasifican en lóbulos *mayor* o *principal*, *menor*, *frontal*, *lateral* y *trasero* [3] [22] (figura 3.11).

- ❖ **Lóbulo mayor o principal:** también conocido como Haz primario esta en la dirección de  $90^\circ$ , aquel que contiene la dirección de máxima radiación (puede haber mas de un lóbulo mayor).
- ❖ **Lóbulo menor o secundario:** todos aquellos distintos al principal; en el caso normal, los lóbulos menores representan radiación o recepción no deseada con una dirección de  $-180^\circ$ .
- ❖ **Lóbulo frontal:** Posicionado frente de la antena propagándose y recibiendo la mayor cantidad de energía.
- ❖ **Lóbulos laterales:** o los adyacentes al principal, que generalmente son los más altos de todos los secundarios.
- ❖ **Lóbulo trasero o posterior:** el que se encuentra en la dirección opuesta al principal.

Una vez definidos los lóbulos se determinan los siguientes parámetros que se especifican en la Figura 3.11.

- ❖ **Nivel de lóbulos secundarios:** el nivel del mayor lóbulo secundario respecto al principal. A veces se utiliza la relación de lóbulo principal a lóbulo secundario, que coincide con el negativo del anterior (en dB). Los lóbulos secundarios radian potencia indeseada en direcciones no controladas, que pueden dar lugar a interferencias en sistemas de comunicaciones.

- ❖ **Ancho del haz principal a –3 dB:** es el ancho del lóbulo principal entre puntos de potencia mitad, en el plano considerado.
- ❖ **Ancho del haz principal entre nulos:** es el ancho del lóbulo principal completo. Para el mismo plano, la relación entre los dos parámetros anteriores está comprendida entre 2 y 3, dependiendo de la distribución de corriente o de campo sobre la antena. A nivel práctico se suele utilizar:

$$BW_n \approx 2.25 \cdot BW_{-3dB}$$

- ❖ **Relación delante-atrás:** es la relación entre el lóbulo principal y el lóbulo posterior. La radiación posterior puede ser causa de interferencias en radio enlaces, ya que muchas veces, debido a la simetría de los reflectores parabólicos, la radiación posterior asociada a la difracción en los bordes de éstos es elevada.

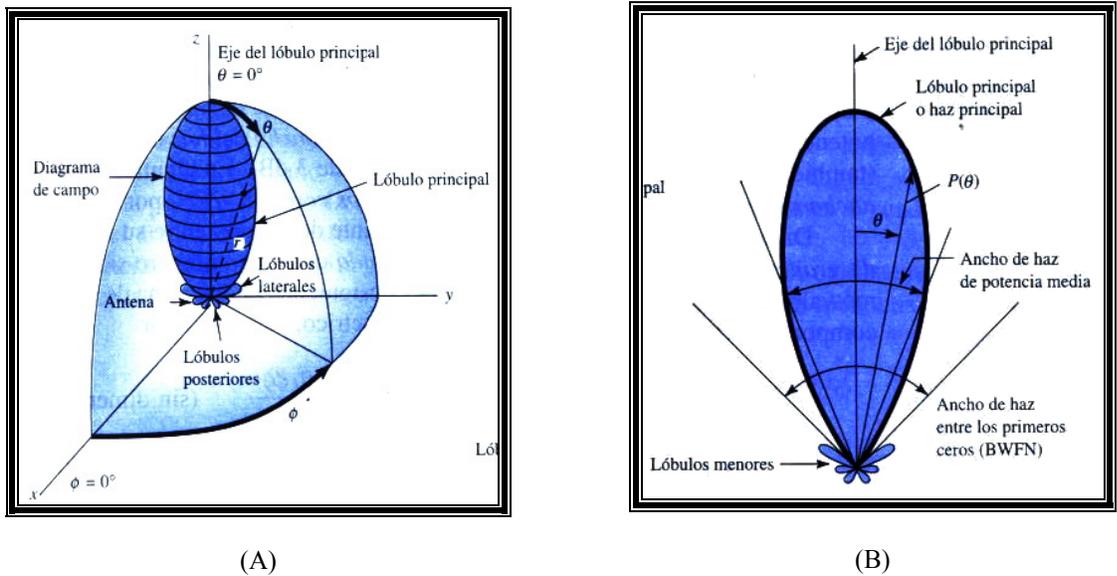


Figura 3.11 Parámetros del diagrama de radiación (A Y B).

En radiocomunicaciones, los lóbulos secundarios representan radiaciones indeseadas que pueden llegar a interferir con otros sistemas.

### 3.1.4 Región de Campos.

Se puede decir que el fenómeno de radiación es una consecuencia del movimiento acelerado de partículas cargadas, es decir, al tener partículas cargadas eléctricamente que experimentan aceleración, se produce un campo eléctrico y magnético que se propaga en el espacio. Por eso, al tener corrientes que varían en el tiempo en un conductor, este conductor comienza a radiar.

Los campos radiados, asociados con la antena, cambian con la distancia y son asociados con dos tipos de energía: energía radiada y energía reactiva (o de inducción) [20] figura 3.12).

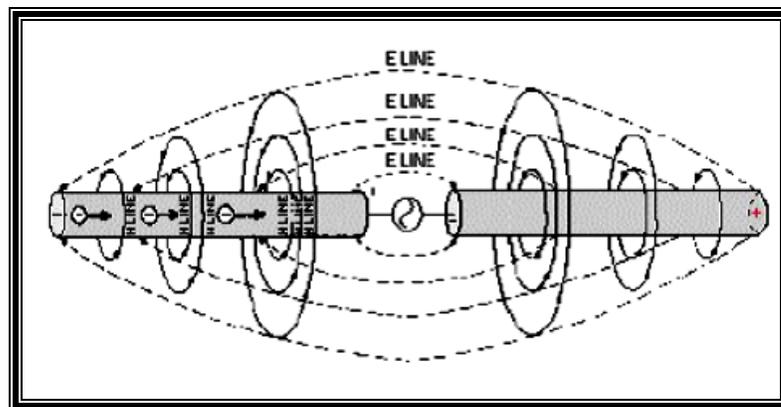


Figura 3.12 Movimiento de campo Eléctrico y Magnético

El espacio rodeado en una antena es usualmente subdividido en tres regiones [3]:

- ❖ Región reactiva de Campo Cercano
- ❖ Región de radiación de Campo Cercano (Fresnel)
- ❖ Región de radiación de Campo Lejano (Fraunhofer)

El campo de radiación cercano a una antena no es igual que el que está a una gran distancia. El término *campo cercano* se refiere a la gráfica de radiación cerca de una antena y el término *campo lejano* indica una gráfica de radiación a gran distancia. Para tener un amplio panorama de cada región de campo (figura 3.13) los analizaremos de forma individual.

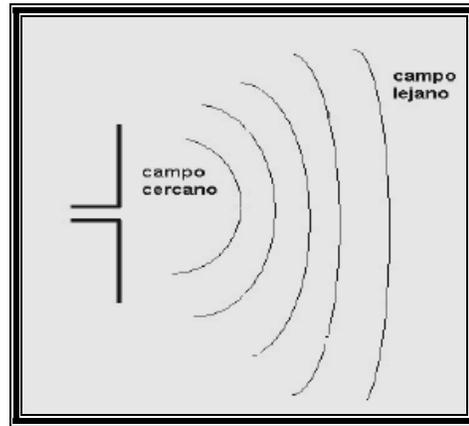


Figura 3.13 Ilustración de campos

#### 3.1.4.1 Región Reactiva de Campo Cercano

Se define como “*aquella porción de la región de campo cercano rodeando inmediatamente la antena en donde el campo reactivo predomina*”. [3]

En esta región, el campo reactivo es el dominante, la energía reactiva oscila hacia y desde la antena, de esta manera apareciendo como *reactancia*. En esta región, la energía no es disipada, sino que es energía que permanece almacenada.

La importancia de esta región de campo es que proporciona las condiciones de borde necesarias para adaptar los campos entre la antena y el espacio libre. Se toma esta región para distancias hasta  $R_1 = 0.62\sqrt{D^3/\lambda}$  (figura 3.14) donde  $R_1$  es la distancia la superficie de la antena,  $D$  es la dimensión más grande de la antena y  $\lambda$  es la longitud de onda.

#### 3.1.4.2 Región de radiación de Campo Cercano (llamada Región de Fresnel)

Se define como “*aquella región del campo de una antena entre la región reactiva de campo cercano y de la región de campo lejano en donde predominan los campos de radiación y en donde la distribución del campo angular depende de la distancia de la antena. Si la antena tiene una dimensión máxima que no es grande en comparación con la longitud de onda, esta región puede no existir. Para una antena orientada al infinito,*

*la región de radiación de campos cercanos es referida en algunas veces a la región de fresnel sobre la base de analogía a terminología óptica. Si la antena tiene una dimensión máxima global que es muy pequeña en comparación con la longitud de onda, esta región de campo no puede existir”. [3]*

Esta región se ubica entre la región reactiva de campo cercano y la región de campo lejano. El campo reactivo en esta región es pequeño y el campo radiado decrece rápidamente en función de la distancia desde la antena. La frontera interior es tomando para ser la distancia  $R \geq 0.62 \sqrt{D^3/\lambda}$  y la distancia de la frontera exterior es de  $R < 2D^2/\lambda$  donde  $D$  es la mayor dimensión de la antena. Este criterio es basado sobre una máxima fase de error de  $\pi/8$ . La distancia para esta región es  $R_2 = 2D^2/\lambda$ .

#### **3.1.4.3 Región de Campo Lejano (llamada Región de Fraunhofer)**

*Se define como “aquella región del campo de una antena donde la distribución de campo angular es esencialmente independiente de la distancia de la antena. Si la antena tiene una dimensión máxima global  $D$ , la región de campo lejano es comúnmente tomada para salir a distancia grandes que  $2D^2/\lambda$  de la antena. Donde  $\lambda$  es la longitud de onda. Los diagramas de campo lejano de ciertas antenas, tal como antenas de reflector multihaz, son sensibles a las variaciones en la fase sobre sus aperturas. Para estas antenas  $2D^2/\lambda$  puede ser inadecuada. En medio físico, si la antena tiene una dimensión máxima global,  $D$  la cual es grande comparada a  $\pi/|\gamma|$ , la región de campo lejano puede ser tomado para empezar aproximadamente a una distancia igual a  $|\gamma|D^2/\pi$  de la antena, Donde  $\gamma$  es la constante de propagación en el medio. Para una antena orientada al infinito, la región de campo lejano referida en algunas veces a la región de Fraunhofer sobre la base de analogía a terminología óptica”. [3]*

En esta región de Fraunhofer (que está fuera de  $R_2 = 2D^2/\lambda$ ), los componentes de campo es esencialmente transversal y la distribución angular es independiente de la distancia radial donde la medida está hecha. La frontera interior (figura 3.14) es tomada para hacer la distancia radial  $R_2 = 2D^2/\lambda$  y en exterior uno a infinito. En esta región los campos reactivos ya han desaparecido y sólo quedan los campos de radiación. Estos campos de radiación decrecen en forma proporcional a la distancia, a diferencia de los campos reactivos que decrecen en forma proporcional al cuadrado o al cubo de la distancia desde la antena.

El campo lejano se estudia como solución de onda plana, ya que a una distancia grande en relación a la longitud de onda los campos formados pueden verse como un plano para una pequeña región.

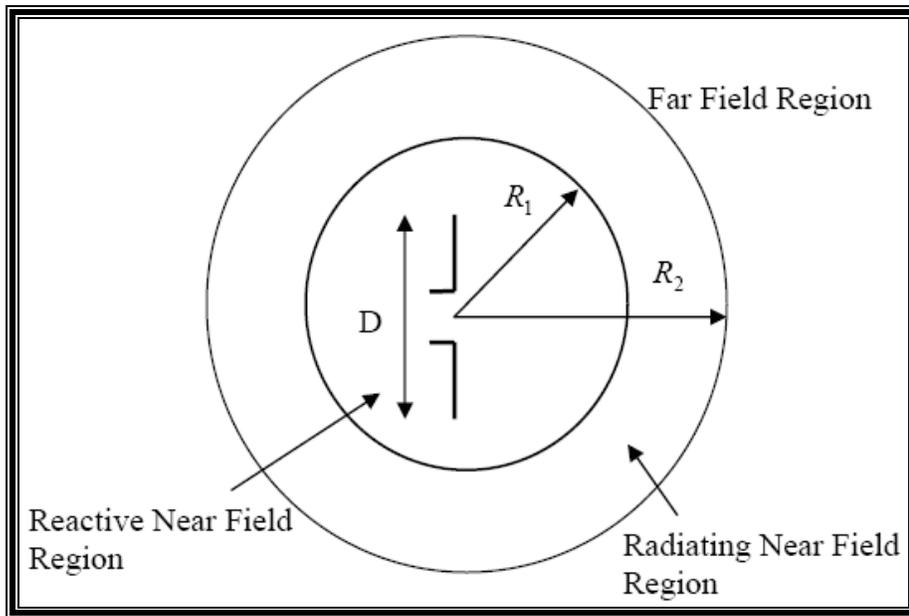


Figura 3.14 Región de Campos.

### 3.2 Impedancia.

La impedancia de entrada de una antena es definida como “la impedancia presentada por una antena en sus terminales o el ratio del voltaje a la corriente en el par de terminales o el ratio de los componentes apropiados de los campos eléctrico o magnético en un punto” [3]. Por lo tanto la impedancia de la antena puede ser escrita como:

$$\boxed{Z_{in} = R_{in} + jX_{in}} \quad (3.1)$$

donde  $Z_{in}$  es la impedancia de la antena en las terminales.

$R_{in}$  es la resistencia de la antena en las terminales.

$X_{in}$  es la reactancia de la antena en las terminales.

La parte imaginaria,  $X_{in}$  de la impedancia de entrada representa la potencia acumulada en el campo cercano de la antena. La parte resistiva,  $R_{in}$  de la impedancia de entrada consiste de dos componentes, la resistencia de radiación  $R_r$  y las pérdidas de resistencia  $R_L$ . La potencia asociada con la resistencia de radiación es la potencia realmente radiada por la antena, mientras la potencia disipada en la pérdida de resistencia es pérdida como calor en la antena así debido a pérdidas dieléctricas o conducción.

Entonces la corriente va hacia la antena pasando por la línea de transmisión, que esta conectada con un espacio pequeño entre los conductores que forman la antena. El punto de la antena donde se conecta la línea de transmisión se llama *terminal de entrada de la antena* o simplemente *punto de alimentación*. El punto de alimentación presenta una carga de c.a. a la línea de transmisión, llamada *impedancia de entrada de (o a) la antena*. Si la impedancia de salida de la transmisión y la impedancia de entrada de la antena son iguales a la impedancia característica de la línea de transmisión, no habrá ondas estacionarias en la línea y se transmitirá una potencia máxima a la antena, potencia que será radiada.

La impedancia de entrada de una antena es sólo la relación del voltaje de entrada a la antena a la corriente de entrada a la misma, es decir

$$\boxed{Z_{in} = E_{in}/I_{in}} \quad (3.2)$$

en donde  $Z_{in}$  es la impedancia de entrada a la antena ( $\Omega$ ).

$E_{in}$  es el voltaje de entrada a la antena (v).

$I_{in}$  es la corriente de entrada a la antena (A).

### 3.3 Directividad.

La directividad  $D$  de una antena ha sido definida como “*el ratio de la intensidad de radiación en una dirección dada de la antena a la intensidad de radiación promedio a todas las direcciones*” [3] en otras palabras la *directividad* es la habilidad de una antena para enviar o recibir señales dentro de un margen direccional, una antena direccional elimina interferencia de otras señales recibidas de todas direcciones, menos de la dirección de la señal deseada. Una antena muy direccional actúa como filtro para proporcionar selectividad basada en la dirección de la señal. La antena receptora se apunta de manera directa a la estación por recibirse y por lo tanto, rechaza de modo efectivo las señales de otros transmisores en todas las demás direcciones.

Las *antenas direccionales* proporcionan mayor eficacia en la transmisión de energía, con las *antenas omnidireccionales* la energía transmitida se radia en todas direcciones y solo la recibe una pequeña cantidad de energía mediante la estación deseada; el resto es, en efecto, desperdiciado. Si la antena se vuelve direccional, la energía del transmisor puede enfocarse en un haz angosto dirigido hacia la estación deseada.

Técnicamente, la directividad de una antena se define como la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección, a una distancia y a la densidad de potencia que radiaría a la misma distancia una antena isotrópica, a igualdad de potencia total radiada (figura 3.15).

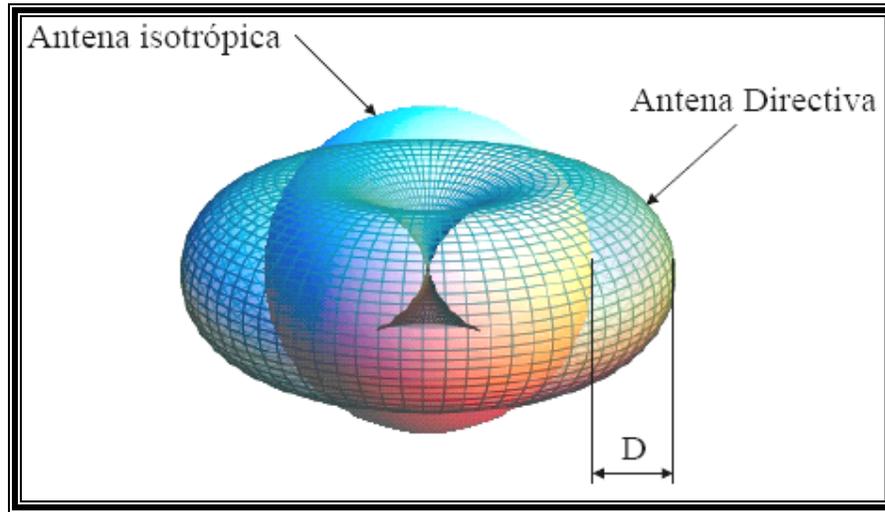


Figura 3.15 Directividad.

La directividad de una fuente no-isotrópica es igual a el radio de la intensidad de radiación en una dirección dada, más de una fuente isotrópica.

$$D = \frac{U}{U_i} = \frac{4\pi U}{P} \quad (3.3)$$

donde  $D$  es la directividad de la antena.

$U$  es la intensidad de radiación de la antena.

$U_i$  es la intensidad de radiación de una fuente isotrópica.

$P$  es el total de la potencia radiada.

Algunas veces, la dirección de la directividad no esta especificada. En ese caso, la dirección de la máxima intensidad de radiación es implícita y la directividad máxima esta dada [3] como:

$$D_{\max} = \frac{U_{\max}}{U_i} = \frac{4\pi U_{\max}}{P} \quad (3.4)$$

donde  $D_{\max}$  es la directividad máxima.

$U_{\max}$  es la máxima intensidad de radiación.

Directividad es una cantidad sin dimensiones, que es el ratio de dos intensidades de radiación. Por lo tanto, este es generalmente expresado en dBi. La directividad de una antena puede ser fácilmente calculada del patrón radiación de la antena. Una antena que tiene un estrecho lóbulo principal tendría mejor directividad, entonces el que tiene un amplio lóbulo principal, por lo tanto es más directivo.

### 3.4 Eficiencia de antena.

La eficiencia de antena “es un parámetro que toma en cuenta la cantidad de pérdidas en las terminales de la antena y dentro de la estructura de la antena” [3]. Estas pérdidas son dadas como:

- ❖ Reflexiones a causa del desajuste entre el transmisor y la antena.
- ❖  $I^2 R$  pérdidas (conducción y dieléctrico).

Por lo tanto el total de la eficiencia de antena puede ser escrito como:

$$e_t = e_r e_c e_d \quad (3.5)$$

donde  $e_t$  = total de eficiencia de antena

$e_r = (1-|\Gamma|^2)$  = eficiencia de reflexión (incompatibilidad).

$e_c$  = eficiencia de conducción.

$e_d$  = eficiencia dieléctrica.

Donde  $e_c$  y  $e_d$  son difíciles de separar, son agrupados juntos para formar la  $e_{cd}$  eficiencia la cual está dada como:

$$e_{cd} = e_c e_d = \frac{R_r}{R_r + R_L} \quad (3.6)$$

$e_{cd}$  es llamado como la eficiencia de radiación de la antena y es definida como el ratio de la potencia entregada para la resistencia de radiación  $R_r$ , para la potencia entregada para  $R_r$  y  $R_L$ .

Para calcular la eficiencia en porcentaje podemos ocupar la siguiente ecuación; “la relación de la potencia radiada por ella entre la suma de la potencia radiada y la potencia disipada o la relación de la potencia radiada por la antena entre la potencia total de entrada”. La ecuación de definición es

$$\eta = (P_{rad} / P_{ent}) \times 100 \quad (3.7)$$

donde  $\eta$  = eficiencia de la antena (%)

$P_{rad}$  = potencia radiada (w)

$P_{ent}$  = potencia de entrada (w)

$$\eta = \frac{P_{rad}}{P_{rad} + P_d} \times 100 \quad (3.8)$$

donde  $P_{rad}$  = potencia radiada por la antena (w)

$P_d$  = potencia disipada en la antena (w)

### 3.5 Ganancia de Antena.

La ganancia de antena es un parámetro que está estrechamente relacionada con la directividad de la antena. Sabemos que la directividad esta en una antena cuánto se concentra energía en una dirección de preferencia para radiación en otras direcciones. Por lo tanto si la antena es 100% eficiente, entonces la directividad deberá ser igual a la ganancia de la antena y la antena debería ser un radiador isotrópico. Puesto que todas las antenas radiaran más en alguna dirección que en otras, por consiguiente la ganancia es la cantidad de potencia que pueden lograrse en una dirección a expensas de la perdida de

potencia en las demás. La ganancia es siempre esta relacionada con el lóbulo principal y esta especificado en la dirección de máxima radiación al menos indicado. Esa esta dado como:

$$G(\theta, \phi) = e_{cd} D(\theta, \phi) \quad (\text{dBi}) \quad (3.9)$$

### 3.5.1 Ganancia Directiva.

La ganancia directiva es la “relación de la densidad de potencia radiada en una dirección particular entre la densidad de potencia radiada al mismo punto por una antena de referencia, suponiendo que ambas antenas estén radiando la misma cantidad de potencia”. [19] La ganancia directiva máxima se llama *directividad*. La ecuación de definición es:

$$D = P / P_{ref} \quad (3.10)$$

donde  $D$  = ganancia directiva.

$P$  = densidad de potencia en un punto, con determinada antena ( $\text{w/m}^2$ ).

$P_{ref}$  = densidad de potencia en el mismo punto, con antena de referencia ( $\text{w/m}^2$ ).

### 3.5.2 Ganancia en Potencia.

La *ganancia de potencia* es lo mismo que la ganancia directiva, excepto que se usa la potencia total alimentada a la antena; es decir, se toma en cuenta la eficiencia de la antena. Se supone que la antena dada y la antena de referencia tienen la misma potencia de entrada y que la antena de referencia no tiene pérdidas ( $\eta = 100\%$ ). La ecuación de la ganancia de potencia,  $A_p$ , es:

$$A_p = D\eta \quad (3.11)$$

Si la antena es sin pérdidas, radia 100% de la potencia de entrada y la ganancia de potencia es igual a la ganancia directiva. La ganancia de potencia de una antena también se expresa en decibelios en relación con una antena de referencia. En este caso, la ganancia de potencia es:

$$A_p(\text{dB}) = 10 \log (P_\eta / P_{\text{ref}}) \quad (3.12)$$

Para una referencia isotrópica, la ganancia de potencia en dB, de un dipolo de media onda es 1.64 (2.15 dB). Se expresa la ganancia de potencia en dB, cuando se refiere a un dipolo de  $\lambda/2$  (dBd). Sin embargo, si la referencia es un radiador isotrópico, se mencionan los decibelios como dBi ó dB/ radiador isotrópico y es 2.15 dB mayor que si se usara un dipolo de media onda como referencia.

### 3.6 Potencia Isotrópica efectiva Radiada (PIRE).

La *Potencia Isotrópica Efectiva Radiada (EIRP)* se define como la potencia equivalente de transmisión y se expresa como sigue:

$$EIRP = P_{\text{rad}} \quad (3.13)$$

siendo  $P_{\text{rad}}$  = potencia total radiada (w).

$D_t$  = ganancia directiva de la antena de transmisión.

O bien 
$$EIRP_{(\text{dBm})} = 10 \log (P_{\text{rad}} / 0.001) + 10 \log \quad (3.14)$$

O también 
$$EIRP_{(\text{dBW})} = 10 \log (P_{\text{rad}} \quad (3.15)$$

La ecuación 3.13 se puede escribir en función de la potencia de entrada y la ganancia de potencia de la antena, como sigue:

$$EIRP = P_{\text{ent}} A_t \quad (3.16)$$

en donde  $P_{ent}$  = potencia de entrada de la antena(w)

$A_t$  = ganancia de potencia de la antena de transmisión.

O bien 
$$\boxed{\text{EIRP}_{(\text{dBm})} = 10 \log (P_{ent} A_t)} \quad (3.17)$$

$$\boxed{\text{EIRP}_{(\text{dBw})} = 10 \log (P_{ent})} \quad (3.18)$$

La EIRP es la potencia equivalente que tendría que radiar una antena isotrópica para alcanzar la misma densidad de potencia en la dirección elegida y en determinado punto, que otra antena.

### 3.7 Polarización.

La polarización de una onda radiada es definida [Balanis] como “*esa propiedad de una onda electromagnética describiendo la dirección en las variables del tiempo y magnitud relativa del vector de campo eléctrico*”. [3] La polarización de una antena se refiere a la polarización del vector campo eléctrico de la onda radiada. En otras palabras, *la posición y dirección del campo eléctrico con referencia a la superficie terrestre o de la tierra determina la onda polarizada.*

Los tipos mas comunes de polarización incluye la *lineal* (figura 3.16) (horizontal; paralelo a la tierra o vertical; perpendicular a la tierra) y *circular* (polarización de mano derecha; sentido de las manecillas del reloj o polarización de mano izquierda; sentido contrario a las manecillas del reloj) *elíptica* (describe trayectoria elíptica)

Normalmente, dos antenas que forman un enlace deben colocarse para tener la misma polarización ya que si no estarán en polarización cruzada como por ejemplo cuando ocupamos la polarización lineal, una podrá estar en vertical y la otra en horizontal. Lo mismo pasa con la polarización circular podrá estar en circular mano derecha y la otra antena no podrá recibir una onda en polarización de mano izquierda. A veces estas polarizaciones son beneficiosas ya que un ejemplo de ello es cuando se tiene unas

antenas de un enlace A tiene polarización cruzada con las antenas de un enlace B. los enlaces de A y B son dos enlaces diferentes, ubicados cerca uno de otro, pero no es la intención que se comuniquen entre si. En este caso, el hecho de que los enlaces A y B tengan polarización cruzada es beneficioso, por que esto previene o reduce la posibilidad de interferencia entre los enlaces. [21]

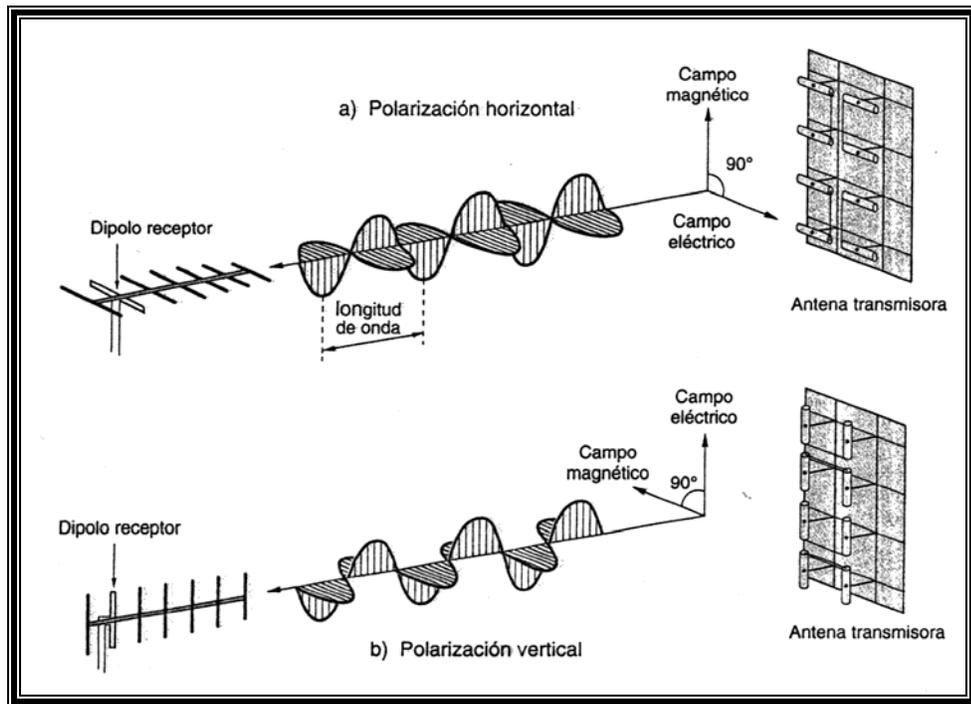


Figura 3.16 Polarización lineal

Si la ruta del vector campo eléctrico es hacia atrás y adelante sobre una línea, se dice que es linealmente polarizada. En una onda de polarización circular, el vector de campo eléctrico permanece constante en la longitud pero gira alrededor de una trayectoria circular. La polarización de onda circular de mano izquierda es una en la que la onda rota en sentido anti horario mientras que la polarización de onda circular de mano derecha exhibe movimiento como las agujas del reloj como lo muestra la figura 3.17.

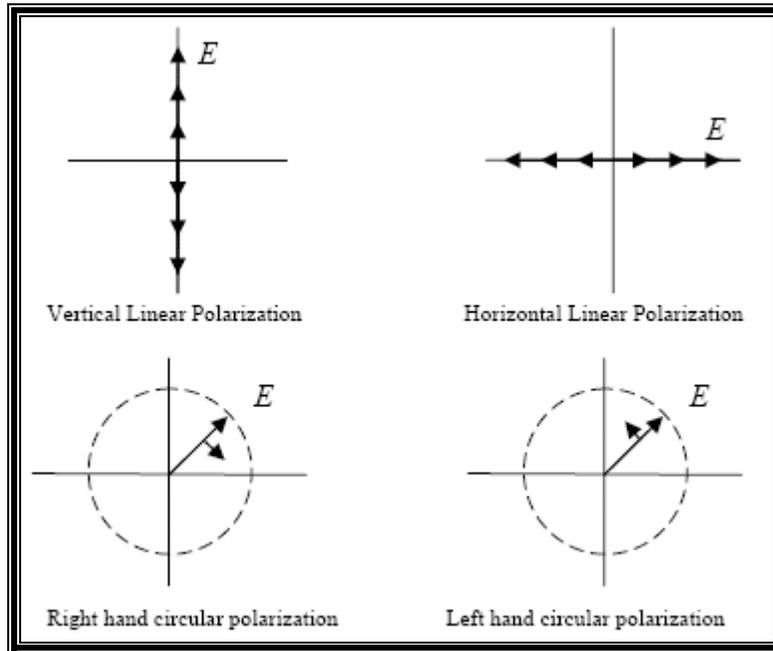


Figura 3.17 Polarización Lineal y Circular.

### 3.8 Ancho de banda (Bandwidth)

El ancho de banda de una antena es definido como “*rango de frecuencias usables dentro del cual la antena puede operar correctamente, con respecto a algunas características, conforme a un estándar especificado*”. [3] El ancho de banda puede ser el rango de frecuencias en ambos lados de la frecuencia central donde las características de antena como la impedancia de entrada, patrón de radiación, ancho de haz (beamwidth), polarización, nivel de lóbulo lateral o ganancia, son cercanos a los valores que han sido obtenidos en la frecuencia central. El ancho de banda de una antena de banda ancha (broadband) puede ser definido como el radio de la frecuencia superior a la inferior de operación aceptable. El ancho de banda de una antena de banda estrecha puede definirse como el porcentaje de la diferencia de frecuencia a través de la frecuencia central. Según estas definiciones pueden ser escritos en términos de ecuaciones como la siguiente:

$$BW_{broadband} = \frac{f_H}{f_L} \quad (3.19)$$

$$BW_{narrowband} (\%) = \left[ \frac{f_H - f_L}{f_c} \right] 100 \quad 3.20$$

donde  $f_H$  = frecuencia superior.

$f_L$  = frecuencia inferior.

$f_c$  = frecuencia central.

Una antena se dice que es de banda ancha (broadband) si  $f_H/f_L = 2$ . Un método juzgado de cuán eficientemente una antena esta operando sobre el rango requerido de frecuencias es midiendo su VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) (figuras 3.18 y 3.19). Un VSWR  $\leq 2$  (RL  $\geq -9.5$ dB) garantizando un buen rendimiento.

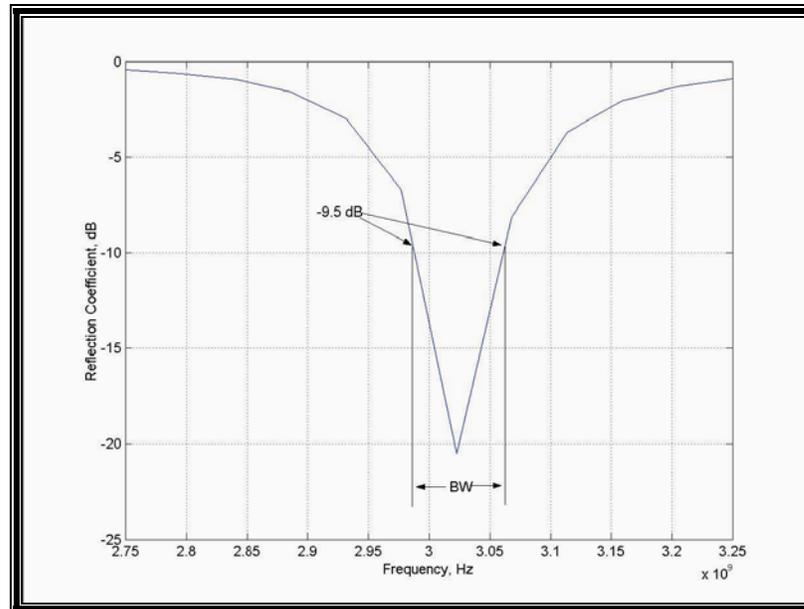


Figura 3.18 Medición del ancho de banda de el trazo del coeficiente de reflexión.

Mientras mayor es el rango de frecuencia que abarca una banda, mayor debe ser el ancho de banda de la antena. Si se diseña una antena para un gran ancho de banda,

generalmente no tendrá tan buen comportamiento como una antena similar optimizada en un ancho de banda más pequeño.

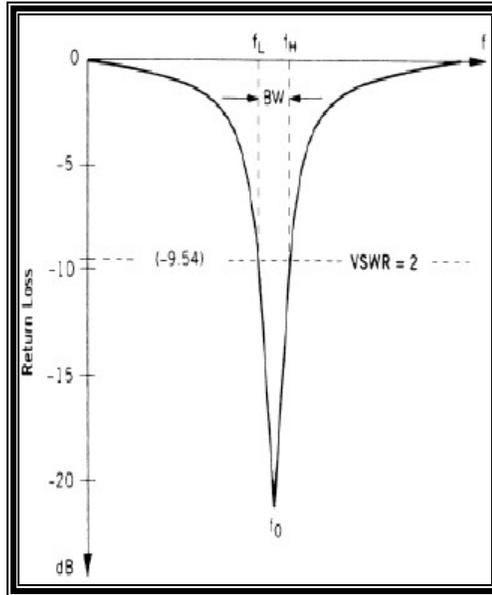


Figura 3.19 Medición del ancho de banda del VSWR

El ancho de banda es una constante relativa de la frecuencia, si el ancho de banda es expresado en unidades de frecuencia absoluta, sería diferente dependiendo de la frecuencia central. Diferentes tipos de antenas tienen diferentes limitaciones de ancho de banda.

### 3.9 Ancho de Haz de Media Potencia (HPBW)

El Half Power Beamwidth es definido como “la separación angular entre dos puntos de media potencia (-3dB) en el lóbulo mayor de la grafica de radiación de una antena, que se suele tomar en uno de los planos principales”. [3] La abertura del haz de la antena se llama a veces ancho de haz de -3dB o HPBW.

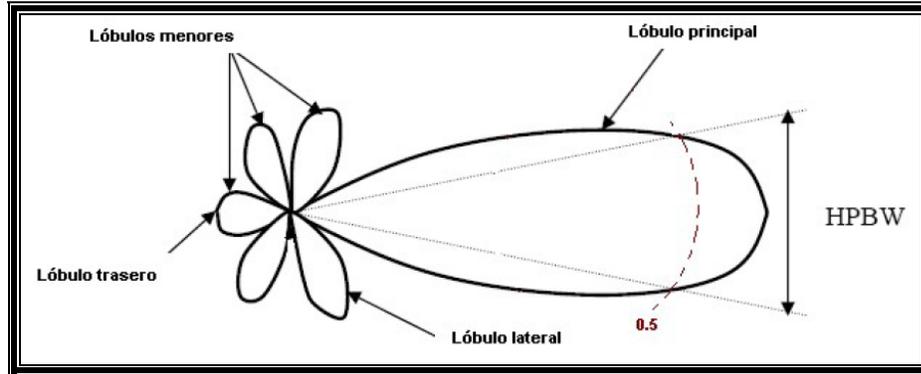


Figura 3.20 Ancho de Haz (HPBW)

Con frecuencia el término *beamwidth* es usado para describir el ángulo entre cualquiera de dos puntos en el diagrama, tal como el ángulo entre los puntos de 10 dB. En este caso los puntos específicos en el diagrama deberían ser descritos para evitar confusión. Sin embargo el termino *beamwidth* es usualmente invertido para describir 3dB de *beamwidth*.

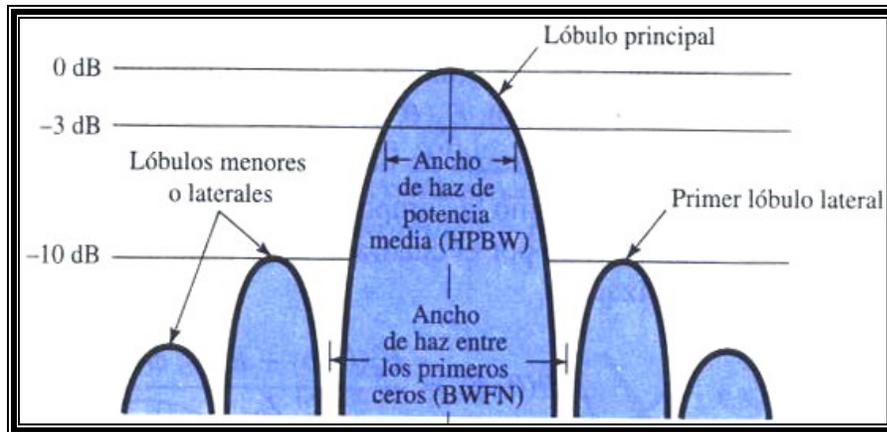


Figura 3.21 HPBW y FNBW

El *beamwidth* de la antena es una figura muy importante y suele utilizarse como un balance entre este y el nivel lóbulo lateral; es decir, como el *beamwidth* disminuye el lóbulo lateral incrementa y viceversa. Además, el *beamwidth* de la antena es también usado para describir la capacidad de resolución de la antena para diferenciar entre dos fuentes de radiación adyacentes o enfoques de radar. Los mas comunes criterios de

estados de resolución que *la capacidad de resolución de una antena para diferenciar entre dos fuentes es igual a la mitad del primer beamwidth nulo (FNBW/2)* (figuras 3.11b, 3.21), *que suele ser utilizado para aproximar la media potencia del beamwidth (HPBW)*. Además dos fuentes separadas por una distancia angular igual o mayor que  $FNBW/2 \approx HPBW$  de una antena con una distribución uniforme que puede ser resuelta. Si la separación es pequeña, entonces la antena tendrá a refinar la distancia de separación angular. [3]

# Capítulo IV

## Tipos de Antenas.

---

---

Actualmente existen un sin número de antenas. Su diseño varía desde un simple conductor recto a estructuras complejas y compuestas de muchos elementos. El tipo de antena que se escoja depende de los requisitos del sistema, es decir, de la frecuencia, directividad, polarización entre otros. Las antenas están en diferentes formas y tamaños para satisfacer diferentes tipos de aplicaciones en el mercado. Las características de una antena están muy determinadas por su forma, tamaño y el tipo de material del que está hecha. En este capítulo describiremos algunas antenas que se utilizan comúnmente.

A las antenas (reales) se las clasifica generalmente como direccionales y omnidireccionales.

El tipo de la antena determina su patrón de radiación puede ser omnidireccional, bidireccional, o unidireccional.

- ❖ *Las antenas Omnidireccionales* son buenas para cubrir áreas grandes, la cual la radiación trata de ser pareja para todos lados es decir cubre un radio de 360°.
- ❖ *Las antenas Direccionales* son las mejores en una conexión Punto-a-Punto, acoplamiento entre los edificios o para los Clientes de una antena omnidireccional. [24]

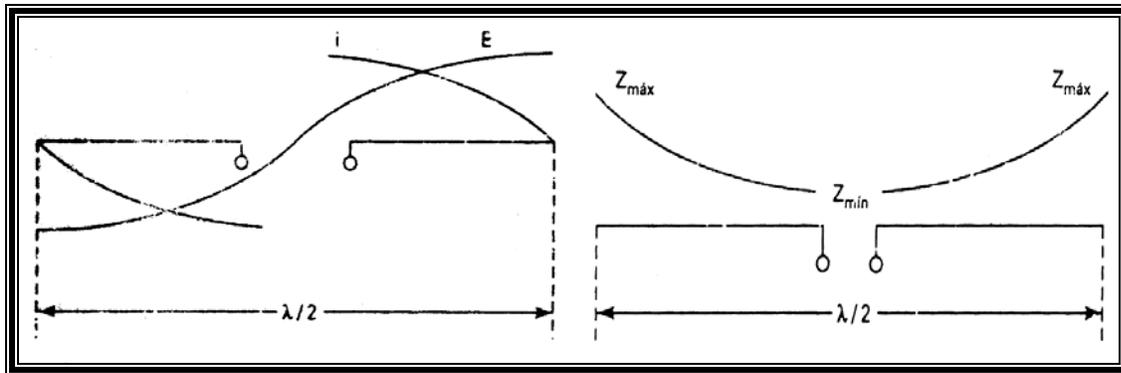
### 4.1 Antenas Omnidireccionales.

#### 4.1.1 Antena Hertz.

La antena más básica y sencilla probablemente sea la antena de media onda o "*antena Hertz*". Este tipo de dipolos de media onda es una clase de antena entre las más usadas

para frecuencias mayores de 2 MHz. El dipolo de media onda se conoce con el nombre de *antena Hertz* en honor a Heinrich Hertz, quien fue el primero en demostrar la existencia de las ondas electromagnéticas. [19]

Una antena Hertz es catalogada como una antena *resonante* las ondas estacionarias de voltaje y de corriente existen a lo largo de la misma. Esto esta formada por dos trozos de material conductor, cada uno de un cuarto de longitud de onda de largo y tiene circuito abierto en los extremos lejanos. A lo largo de una antena se desarrollan ondas estacionarias de voltaje y corriente. La figura 4.1a) muestra las distribuciones ideales de corriente y voltaje a lo largo de un dipolo de media onda. Cada polo de la antena se ve como si fuera un tramo de línea de transmisión de cuarto de onda. En donde habrá un máximo de voltaje y un mínimo de corriente en los extremos y un mínimo de voltaje y un máximo de corriente en la parte media. En consecuencia, suponiendo que el punto de alimentación esta en el centro de la antena, la impedancia de entrada es  $E_{min}/I_{max}$  y tiene valor mínimo. La impedancia en los extremos de la antena es  $E_{max}/I_{min}$  con un valor máximo [19]. La figura 4.1b) muestra la curva de impedancia en un dipolo de media onda alimentado en el centro.



Figuras 4.1 a) Distribuciones ideales de voltaje y corriente a lo largo de un dipolo de  $\frac{1}{2} \lambda$ . b) Curva de impedancia para un dipolo de  $\frac{1}{2} \lambda$  con alimentación central.

### 4.1.2 Antena Marconi

Una antena *monopolo* (un solo polo) de un cuarto de longitud de onda de largo, montada en dirección vertical con el extremo inferior conectado en forma directa al suelo o aterrizada a través de la red de acoplamiento de las antenas, se le llama *antena de Marconi*. Las características de esta antena con la antena Hertz son similares, a causa de las ondas reflejadas en el suelo. La figura 4.2) muestra las ondas estacionarias de corriente y voltaje para una antena de cuarto de onda aterrizada. Se ve que si se monta la antena Marconi en forma directa sobre la superficie terrestre, se combinan la antena real y su imagen produce exactamente las mismas distribuciones de ondas estacionarias que las de una antena de media onda no aterrizada (Hertz)

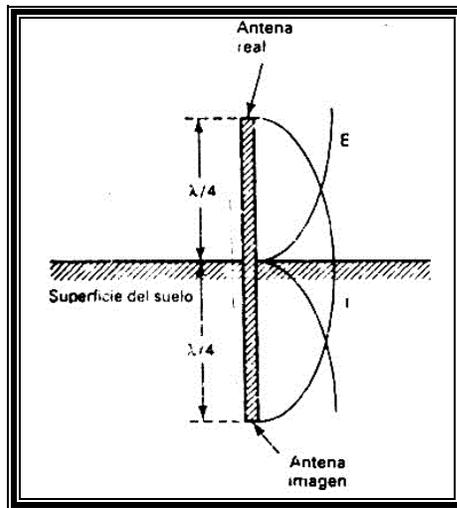


Figura 4.2 Antena aterrizada de cuarto de onda; ondas estacionarias de voltaje y corriente

## 4.2 Antenas Direccionales.

### 4.2.1 Antena Yagi-Uda.

Este tipo de antena es una antena direccional inventada por el Doctor Hidetsugu Yagi de la Universidad Imperial de Tohoku apoyado por el Doctor Shintaro Uda. Su invención consistía en retirar la tierra de las antenas convencionales, esto produjo que mediante

una estructura de una antena dipolo de media onda es posible lograr antenas que radien o reciban las ondas electromagnéticas en un haz estrecho, lo que permite concentrar en un punto toda la energía, logrando de esta manera que la intensidad de campo en un punto sea mucho mayor que la que se obtendría con otra antena de la misma potencia. [25]

Antena construida por varios elementos paralelos y coplanarios, directores, activos y reflectores, utilizada ampliamente en la recepción de señales televisivas. Los elementos directores dirigen el campo eléctrico, los activos radian el campo y los reflectores lo reflejan. La antena Yagi es un arreglo de antena, que como todos los arreglos, se han hecho con el objetivo de incrementar la directividad del sistema y concentrar la potencia radiada en un área más pequeña. Los elementos de esta antena son los siguientes: [26]  
[19]

*Elementos excitados* es un dipolo de media longitud de onda o alguna variación (dipolo doblado) este puede ser activo o excitado ya que esta conectado directamente a la línea de transmisión y reciben potencia de la fuente.

*Elementos parásitos* son un poco más largos y ligeramente más cortos que media longitud de onda, estos elementos parásitos se colocan en paralelo con y cerca de los elementos excitados; no se conectan a la línea de transmisión y reciben la energía a través de la inducción mutua. Estos elementos se clasifican en Reflectores y Directores.

*Reflector* es un elemento parásito que por lo regular es 5% más largo que el elemento excitado de media longitud de onda, esta espaciado del elemento excitado por  $0.15\lambda$  a  $0.25\lambda$ . Cuando la señal que radia el elemento excitado llega al reflector, induce un voltaje en el reflector y éste, a su vez, produce alguna radiación. Debido al espaciado la radiación del reflector esta casi en fase con la radiación del elemento excitado; en consecuencia la señal reflejada se suma a la señal del dipolo, creándose un haz más fuerte y más altamente enfocado en la dirección del elemento excitado. El reflector reduce la radiación a la derecha del elemento excitado y la refuerza a la izquierda del elemento excitado (figura 4.3). [7]

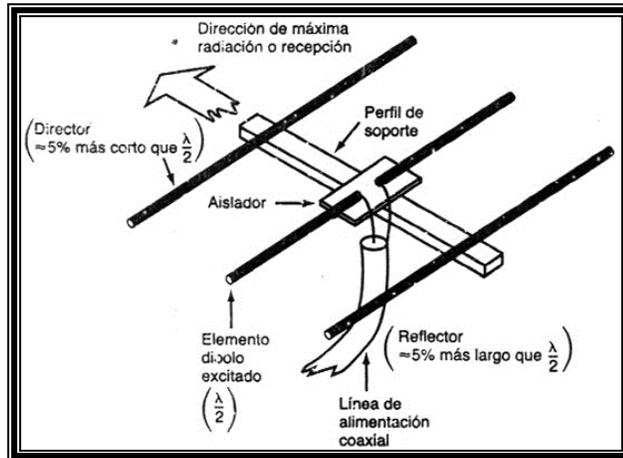


Figura 4.3 Antena Yagi-Uda

Otra elemento parásito es el director. Un director es más o menos 4% más corto que el elemento excitado de media longitud de onda, el cual se monta al frente del elemento excitado. Los directores se colocan al frente del elemento excitado y espaciados entre casi uno o dos decimos de longitud de onda del elemento excitado. La señal que radia dicho elemento causa un voltaje inducido en el director. Luego, la señal radiada por el director se suma en fase a la radiada por el elemento excitado. El resultado es un incremento de la señal enfocada, un ancho de haz más angosto y mayor ganancia de antena en la dirección del director.

Los elementos de la antena por lo común se hacen con tubo de aluminio y se montan en un miembro cruzado de aluminio o brazo. Como los centros de los elementos parásitos son eléctricamente neutrales, el brazo también puede conectarse al mástil de metal y a la tierra física. El ancho de banda de la antena yagi se puede incrementar utilizando más de un dipolo doblado, cada uno cortado a una longitud ligeramente distinta.

A mayor número de directores, mayor es la ganancia y más angosto es el ángulo de haz, la diferencia entre las antenas de banda ancha y las antenas de banda estrecha es que la superficie de los elementos es mayor en la de banda ancha, en las figuras 4.4, 4.5 y 4.6 podemos observar los tres tipos básicos de antenas yagi de banda estrecha, de banda ancha y multibanda respectivamente.

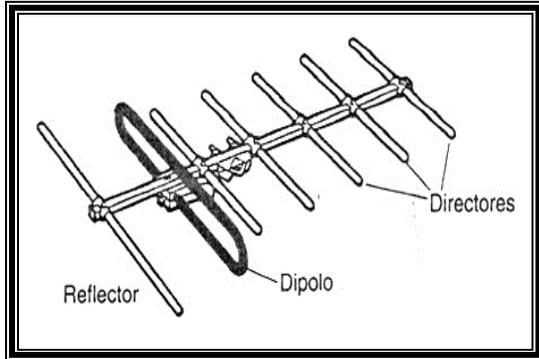


Figura 4.4 Antena Yagi-Uda de banda estrecha (un solo canal)

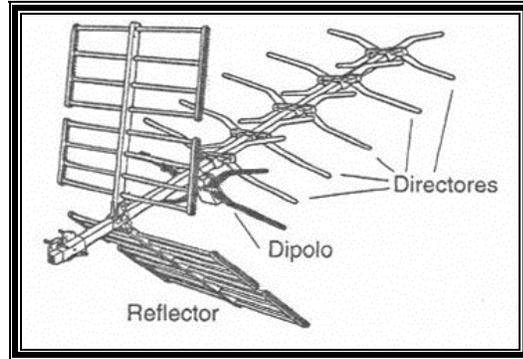


Figura 4.5 Antena Yagi-Uda de banda ancha.

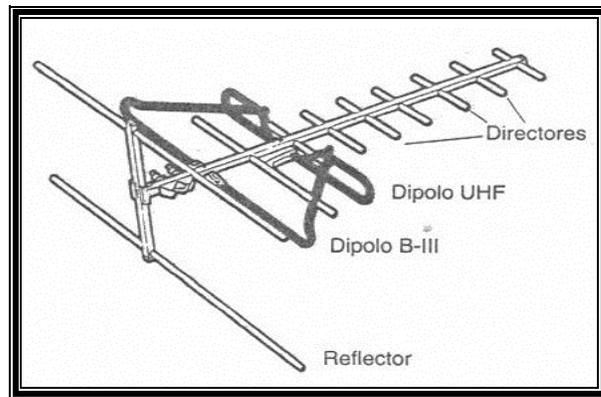


Figura 4.6 Antena Yagi-Uda multibanda (bandas III, IV y V)

#### 4.2.2. Antena Loop o de Lazo.

La antena de lazo forma otro tipo de antena, con características simplificadas, de bajo costo y versátil. La antena de lazo puede tener varias formas: *circular*, *triangular*, *cuadrada*, *elíptica*. Son ampliamente utilizadas en aplicaciones hasta para bandas de microondas (superior a  $\approx 3$  GHz). De hecho, a menudo son utilizados como campos electromagnéticos investigados en las bandas de microondas.

La antena de lazo es comúnmente clasificada como eléctricamente pequeña ( $C < 0.1\lambda$ ) y eléctricamente grande ( $C \sim \lambda$ ). Los lazos eléctricamente pequeños de vuelta sencilla

tienen muy pequeña resistencia de radiación. Su resistencia de radiación sin embargo puede ser sustancialmente mejorada añadiendo mas vueltas. Lazos de múltiples vueltas tienen mejor resistencia de radiación pero su eficiencia es todavía muy pobre. Por eso son utilizados principalmente como antenas de recepción, donde las pérdidas no son tan importantes. Las características de radiación de una antena de lazo pequeño pueden ser adicionalmente mejoradas insertando un núcleo ferromagnético. El radio receptor de transmisión AM es usualmente equipado con antenas de lazo de ferrita. Los lazos pequeños, independientemente de su forma, tiene un patrón de campo lejano muy similar al de un dipolo pequeño el cual es expresado debido a la equivalencia de un dipolo magnético y un pequeño lazo de corriente. Desde luego, la polarización de campo es ortogonal a la de un dipolo.

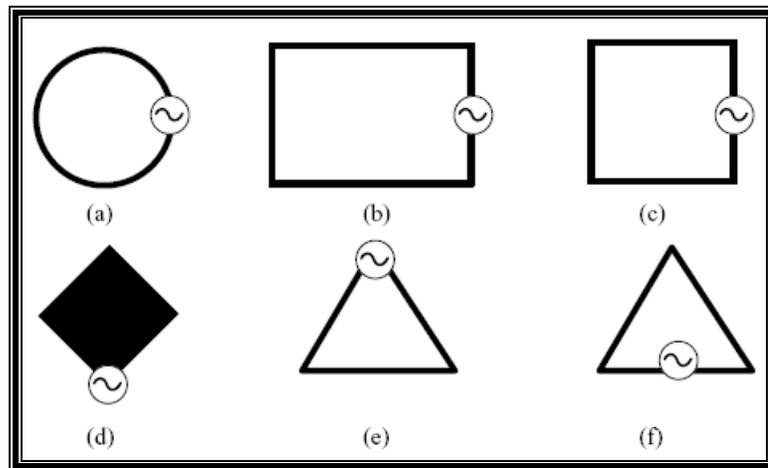


Figura 4.7 varias formas de lazo (a) antena loop circular, (b) antena loop rectangular, (c) antena loop de cuadro, (d) antena loop de cuadro con alimentación inferior, (e) antena loop de triangulo con alimentación superior, (f) antena loop de triangulo con alimentación en base

### 4.2.3 Antena Helicoidal.

Una antena helicoidal es ideal para aplicaciones donde se requiere radiar ondas electromagnéticas de polarización circular, más que de polarización horizontal o vertical. Una antena helicoidal se puede usar como antena de un solo elemento o se puede aplicar en dirección horizontal o vertical en un conjunto, para modificar su patrón

de radiación, aumentando la ganancia y disminuyendo el ancho de banda del lóbulo primario. Una antena helicoidal se monta en un plano de tierra formado por metal macizo o por una malla metálica como de tela de gallinero. Con una antena helicoidal hay dos modos de propagación: *normal* y *axial*. En el modo *normal*, la radiación electromagnética es en ángulo recto con el eje de la hélice y el diámetro de la hélice es muy pequeño comparado con la longitud de onda. En el modo *axial*, la radiación va en dirección axial y produce una distribución de banda ancha y relativamente direccional; cuando la circunferencia de la hélice es alrededor de una longitud de onda. Si la circunferencia aproximada de la hélice es un cuarto de onda, las ondas viajeras se propagan por las espiras de la hélice y radian una onda de polarización circular.

Es un tipo de antena que presenta un comportamiento de banda ancha. Una *hélice* es el resultado de bobinar un hilo conductor sobre un cilindro de diámetro constante. Los parámetros geométricos de diseño de una hélice son: su diámetro, la separación entre dos vueltas o paso de la hélice, el número de vueltas, el diámetro del hilo y el sentido del bobinado (a derechas o izquierdas). [19] En la figura 4.8 se muestra un esquema de la antena hélice de modo axial, con los parámetros de diseño. Debido a su alta directividad, polarización circular, ancho de banda amplio y dimensiones no críticas, la antena helicoidal de modo axial es ampliamente usada en aplicaciones espaciales. Fue inventada por John Kraus en 1946. [27]

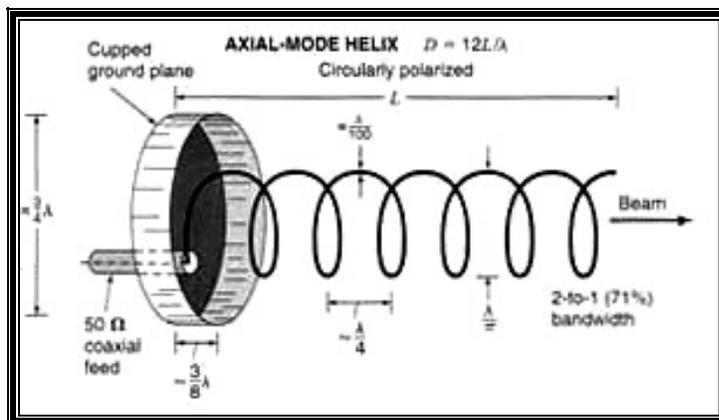


Figura 4.8 Antena de hélice de modo axial

Estas antenas son usadas normalmente en radios de comunicación portátiles en la banda VHF (30-150 MHz), con el fin de reducir el tamaño del radiador a longitudes apropiadas. Con una adecuada selección de parámetros, el dipolo helicoidal es una estructura de radiación eficiente, con un desempeño en eficiencia de radiación igual a los dipolos de media onda.

El diámetro de las espiras es igual a  $\lambda/3$  el paso del bobinado es igual a  $\lambda/4$  y la longitud depende del numero de espiras. Esta antena presenta ciertas particularidades: funciona para frecuencias que pueden llegar al 20% en más o menos de aquella para la que está prevista. Por otra parte, tiene la propiedad de emitir ondas sin polarización definida, es decir, que pueden ser captadas por una antena situada en cualquier posición en un plano vertical perpendicular a la dirección del emisor. Si se utiliza como antena receptora, recibirá indiferentemente ondas polarizadas verticalmente u horizontalmente. Generalmente se coloca delante de un reflector plano para darle una radiación unidireccional (figura 4.9).

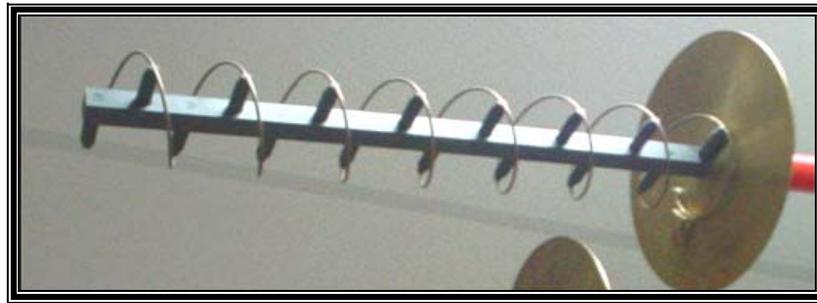


Figura 4.9 Antena Helicoidal

#### **4.2.4 Antena de Apertura.**

Las antenas de apertura son usadas normalmente en la región de las microondas (rango de Gigahertz). El término *apertura* proviene de la óptica y se aplica a las antenas donde la radiación sale hacia el espacio exterior a través de una embocadura. El ejemplo que mejor se ajusta a la definición es el de las bocinas cónicas y piramidales, en las que la

energía proveniente del transmisor, llega a la antena a través de una guía de onda (tubo metálico cerrado) que se expande en forma de embudo hasta la apertura radiante.

Para los *reflectores* también se puede definir una apertura plana en frente del mismo como *la superficie proyectada del casquete reflector que contiene los rayos reflejados*. Las antenas de apertura constituyen una larga clase de antenas, la cual emite ondas electromagnéticas mediante una abertura (o apertura). Estas antenas tienen una estrecha analogía en acústica: el megáfono y el micrófono parabólico. La pupila de un ojo humano es un típico receptor de apertura para la radiación óptica. Un radio y frecuencias de microondas, bocinas, apertura de guía de ondas y reflectores son ejemplos de antenas de apertura. Las antenas de apertura son comúnmente usadas para UHF y superior. Para que una antena de apertura sea eficiente y tenga una alta directividad, esta tiene que tener un área comparable o mayor a  $\lambda^2$ . Estas antenas serían no viables en frecuencias bajas. Otra característica positiva de las antenas de apertura es su valor real de la impedancia de entrada y la compatibilidad geométrica con los suministros de guía de ondas.

Los tipos más comunes de antenas de apertura son:

- ❖ Bocina.
- ❖ Reflector.
- ❖ Ranura.
- ❖ Lente.

El análisis de estas antenas (figura 4.10) se realiza a partir del conocimiento de los campos **E** y **H** del frente de onda que atraviesa la apertura. Estos campos se obtienen, en el caso de bocinas y ranuras, a partir de los modos que se propagan en su interior, mientras que para los reflectores y lentes se realiza habitualmente un trazado de rayos basado en óptica geométrica. El análisis se basa en la aplicación de los Principios de Equivalencia Electromagnética, que responden al siguiente planteamiento: si se conocen los campos en una superficie cerrada *S* que contiene todas las fuentes (corrientes reales de campo), se pueden definir unas corrientes eléctricas y magnéticas equivalentes a **H** y

**E** sobre la superficie  $S$ . A partir de dichas corrientes equivalentes se puede calcular el campo radiado fuera de dicha superficie, aplicando el potencial magnético retardado **A**, para las corrientes eléctricas.

Esta formulación es equivalente a la propuesta por Huygens en 1690 para analizar la difracción que sufre un haz de luz cuando atraviesa una apertura. Cuando un haz de luz incide sobre una apertura, cada punto del frente de onda en la apertura, actúa como una fuente secundaria de generación de ondas esféricas elementales, que se suman entre sí formando el haz de luz en zona lejana.

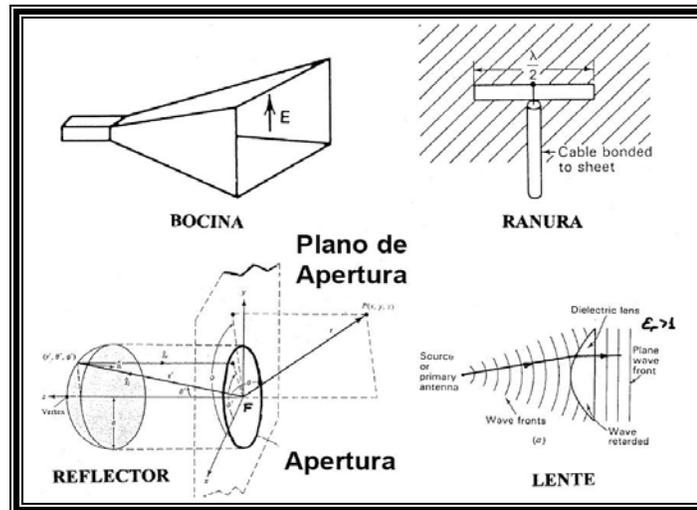
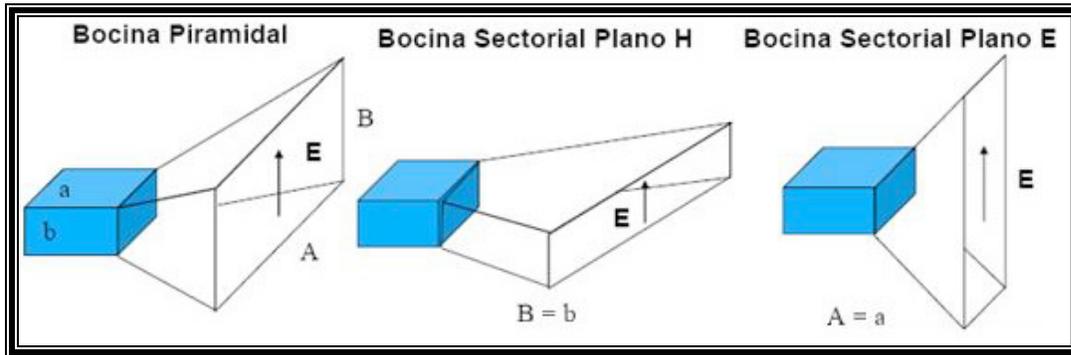


Figura 4.10 Antenas de apertura.

#### 4.2.4.1 Bocina Rectangular.

La bocina proporciona alta ganancia, bajo VSWR, relativamente amplio ancho de banda, bajo peso y son de fácil construcción [29]. La apertura de la bocina puede ser rectangular, circular o elíptica. Sin embargo, la bocina rectangular es ampliamente usada. Las 3 tipos básicos de antenas tipo bocina que utiliza una geometría rectangular es mostrada en la figura 4.11. [28]



4.11 Tipos de Antenas de Bocina

La bocina puede ser exponencialmente acampanada. Esto ofrece mejor equipamiento en una amplia banda de frecuencia, pero es tecnológicamente más difícil y costoso.

La bocina rectangular es perfectamente apropiada para alimentar guía de ondas rectangulares. La bocina actúa como una transición gradual de un modo de guía de onda a un modo de espacio libre de onda electromagnética. Cuando el alimentador es una guía de onda cilíndrica, la antena es usualmente una Bocina Cónica.

Estas bocinas son alimentadas por una guía de onda rectangular la cual tiene una amplia malla horizontal como se ilustra en la figura. Para la guía de onda dominante en modo de excitación, el Plano-E es vertical y el Plano-H es horizontal. Si la dimensión de la amplia malla de la bocina es acampanada con la estrecha malla de la guía de onda estando a la izquierda como esta, entonces es llamado una *antena bocina sectorial Plano-H* como lo muestra la figura. Si el acampanado ocurre solo en la dimensión del Plano-E, este es llamado una *antena bocina sectorial Plano-E*. Una antena bocina piramidal se obtiene cuando el acampanado ocurre justo entre las dimensiones. La bocina básicamente actúa como una transición del modo guía de onda para el modo espacio libre y esta transición reduce las ondas reflejadas y enfatiza el trayecto de las ondas que conducen a la baja VSWR y amplio ancho de banda [29]. La antena bocina es ampliamente utilizada como un elemento para alimentar una grande radioastronomía, rastreo satelital y servicios de comunicación.

#### **4.2.4.2 Antena Reflector Parabólico.**

Existen muchos tipos de antenas terrestres para comunicaciones con satélites, estas dependen del tipo de estaciones terrena, la cual comprende desde los *centros internacionales de tráfico alto* (antenas de hasta 32 mts), pasando por los receptores domésticos de televisión (antenas de entre 3 y 0.5 mts), hasta pequeñas terminales de comunicación de datos (antenas de hasta 0.6 mts) [30].

Una antena terrestre se instala generalmente sobre la tierra firme, aunque puede instalarse sobre un barco o incluso un avión (servicios aeronáuticos). Todo ello hace que existan multitud de tipos de antenas terrestres con sus distintos mecanismos. Las antenas reflectoras, de una forma u otra han sido usadas desde el descubrimiento de la propagación de las ondas electromagnéticas por Hertz. Sin embargo el analizar y diseñar reflectores de varias formas geométricas no surgió hasta los días de la segunda guerra mundial cuando evolucionaron las aplicaciones de radar.

Las antenas de alta ganancia son necesarias para las comunicaciones de radio a larga distancia (enlaces satelitales), radares de alta resolución, radioastronomía, etc. El sistema de reflector es probablemente el más ampliamente utilizado para antenas de alta ganancia. Pueden fácilmente lograr ganancias de 30 dB para frecuencias de microondas y superior.

El más simple reflector de antena consta de dos componentes: una superficie reflectora y muchas antenas de alimentación pequeñas, que a menudo está situado en los reflectores de punto focal. Construcciones que son más complejos implican un reflector secundario (un subreflector) en el punto focal, que es iluminado por un alimentador primario. Esta es llamada doble reflector de antena. El reflector más popular es el parabólico. Otros reflectores con frecuencia en la práctica son reunidos como: reflector cilíndrico, reflector angular, reflector esférico y otros más.

El esquema de una antena reflectora básica se muestra en la figura 4.12 donde se observa la bocina alimentadora con su diagrama primario de iluminación y un reflector

parabólico que genera el diagrama secundario a partir del campo que proyecta en la apertura.

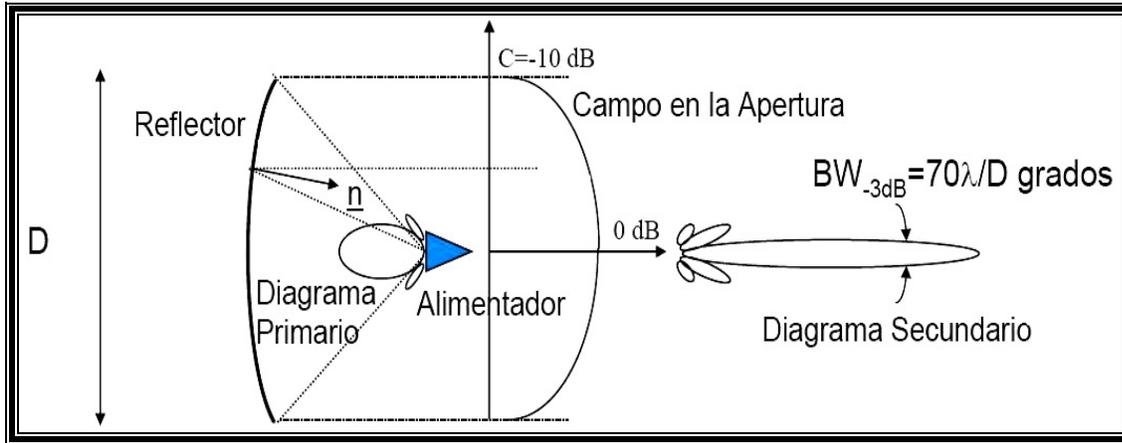


Figura 4.12: Esquema del Reflector Parabólico.

Existen distintas técnicas para analizar la radiación de estas antenas. Las más utilizadas son: [5]

- ❖ Óptica Física (**PO**): calcula los campos de radiación a partir de las corrientes inducidas sobre la superficie reflectoras iluminadas. La validez de sus resultados es similar a la Óptica Geométrica.
- ❖ Óptica Geométrica (**GO**): permite calcular los campos en la apertura basándose en la ley de Snell, y a partir de ellos los campos lejanos. Constituye una buena y sencilla aproximación para calcular el lóbulo principal (incluida la ganancia) y los primeros lóbulos secundarios. La técnica de rayos que se va a presentar se basa en esta técnica de óptica geométrica.
- ❖ Teoría Geométrica de la Difracción (**GTD**): incluye los rayos difractados en los bordes de las superficies reflectoras. Da buenos resultados para los lóbulos alejados del principal, incluyendo los posteriores. de modo que constituye un complemento de las anteriores técnicas cuando se requiere una caracterización detallada de todo el diagrama de radiación.

Básicamente una antena parabólica consiste en dos partes principales: un *reflector parabólico* y el elemento activo, llamado *mecanismo de alimentación*. [19] En esencia, el mecanismo de alimentación encierra la antena primaria que normalmente es un dipolo o una red de dipolos; la antena radia ondas electromagnéticas hacia el reflector. El reflector es un dispositivo pasivo que tan solo refleja la energía que le llega del mecanismo de alimentación. La reflexión produce una emisión muy concentrada y muy direccional, en la que todas las ondas individuales están en fase entre sí y por consiguiente un frente de onda en fase.

#### 4.2.4.2.1 Reflectores Parabólicos.

*Reflectores parabólicos*: es probable que el reflector parabólico sea el componente más fundamental de una antena parabólica. Los reflectores parabólicos se asemejan en forma a un plato a una fuente y en consecuencia se les llama a veces antenas de *plato parabólico* o simplemente *antena de plato*. La geometría de una parábola es una curva en el plano que se describe matemáticamente como  $y = ax^2$ , y se define como el lugar geométrico de un punto que se mueve en forma tal que su distancia a otro punto (llamado *foco*), sumada a su distancia a una recta (llamada *directriz*) es una longitud constante. La figura 4.13 muestra la geometría de una parábola cuyo foco está en el punto  $F$  y cuyo eje es la recta  $XY$ . Para la parábola que se ve en la figura 4.13 existen las siguientes relaciones: [19]

$FA + AA' = FB + BB' = FC + CC' = k$  (una longitud constante) y además;

- $FX$  = distancia focal de la parábola (mts),
- $k$  = una constante para una parábola dada (mts),
- $WZ$  = longitud de la directriz (mts).

La relación de la distancia focal al diámetro de la boca de la parábola ( $FX/WZ$ ) se llama *relación de abertura de parábola*. Un reflector parabólico se obtiene al girar la parábola en torno al eje  $XY$ . El plato de superficie curva que resulta se llama *paraboloide*. El

reflector detrás del bulbo de una lámpara sorda o del faro de un coche tiene forma paraboloides para concentrar la luz en determinada dirección.

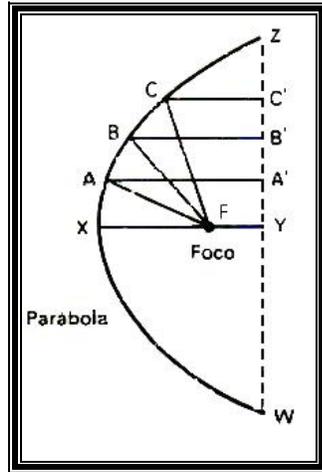


Figura 4.13 Geometría de una Parábola.

Una antena parabólica consiste en un reflector paraboloides iluminado por energía de microondas radiada por un sistema alimentador ubicado en el foco. Si la energía electromagnética se radia del foco hacia el reflector parabólico, todas las ondas radiadas recorrerán la misma distancia cuando lleguen a la directriz o recta *WZ*. En consecuencia, la radiación se concentra a lo largo del eje *XY* y hay anulación en otras direcciones. Un reflector parabólico que se use para recibir la energía electromagnética se comporta exactamente igual. Así una antena parabólica posee el *principio de reciprocidad* y funciona por igual como antena receptora para ondas que lleguen en la dirección *XY*. Los rayos recibidos de todas las demás direcciones se anulan en ese punto.

No es necesario que el plato tenga superficie metálica maciza para reflejar o recibir las señales con eficiencia ya que la superficie puede ser de malla, que refleja casi tanta energía como superficie maciza, siempre que el ancho de las aberturas sea menor que 0.1 por la longitud de onda, si se usa una malla en lugar de un conductor macizo reduciríamos en peso del reflector; además que los reflectores de malla son mas fáciles de ajustar, se afectan menos por el viento y en general se obtiene con ellos una estructura mas estable.

#### 4.2.4.2.2 Mecanismos alimentadores.

El mecanismo de alimentación en una antena parabólica es el que radia en realidad la energía electromagnética y por eso se le llama *antena primaria*. Este mecanismo de alimentación es de importancia básica, por que su función es radiar la energía hacia el reflector. Un mecanismo ideal es de alimentación debería dirigir toda su energía hacia el reflector parabólico, sin tener efecto de sombra. En la práctica es imposible lograrlo aunque si se tiene cuidado al diseñarlo, la mayor parte de la energía se puede radiar con la dirección adecuada y se puede reducir la sombra al mínimo. Hay tres tipos principales de antenas parabólicas: *alimentación central*, *alimentación cónica* y *alimentación de Cassegrain*. [19]

##### 4.2.4.2.2.1 Alimentación central.

El diagrama de un reflector paraboloide alimentado en el centro con un reflector esférico adicional como se muestra en la figura 4.14.

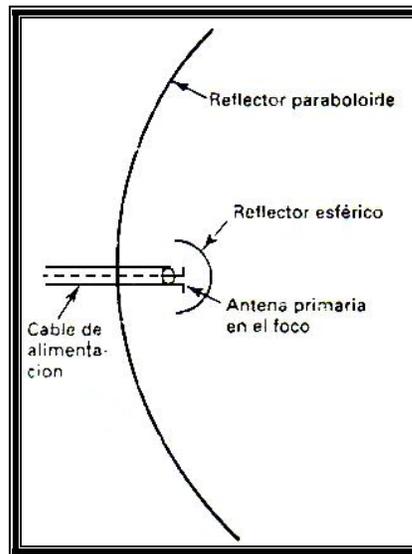


Figura 4.14 Antena Parabólica con alimentación central

La antena primaria se coloca en el foco. La energía radiada hacia el reflector se refleja hacia afuera, en forma de un haz concentrado. Sin embargo, la energía que no refleja el

paraboloide se reparte en todas direcciones y tiene la tendencia a perturbar la distribución general de la radiación. El reflector esférico redirige esas emisiones hacia atrás, hacia el reflector parabólico donde se vuelven a reflejar en la dirección correcta. Aunque el reflector esférico adicional contribuye a concentrar más energía en la dirección deseada, también tiene la tendencia de bloquear algunas de las reflexiones iniciales. En consecuencia la ventaja que logra se anula algo debido a su propio efecto de sombra y su eficiencia general solo es un poco mejor que cuando no se agrega el reflector esférico.

#### **4.2.4.2.2 Alimentación cónica o por bocina.**

La figura 4.15 muestra el diagrama de un reflector parabólico que usa alimentación por bocina o cuerno. Con un mecanismo de alimentación por bocina, la antena primaria es una antena pequeña cónica o de embudo y no un dipolo simple o una red de dipolos. La bocina no es más que un material abocardado de guía de ondas, que se coloca en el foco y radia una distribución algo direccional, hacia el reflector parabólico. Cuando un campo electromagnético que se propaga llega a la boca del cuerno, continúa propagándose en la misma dirección general y se reparte en dirección lateral y al final, el frente de onda se hace esférico. La estructura cónica puede tener varias formas diferentes, como se ve en la figura 4.11: sectorial (abocinado solo en una dirección), piramidal o cónica. Como en la alimentación central, una alimentación cónica representa cierta obstrucción a las ondas que se reflejan del plato parabólico.

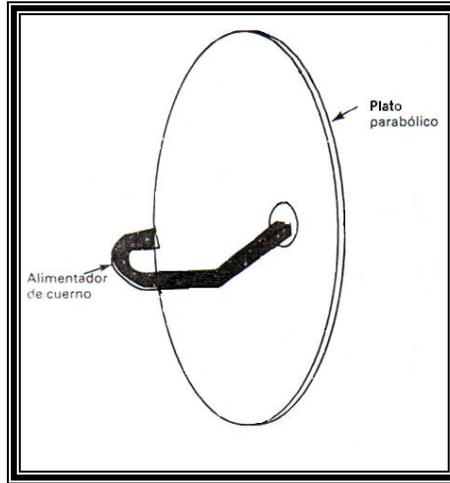


Figura 4.15 Antena Parabólica con alimentador por cuerno.

#### 4.2.4.2.3 Alimentación de Cassegrain.

Esta alimentación recibe el apellido de un astrónomo del siglo XVIII y evoluciono en forma directa los telescopios astronómicos ópticos. La figura 4.16 muestra la geometría básica de un mecanismo de alimentación de Cassegrain. La fuente de radiación primaria esta en o junto atrás de una pequeña abertura en el vértice del paraboloide y no en el foco. La antena primaria se apunta hacia un pequeño reflector secundario (*subreflector Cassegrain*) que esta entre el vértice y el foco.

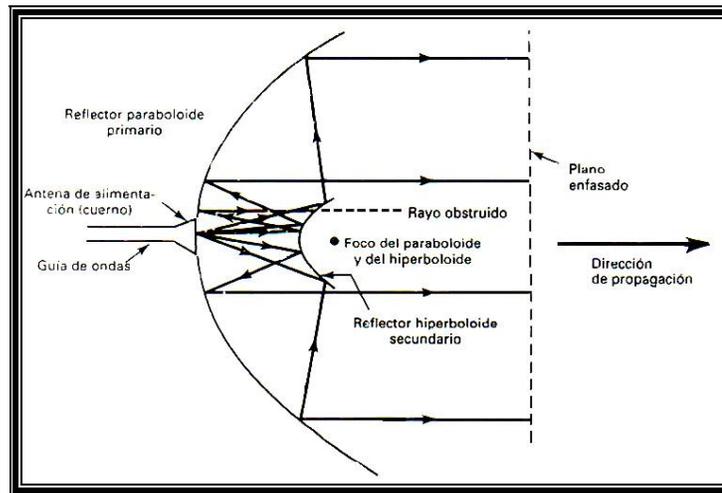


Figura 4.16 Antena Parabólica con alimentación de Cassegrain.

Los rayos emitidos por la antena primaria se reflejan en el subreflector de Cassegrain y a continuación iluminan el reflector parabólico principal como si se hubieran originado en el foco. Los rayos son colimados por el reflector parabólico de la misma forma que en los mecanismos de alimentación central y por bocina. El subreflector debe tener curvatura hiperbólica para reflejar los rayos de la antena primaria en tal forma que funcione como una *fente virtual* en el foco del paraboloide.

La alimentación de Cassegrain se suele usar para recibir señales extremadamente débiles o cuando se requieren líneas de transmisión o tramos de guías de onda extremadamente largas y es necesario colocar preamplificadores de bajo ruido tan cerca de la antena como sea posible. Con la alimentación de Cassegrain, los preamplificadores se pueden instalar justo antes del mecanismo de alimentación, sin obstruir las ondas reflejadas.

#### 4.2.4.3 Antena de Ranura.

Una ranura es un corte en un conductor metálico que se alimenta conectando en sus bordes una línea de transmisión bifilar o coaxial, o bien mediante una cavidad (figura 4.17). Puede parecer paradójico que una ranura u orificio pueda funcionar como antena. Sin embargo, cuando se tiene una guía de onda, una ranura de media longitud de onda se comporta exactamente como un dipolo de media onda. Combinando de manera adecuada varias de estas ranuras se puede obtener diferentes patrones de radiación, incluyendo antenas sectoriales de 180 grados o inclusive omnidireccionales. Las antenas de ranura o Slot son ampliamente utilizadas en aeronaves y aplicaciones del radar. La antena de ranura básica es una  $\frac{1}{2}$  onda de ranura corta en una conducción de lamina de metal.



Figura 4.17 Antena de Ranura.

El punto de alimentación esta a través del centro de la ranura y este esta balanceado. La impedancia de alimentación es alta, normalmente varios centenares de Ohms. Las ranuras se pueden alimentar a través de guías de onda. Las ranuras normalmente interrumpen el paso de las corrientes siendo el acoplamiento entre la guía y la ranura proporcional a dicho efecto. Otra forma de alimentación de ranuras es a través de líneas microstrip (figura 4.18). La ranura se sitúa en el plano de masa y la línea tiene un circuito abierto a una distancia  $\lambda/4$  de la ranura.

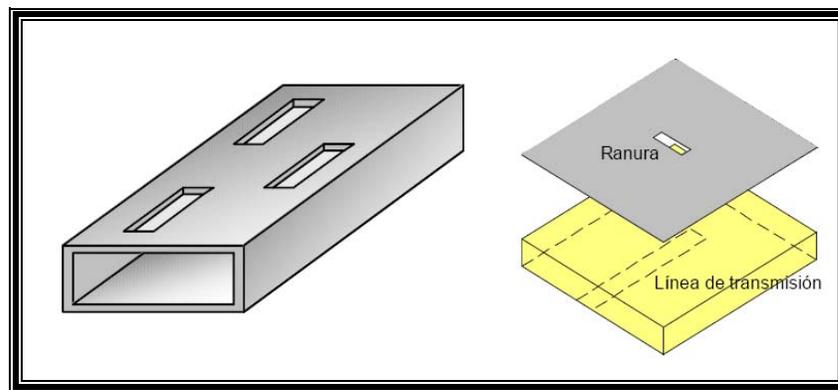


Figura 4.18 Tipo de Ranuras.

#### 4.2.4.4 Antena de Lentes.

El concepto principal de las antenas de lentes esta basado en la *Geometría Óptica* (leyes de Snell-Descartes, conservación de la energía dentro de un tubo de haz, longitud de trayectoria óptica). Se han enunciado desde la década de los 1950's-1960's. es por ello que encontramos descripciones mas detalladas de estos dispositivos en viajes referencias [34-38], y en una tesis escrita por J. Lee [39] en 1989. Las lentes, al igual que los reflectores son un método para conseguir grandes superficies radiantes con campos en fase. El principio de funcionamiento de las lentes consiste en *hacer viajar la radiación por un medio que iguale los caminos eléctricos y produzca un frente de onda plano a partir de uno esférico* (figura 4.19).

Las lentes no tienen bloqueo de la apertura por el alimentador, como ocurre en los reflectores, pero tienen pérdidas por reflexiones en las superficies y son relativamente

pesadas y voluminosas. La principal ventaja de las lentes frente a los reflectores parabólicos es que la capacidad de exploración por desplazamiento del alimentador fuera del foco es mayor. A las frecuencias de microondas los medios naturales homogéneos siempre tienen un índice de refracción  $n > 1$ , es decir, una velocidad de fase menor que la de la luz en el vacío. Esto provoca que las lentes tengan que ser convexas. Sin embargo se pueden conseguir medios artificiales en los que un índice de refracción sea  $n < 1$ , en concreto se utilizan guías de onda para realizar lentes cóncavas.

Los tipos de lentes más usadas en aplicaciones de satélites son las de *guías de onda*, *TEM* y *dieléctricas*. Las lentes de guías de onda están limitadas a anchos de banda estrechos debido a que son medios dispersivos. Las lentes TEM (*MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE TRANSMISIÓN*; *TEM*, por sus siglas en inglés) tienen un ancho de banda mayor, pero son más pesadas. Las lentes dieléctricas son las más pesadas de todas y de mayor ancho de banda. En altas frecuencias, donde el tamaño de las lentes es menor, las lentes dieléctricas son un candidato viable. Normalmente se suelen utilizar lentes escalonadas (*Zoned lenses*) (figura 4.20) por ser menos pesadas y voluminosas.

Las lentes dieléctricas reducen su ancho de banda al ser escalonadas, mientras que las lentes de guías de onda escalonadas mejoran su ancho de banda. El tamaño de una lente viene determinado por su relación foco-diámetro ( $f/D$ ). El diámetro viene determinado por los requerimientos de ganancia y ancho de haz. Cuanto mayor sea la distancia focal ( $f$ ), mejor capacidad de exploración por desplazamiento del alimentador.

Las deformaciones de la superficie son debidas a las tolerancias de fabricación y a los efectos térmicos en el espacio. Las desviaciones de la superficie de la lente respecto a su forma ideal pueden causar pérdidas de ganancia y una degradación del diagrama de radiación. La deformación de la superficie de la lente se traduce en errores de fase del campo en la apertura. La tolerancia permisible en una primera aproximación puede ser relacionada con las máximas irregularidades de fase permisibles en la apertura formada por la lente.



Figura 4.19 Lente de Antena

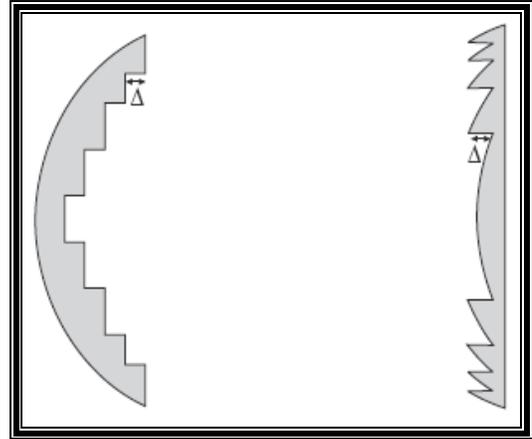


Figura 4.20 Lente Escalonada (*Zoned lenses*)

Para diseñar una buena antena de lente es necesario adaptar la superficie de la lente para reducir los efectos de las reflexiones. Las técnicas de adaptación son las mismas utilizadas en microondas, pero adaptadas a lentes. Se utilizan tres técnicas de adaptación:

- ❖ Adaptación con capa de cuarto de onda.
- ❖ Transformador de impedancias con múltiples capas de cuarto de onda.
- ❖ Placas de dieléctrico artificial de cuarto de onda.

La primera técnica proporciona adaptación a una sola frecuencia, mientras que las otras dos proporcionan un mayor ancho de banda. Los problemas con la primera y segunda técnica son la falta de materiales con el índice de refracción adecuado y las dificultades de fabricación. La tercera técnica requiere que la superficie del dieléctrico esté ranurada para dar el efecto equivalente de adaptación.

La clave de un buen diseño está en el equilibrio de los siguientes parámetros:

- ❖ Tipos de lentes: la mayoría de las lentes usadas para aplicaciones de los satélites son guía onda, TEM y dieléctricos.

- ❖ Dimensiones: viene definida por la relación  $f/D$ , siendo  $f$  la distancia focal y  $D$  el diámetro.
- ❖ Formas de superficie de lente: las superficies convencionales son planas, esféricas o paraboloideas.
- ❖ Tolerancias de la superficie: las desviaciones de la superficie de la lente causan pérdidas de ganancia y degradación del patrón.

#### 4.2.5. Antenas Patch o Microstrip.

En su forma más básica, una antena Patch consiste de un parche radiante sobre un lado de un sustrato dieléctrico el cual tiene un plano a tierra en el otro lado como muestra la figura (4.21). El patch es generalmente hecho de material de conducción tal como cobre u oro y puede tomar cualquier forma posible. El parche radiante y las líneas de alimentación son usualmente foto grabadas sobre el sustrato dieléctrico.

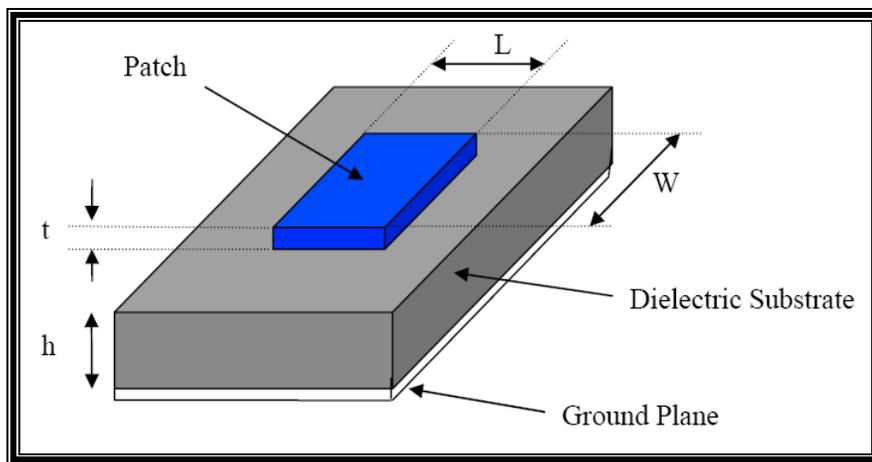


Figura 4.21 Estructura de una Antena Patch Microstrip.

A fin de simplificar el análisis y predicción del desempeño, el patch es generalmente cuadrado, rectangular, circular, triangular, elíptico o algunas otras formas comunes como lo muestra la figura 4.22. Para un patch rectangular, la longitud  $L$  de el patch es usualmente de  $0.3333 \lambda_o < L < 0.5 \lambda_o$ , donde  $\lambda_o$  es la longitud de onda en el espacio libre. El patch es seleccionado para ser muy delgado que  $t \ll \lambda_o$  (donde  $t$  es el grosor del

patch). La altura  $h$  de el substrato dieléctrico es comúnmente  $0.003 \lambda_o \leq h \leq 0.05 \lambda_o$ . La constante dieléctrica del substrato ( $\epsilon_r$ ) esta normalmente en el rango  $2.2 \leq \epsilon_r \leq 12$ .

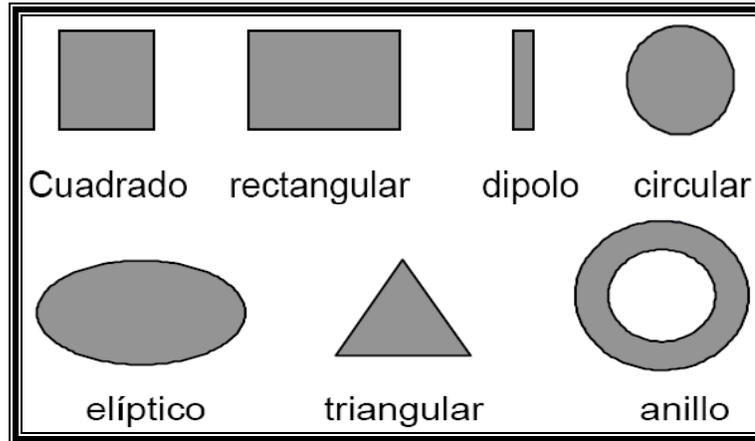


Figura 4.22. Formas comunes de Antenas Patch.

Las antenas Microstrip Patch radian principalmente a causa de la limítrofe entre el borde del patch y el plano de tierra. Para un buen funcionamiento de la antena, un substrato dieléctrico grueso que tiene una constante dieléctrica baja es deseable desde que esto proporciona mejor eficiencia, mayor ancho de banda y mejor radiación. [3] Sin embargo, tal configuración lleva a un tamaño más grande de la antena. Para diseñar una antena compacta de Microstrip Patch, las constantes dieléctricas mas altas deben ser utilizadas que es menos eficiente y tiene como resultado un estrecho ancho de banda. Por lo tanto un compromiso debe ser alcanzado entre las dimensiones de la antena y el desempeño de la antena.

#### 4.2.5.1 Ventajas y Desventajas de las Antenas Microstrip Patch.

Las antenas Microstrip Patch esta aumentando en la popularidad para el uso en aplicaciones inalámbricas debido a su discreta estructura. Por lo tanto son extremadamente compatibles para antenas incrustadas en dispositivos inalámbricos como teléfonos celulares, Bip (buscapersonas) etc. Las antenas de la telemetría y comunicación en misiles necesitan ser delgadas y son a menudo las Antenas Microstrip

Patch. Otra área donde han sido utilizados esta exitosamente en la comunicación satelital. Algunos de sus principales ventajas discutidas por Balanis, [3] Kumar y Ray [32] se dan enseguida:

- ❖ Peso ligero y bajo volumen.
- ❖ Bajo perfil de configuración plana que pueden ser hecha fácilmente en conformación a la superficie del host.
- ❖ Bajo costo de fabricación, por lo tanto pueden ser fabricados en grandes cantidades.
- ❖ Soporta ambas, la polarización lineal así como circular.
- ❖ Puede ser fácilmente integrado con Microwave Integrated Circuits (MICs).
- ❖ Capaz de operar en dobles y triples frecuencias.
- ❖ Mecánicamente robusto cuando se montan sobre superficies rígidas.

Las antenas Microstrip Patch sufren de una serie de desventajas en comparación con las antenas convencionales. Algunas de sus mayores desventajas discutidas por Kumar [32] y Garg Et Al [33] son las siguientes:

- ❖ Estrecho ancho de banda.
- ❖ Baja eficiencia.
- ❖ Baja ganancia.
- ❖ Radiación extraordinaria de alimentadores y de empalmes.
- ❖ Capacidad de baja potencia de manejo.
- ❖ Excitación de superficie de onda.

Las antenas Microstrip Patch tienen un factor muy alto de calidad de antena ( $Q$ ).  $Q$  representa las pérdidas asociadas con la antena y una grande  $Q$  conduce a estrecho ancho de banda y baja eficiencia.  $Q$  puede ser reducida aumentando el espesor del substrato dieléctrico. Pero como el espesor aumenta, una fracción creciente de la potencia total entregado por la fuente entra en una superficie de onda. Esta contribución de superficie de onda puede ser contada como una pérdida de potencia no deseada desde que

últimamente es dispersada en las curvas dieléctricas y causa la degradación de las características de la antena.

#### 4.2.5.2 Técnicas de Alimentación.

Las antenas Microstrip Patch pueden ser alimentadas por varios métodos. Estos métodos pueden clasificarse en dos categorías *comunicado* y *no-comunicado*. En el método *comunicado*, la potencia de RF es alimentada directamente al patch de radiación utilizando una conexión como un elemento línea microstrip. En el diseño *no-comunicado*, el acoplamiento de campo magnético se hace para transferir la energía entre la línea microstrip y el patch de radiación [3]. Las cuatro técnicas de alimentación más populares utilizadas son; *la línea microstrip, sonda coaxial, acoplamiento de apertura y acoplamiento de proximidad*.

##### 4.2.5.2.1 Alimentación de línea Microstrip.

En este tipo de técnica de alimentación, una tira conductora está conectada directamente al borde del microstrip patch como muestra la Figura 4.23. La tira conductora es más pequeña en anchura comparada al patch y este tipo de arreglo de alimentación tiene la ventaja que la alimentación puede ser grabado sobre el mismo sustrato para proporcionar una estructura plana.

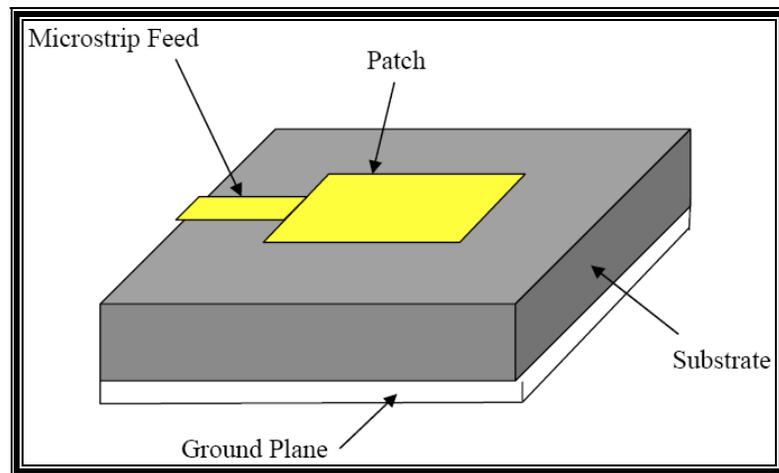


Figura 4.23 Alimentación línea Microstrip.

El propósito del corte en el recuadro sobre el patch es para igualar la impedancia de la línea de alimentación para el patch sin la necesidad de algún elemento de comparación adicional. Esto es logrado por controlar adecuadamente la posición del recuadro. Por lo tanto este es un fácil diseño de alimentación. Donde proporcionan la facilidad de fabricación y sencillez en el modelado así como también la impedancia igualada. Sin embargo como el espesor del substrato dieléctrico es utilizado, incrementando, la onda superficial y la radiación falsa de alimentación también aumentados, el cual obstaculiza el ancho de banda de la antena [3]. La radiación de alimentación también conduce a indeseable cruce de radiación de polarización.

#### **4.2.5.2.2 Alimentación Coaxial.**

La alimentación coaxial o sonda de alimentación es una técnica muy común utilizada para la alimentación de antenas Microstrip Patch. Como vemos en la figura 4.24. El conductor interior del conector coaxial esparcido dentro del dieléctrico y esta soldado a el patch de radiación, mientras el conductor exterior esta conectado a tierra.

La principal ventaja de este tipo de diseño de alimentación es que la alimentación puede ser colocada en cualquier posición deseada dentro del patch en orden para compararse con la impedancia de entrada. Este método de alimentación es fácil de fabricar y tiene baja radiación engañosa. Sin embargo, su mayor desventaja es que proporciona estrecha banda ancha y es difícil de modelar desde un agujero tiene que ser perforado en el substrato y el conector sobresale de la placa.

De esa manera no hacerlo completamente plano para substratos gruesos ( $h > 0.02 \lambda_0$ ). Además, para substratos más gruesos, la sonda incrementa su longitud haciendo la impedancia de entrada más inductiva, llevando a problemas iguales [32]. Esto es visto arriba para un substrato dieléctrico grueso, el cual proporciona amplio ancho de banda, la línea de alimentación microstrip y la alimentación coaxial sufren de numerosas desventajas.

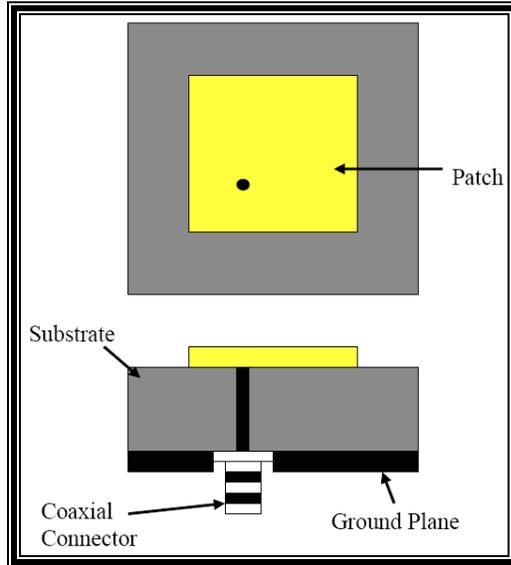


Figura 4.24 Sonda de alimentación rectangular.

#### 4.2.5.2.3 Alimentación por Acoplamiento de Apertura.

En este tipo de técnica de alimentación, la radiación Patch y la línea de alimentación microstrip están separadas por un plano a tierra como lo muestra la figura 4.25. El acoplamiento entre el patch y la línea de alimentación es hecho por una ranura o una abertura en el plano a tierra.

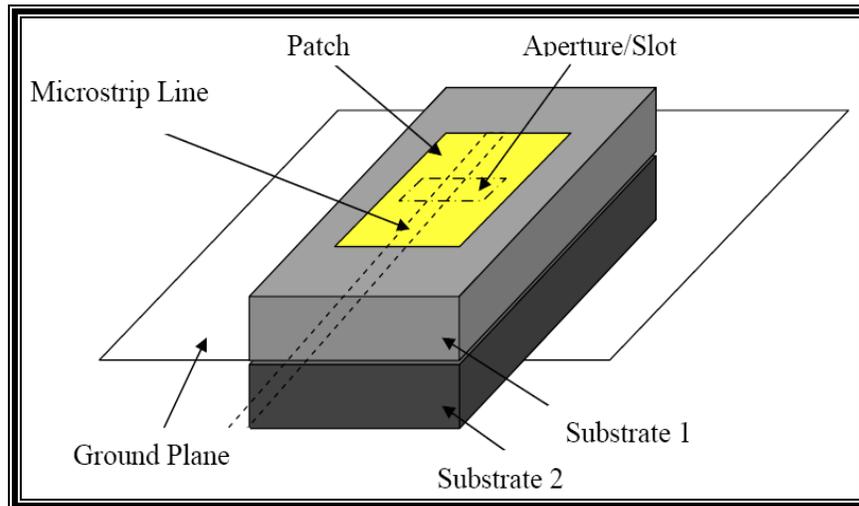


Figura 4.25 Alimentación por Acoplamiento de Apertura.

El acoplamiento de apertura es usualmente centrado debajo del patch, llevando a reducir la polarización cruzada debido a la simetría de la configuración. La cantidad de acoplamiento desde la línea de alimentación al patch esta determinado por la forma, tamaño y localización de la apertura. Desde la placa separada el patch y la línea de alimentación, la radiación engañosa es minimizada. Generalmente, un alto material dieléctrico es utilizado por la parte inferior del substrato y un grueso, la baja contante de material dieléctrico es utilizada por la parte superior del substrato para optimizar la radiación del patch [3]. La principal desventaja de esta técnica de alimentación es que es difícil para fabricar debido a sus múltiples capas, el cual también aumenta el espesor de la antena. Este diseño de alimentación también proporciona estrecho ancho de banda.

#### **4.2.5.2.4 Alimentación de acoplamiento de proximidad.**

Este tipo de técnica de alimentación es también llamado como *diseño de acoplamiento electromagnético*. Como lo muestran en la figura 4.26. Dos substratos dieléctricos son utilizados tanto en la línea de alimentación entre los dos substratos y el patch radiante esta en la parte superior del substrato. La principal ventaja de esta técnica de alimentación es que elimina alimentación engañosa de radiación y proporciona ancho de banda muy alto (tan alta como 13%) [3], debido a el incremento total en el grosor de la antena Microstrip Patch. Este diseño también proporciona opciones entre dos medios dieléctricos diferentes, uno por el patch y otro por la línea de alimentación para optimizar el rendimiento individual.

La principal desventaja de esta técnica de alimentación es que es difícil para fabricar porque de las dos capas dieléctricas las cuales necesitan una alienación apropiada. Además, hay un aumento en el espesor general de la antena.

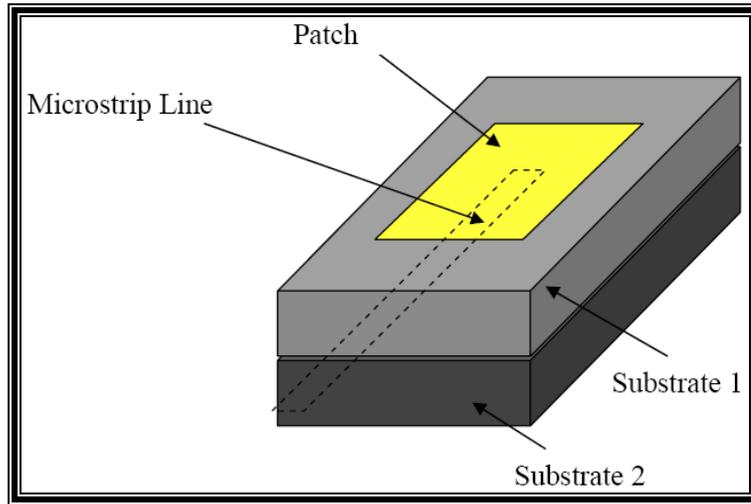


Figura 4.26 Alimentación de acoplamiento de proximidad.

La tabla 4.1 que resume las características de las diferentes técnicas de alimentación para antenas Microstrip Patch.

CARACTERÍSTICAS	LÍNEA DE ALIMENTACIÓN MICROSTRIP	ALIMENTACIÓN COAXIAL	ALIMENTACIÓN POR ACOPLAMIENTO DE APERTURA	ALIMENTACIÓN DE ACOPLAMIENTO DE PROXIMIDAD
ALIMENTACIÓN DE RADIACIÓN ENGAÑOSA	MAS	MAS	MENOS	MÍNIMO
CONFIABILIDAD	MEJOR	POBRE DEBIDO A SOLDADURA	BUENO	BUENO
FÁCIL FABRICACIÓN	FÁCIL	SOLDADURA Y PERFORACIÓN NECESARIA	ALINEACIÓN NECESARIA	ALINEACIÓN NECESARIA
COMPARACIÓN DE IMPEDANCIA	FÁCIL	FÁCIL	FÁCIL	FÁCIL
ANCHO DE BANDA (lograda con la comparación de impedancia)	2-5%	2-5%	2-5%	13%

Tabla 4.1 Técnicas de alimentación para antenas Microstrip Patch.

# Capítulo V

## Introducción a las Antenas Inteligentes.

---

---

### 5.1 Introducción.

En la pasada década, la tecnología wireless ha crecido en una formidable proporción, por esta razón se esta creando nuevos y mejorados servicios a bajo costo. Esto tiene como resultado en un aumento en el tiempo de uso de la antena y en el número de suscriptores. La solución mas practica para este problema es usar el procesamiento espacial. Como afirmo claramente el fundador de Qualcomm Inc., Andrew Viterbi *“el procesamiento espacial permanece como la mas prometedora, si no la ultima frontera, en la evolución de sistemas de acceso múltiple”* [40].

El procesamiento espacial es la idea central de las antenas adaptivas o sistema de antena inteligente. Aunque esto puede parecer que las antenas adaptivas han sido descubiertas recientemente, estas datan desde la segunda guerra mundial con el beamformer Bartlett convencional [41]. Esto es solo adelanto actual en el bajo costo de poderosos procesadores digital de señales, procesadores de propósito general, así como innovadoras técnicas de software basado en procesamiento de señales (algoritmos), este sistema de antenas inteligentes tiene enorme interés mundial. De hecho, muchas visiones generales y tutoriales han emergido y una gran cantidad de investigación esta siendo realizada sobre la adaptiva y algoritmos de dirección de llegada (DOA) para el sistema de antena inteligente, como el numero de usuarios y la demanda por servicios wireless aumenta en una velocidad exponencial, la necesidad por ampliar el área de cobertura y alzar la alta calidad de transmisión. El sistema de antena inteligente provee una solución a este problema.

En este capitulo cinco se presenta una introducción o una visión muy general del Sistema de Antenas Inteligentes (o Smart Antenna Systems, en Ingles). Primero,

proporcionaremos al lector un entendimiento sobre el sistema de antena inteligente ejemplificado con el sistema de audición humano, después presentaremos el propósito para las antenas inteligentes introducido el sistema de radio celular y su evolución.

## **5.2. Concepto de Antena Inteligente.**

Varias definiciones para antenas inteligentes podemos encontrar en la literatura de consulta. Nosotros la definiremos en este proyecto así: *“Una antena inteligente es aquella que, en vez de disponer de un diagrama de radiación fijo, es capaz de generar o seleccionar haces muy directivos enfocados hacia el usuario deseado e incluso adaptarse a las condiciones radioeléctricas en cada momento”*.

Muchos nos referimos al Sistema de Antenas Inteligentes como Antenas Inteligentes, pero en realidad las antenas *no son* inteligentes; ya que una antena inteligente es una combinación exitosa entre comunicaciones y las tecnologías de ingeniería de computación, en otras palabras, la combinación de un Procesamiento Digital de Señales (DSP en inglés) [42] junto con un arreglo o una agrupación de antena (Array en inglés) que va a optimizar los diagramas de transmisión y recepción dinámicamente en respuesta a una señal de interés en el entorno; haciendo el sistema inteligente.

### **5.2.1 Antena Inteligente en nuestro cuerpo humano.**

El funcionamiento de muchos sistemas de ingeniería es fácilmente comprendido cuando este esta relacionando a nuestro de cuerpo humano [43]. Para comprender mejor como trabaja un sistema de antena inteligente cierre los ojos e imagine a continuación a dos personas teniendo una conversación con Usted que se desplazan dentro de una habitación (fig 5.1) el oyente entre las dos personas es capaz de determinar la ubicación del orador cuando se mueve alrededor de la habitación por que la voz del orador llega en cada sensor acústico, el oído, en diferente tiempo. El “procesador de señal” humano, el *cerebro*, calcula la dirección del orador en diferentes tiempos o retardos de la voz recibidos por los dos oídos. Después, el cerebro, añade la fuerza de las señales de cada

oído así como para enfocarse sobre el sonido de la dirección calculada. Además, si adicionalmente juntáramos oradores en la conversación, el cerebro puede desconectar interferencias no deseadas y concentrarse sobre una conversación en un tiempo. En cambio, el oyente puede responder a la misma dirección del orador deseado orientando el transmisor (o la boca) hacia el orador.

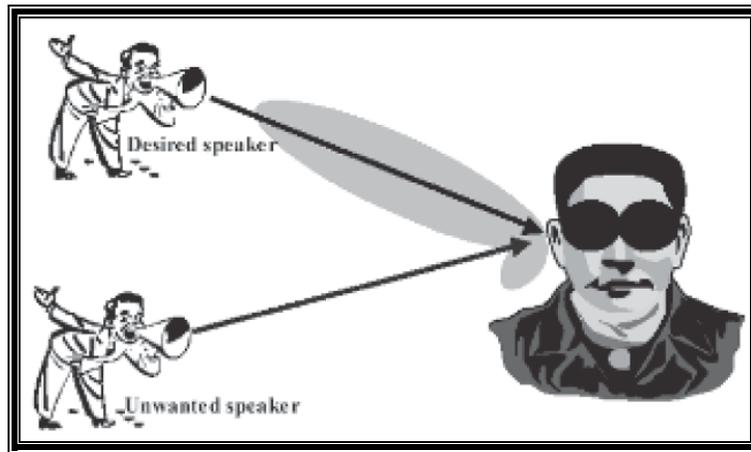


Figura 5.1 Función humana auditiva.

Utilizando un proceso similar, el cerebro humano es capaz de distinguir entre múltiples señales que tiene diferente direcciones de llegada. Así, si oradores adicionales se unen a la conversación, el cerebro se puede incrementar la señal recibida del orador de interés y deja de prestar atención a interferencias no deseadas. Por consiguiente, el oyente tiene la habilidad para distinguir la voz de una persona de entre muchas personas hablando simultáneamente y concentrándose en una conversación a la vez.

Una persona es capaz de determinar la dirección de llegada (DoA) de un sonido utilizando un proceso de tres etapas:

- ❖ Un oído actúa como sensor acústico y recibe la señal,
- ❖ Debido a la separación entre los oídos, cada oído recibe la señal con un diferente tiempo de retardo,

- ❖ El cerebro humano, un procesador de señal especializado, hace un gran número de cálculos para cotejar la información y calcular la localización del sonido recibido.

Los sistemas eléctricos de la antena inteligente trabajan de la misma forma utilizando dos antenas en vez de las dos orejas y un procesador digital de señales en vez de un cerebro (fig 5.2). Por lo tanto, después de que el procesador digital de señal mide el tiempo de retardo de cada elemento de la antena, este calcula la dirección de llegada (DoA) de la señal de interés (SOI), y entonces este ajusta la excitación (ganancia y fase de las señales) para producir un patrón de radiación que enfoca sobre la SOI mientras, perfectamente, desconectando cualquier señal de no interés (SNOI).

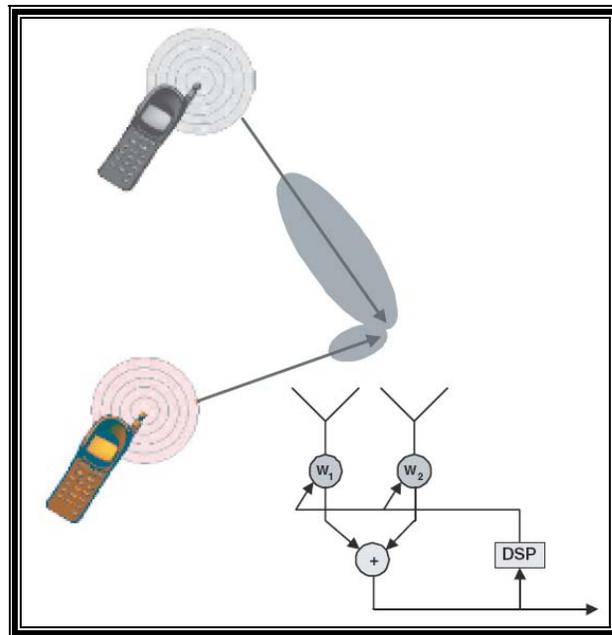


Figura 5.2 Dos elementos eléctricos de antenas inteligentes.

Transfiriendo la misma idea al sistema de comunicación móvil, la estación base juega el papel del oyente y los teléfonos celulares activos simulan el papel de varios sonidos logrando ser escuchados por el oído humano. El principio del sistema de antena inteligente es ilustrado en la figura 5.3.

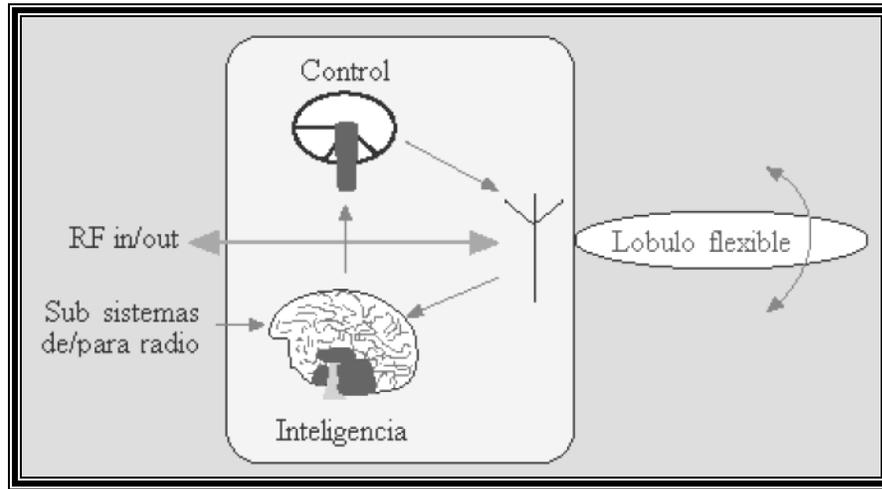


Figura 5.3 Principio de un sistema de antena inteligente.

### 5.3 Tipos de implementación de las antenas inteligentes.

La idea de usar múltiples antenas y la innovación en el procesamiento de la señal para tener células más inteligentes ha existido durante muchos años. De hecho, ya se han aplicado variaciones de sistemas de antena inteligente relativamente costosos en sistemas militares de defensa. Hasta años recientes, las barreras del costo han impedido su uso en sistemas comerciales. Con la llegada de poderosos procesadores digitales de señales a bajos costos (DSPs), procesadores de propósito general, así como las técnicas de procesamiento de las señales basadas en software innovadoras, ha hecho práctico el uso de las antenas inteligentes para los sistemas de comunicaciones celulares.

Principalmente, la característica básica que se busca en el diseño de un sistema de antena inteligente es la *capacidad de seleccionar espacialmente a los distintos usuarios*. Existen varias formas (figura 5.4) de implementar un sistema con esta capacidad las cuales describiremos a continuación por orden de complejidad [42, 44 y 45]:

- ❖ *Haz conmutado.*
- ❖ *Haz de seguimiento.*
- ❖ *Arreglo adaptativo.*

En la presencia de un nivel bajo de interferencia el haz conmutado y el arreglo adaptativo, ambos tipos de antenas inteligentes provee ganancia significativa sobre los sistemas sectorizados convencionales. Sin embargo, cuando un nivel alto de interferencia esta presente, la capacidad de rechazo de interferencia de los sistemas adaptivos proporciona significativamente más cobertura que cualquiera la convencional o sistema haz conmutado.

En la figura 5.5 ilustramos la relativa área de cobertura relativa para sectorizado convencional, haz conmutado y sistema de antena adaptiva. Estos tipos de sistemas de antenas inteligentes proporcionan ganancias significativas sobre sistemas de sectorizado convencional. El bajo nivel de interferencia ambiental a la izquierda representa un nuevo sistema inalámbrico con bajos niveles de penetración. Sin embargo el ambiente con un nivel significativo de interferencia a la derecha representa ya sea un sistema inalámbrico con más usuarios o uno utilizando la frecuencia mas dinámica volviendo a emplear los patrones. En este escenario, la capacidad de rechazo de interferencia del sistema adaptivo proporciona significativamente más cobertura que cualquiera de los sistemas convencional o haz conmutado.

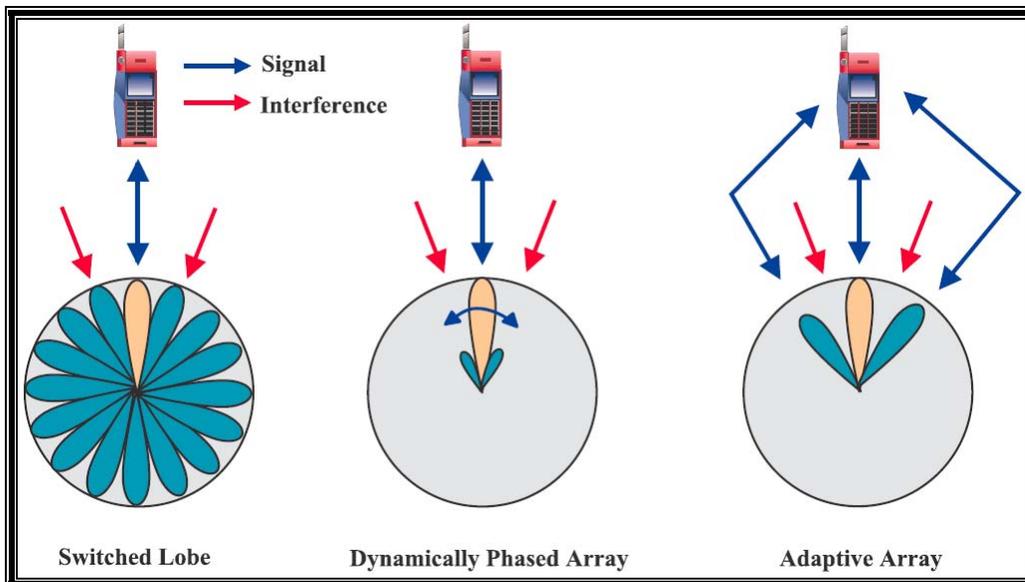


Figura 5.4 Formas de implementación de las antenas inteligentes.

Ahora, asumiremos que una señal de interés y dos interferencias co-canal llega a la estación base de un sistema de comunicaciones empleando antenas inteligentes. La Figura 5.6 ilustra los patrones de Haz que cada configuración puede formar para adaptarse a este escenario.

El sistema de Haz conmutado (Switched-beam) es mostrado sobre la izquierda mientras el sistema adaptativo es mostrado sobre la derecha. La línea iluminada indica la señal de interés mientras la línea oscura despliega la dirección del co-canal interfiriendo las señales. Ambos sistemas dirigen el lóbulo con la más grande intensidad en la dirección general de la señal de interés.

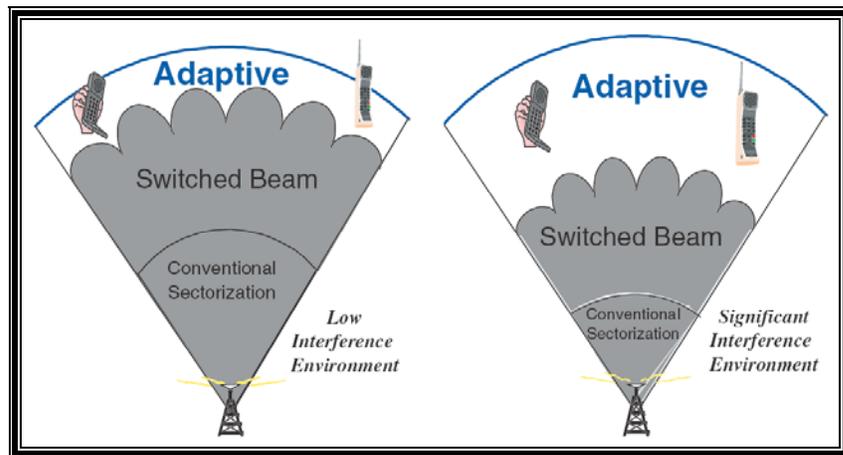


Figura 5.5 Patrones del área de cobertura para Haz conmutado (Switched Beam) y Antenas de arreglo adaptativo (Adaptive Array).

Sin embargo, los haces fijos conmutados cumple un patrón de control rustico que los arreglos adaptivos. El sistema adaptativo escoge una colocación más exacta, así proporcionando grandes incrementos a la señal. De modo semejante, las señales interferidas llegan en lugares de más baja intensidad fuera del lóbulo principal, pero nuevamente el sistema adaptativo coloca estas señales en los puntos de ganancia mas bajo posible. El concepto de arreglo adaptivo idealmente garantiza que la señal principal recibe un incremento máximo mientras las señales interferidas reciben una máxima supresión.

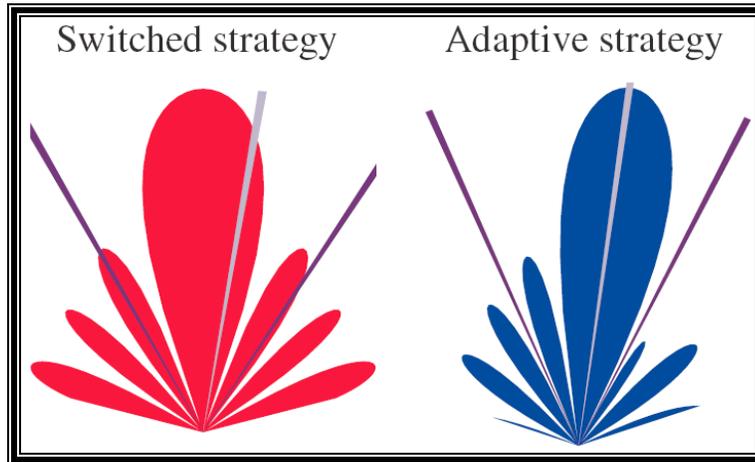


Figura 5.6 Patrones de Haz para las configuraciones: conmutado y adaptativo.

### 5.3.1 Haz Conmutado (Switched Beam).

Es la técnica mas simple y también es conocida como “*switched lobe*” (cambio de dirección del lóbulo). El sistema radiante genera varios haces fijos, cada uno de ellos apuntando en una dirección distinta, de modo que entre todos se cubre toda la zona deseada (un sector o una celda). La inteligencia del sistema se encarga de seleccionar el haz que mejor servicio da a cada usuario en particular, en función de algún parámetro de control (mayor nivel de potencia recibida), mejor SINR (relación señal a ruido mas interferencia) y mejor C/I (relación señal a interferencia).

Esta técnica no garantiza que el móvil se encuentre en la dirección de máxima radiación del haz que le da servicio, ni que las señales interferentes se vean notablemente reducidas (ya que siempre es posible que alguna entre por uno de los lóbulos secundarios). De hecho, seria posible recibir una señal interferente por un punto del diagrama de radiación con mayor ganancia que la señal deseada, empeorando apreciablemente las prestaciones del sistema.

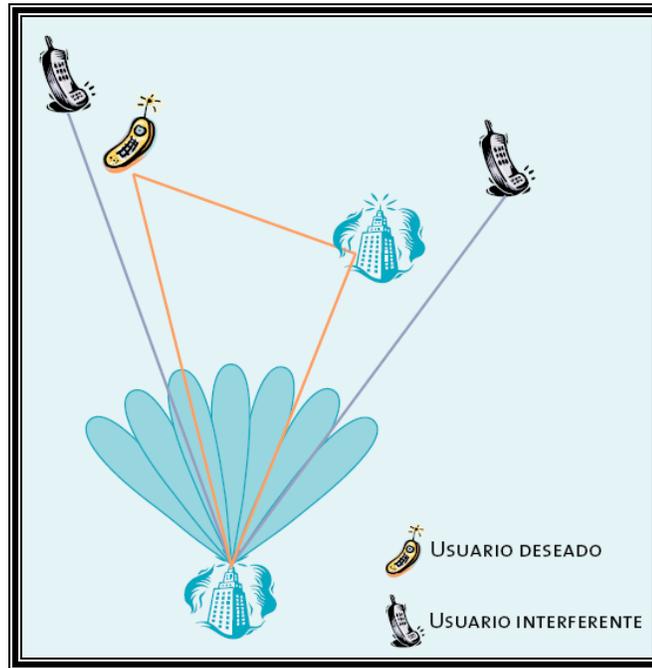


Figura 5.7 Antena de Haz Conmutado.

Una versión más avanzada de esta técnica consistiría en seleccionar con un haz la señal deseada y con otros algunas de sus componentes multitrayecto (multipath), de forma que puedan procesarse todas con un receptor. En la figura 5.7 se muestra una ilustración de esta técnica de Haz Conmutado.

### 5.3.2 Haz de Seguimiento (Dynamically Phased Array).

El haz de seguimiento es conocido también como “*Arreglo Dinámico en Fase*”. Esta técnica es más compleja a la de Haz conmutado. Requiere el uso de un array progresivo (*phased array*); es decir, un *array* en el que se pueden controlar electrónicamente las fases con las que se alimentan los distintos elementos, de modo que puede modificarse a voluntad la dirección en la que apunta el lóbulo principal de la antena. A su vez, es necesario utilizar algún algoritmo de detección de la dirección de llegada (DoA), de modo que pueda reorientarse dinámicamente el haz para apuntar al usuario deseado.

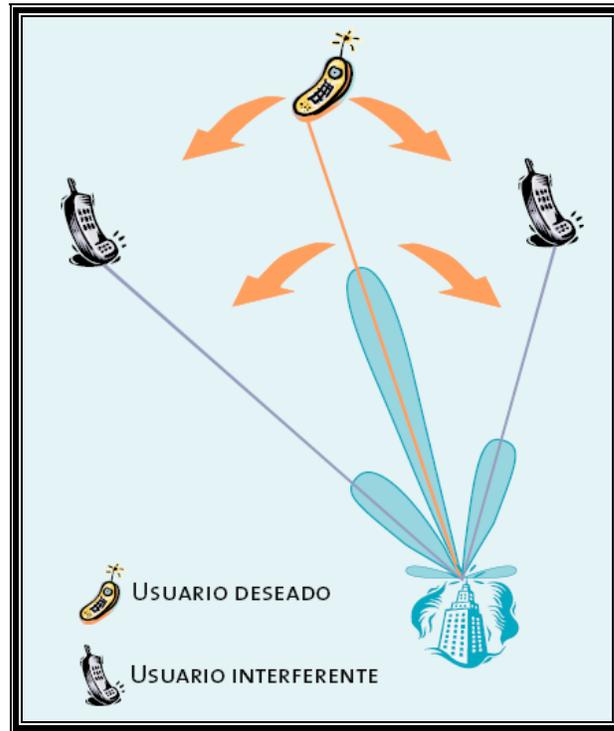


Figura 5.8 Antena de Haz de Seguimiento.

Con esta técnica sí se puede garantizar que el usuario se encuentra iluminado en todo momento por el lóbulo principal y con máxima ganancia (dentro de las limitaciones de los algoritmos que se empleen). Sin embargo, tampoco puede evitarse que las interferencias entren por algún lóbulo secundario del diagrama de radiación.

Para aprovechar las señales multitrayecto sería necesario detectar y seguir con otros haces dichas componentes y luego procesarlas con un receptor Rake. En la figura 5.8 se ilustra esta técnica.

### 5.3.3 Haz Adaptativo (Adaptive Array).

Esta técnica sería el máximo nivel de inteligencia con que se podría dotar al sistema. En este caso, se utiliza un algoritmo de DoA para determinar la dirección hacia las fuentes de la interferencia (por ejemplo: otros usuarios). Aquí, la salida de cada elemento del *array* se pondera con un factor de peso cuyo valor se asigna dinámicamente, de modo

que se conforma el diagrama de radiación para maximizar algún parámetro de la señal (por ejemplo, la SINR). De este modo, el diagrama sintetizado habitualmente presentará un lóbulo principal en la dirección del usuario deseado, lóbulos secundarios en las direcciones de las componentes multitrayecto (si se quieren procesar con un receptor Rake) y mínimos (e incluso nulos) de radiación en las direcciones de las fuentes de interferencia.

Podemos ver esta técnica en la figura 5.9. No siempre será posible eliminar toda la interferencia, ya que el número de fuentes interferentes que se pueden suprimir está directamente relacionado con el número de elementos de la antena.

Esta técnica requiere el uso de complicados algoritmos, tanto para la detección de las señales deseada e interferente como para la optimización de los pesos que conforman el haz. Estos algoritmos suelen conllevar una gran carga computacional, mientras que deben procesarse en tiempo real, por lo que suponen una seria limitación. Por ser el caso más interesante, algunos de los algoritmos utilizados se comentan más adelante.

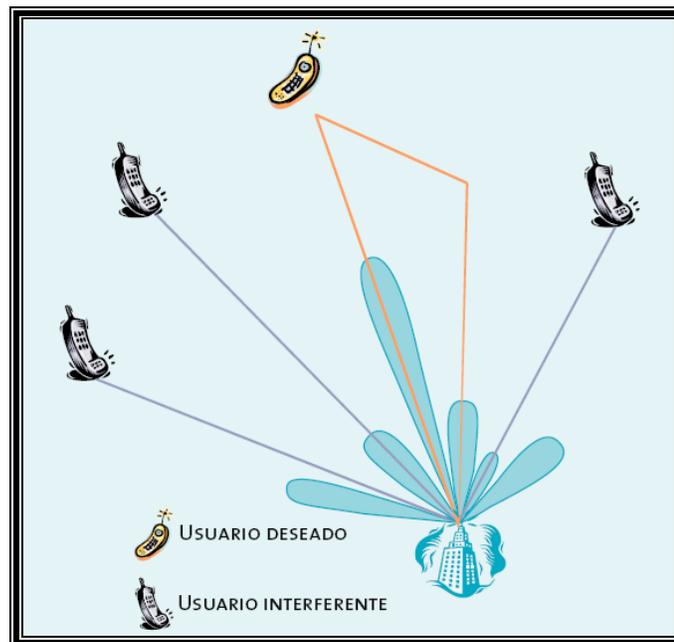


Figura 5.9 Antena de Haz Adaptativo.

## 5.4 Arquitectura de un Sistema de Antena Inteligente.

Cualquier sistema wireless puede ser dividido en sus partes de recepción y transmisión. Debido a las funciones avanzadas de un sistema de antena inteligente, hay una mayor necesidad por mejorar la cooperación entre sus partes de recepción y transmisión.

### 5.4.1 Arquitectura de Recepción.

La figura 5.10 muestra esquemáticamente el diagrama a bloques de la parte de recepción de una antena inteligente. El arreglo de antena contiene  $M$  elementos. Las señales  $M$  son combinadas en una señal, que es la entrada al resto del receptor. Como la figura muestra, la parte de recepción de la antena inteligente consiste en cuatro unidades [46]. Además de la antena misma, este contiene una unidad de radio, una unidad formando un lóbulo y una unidad de procesamiento de señal.

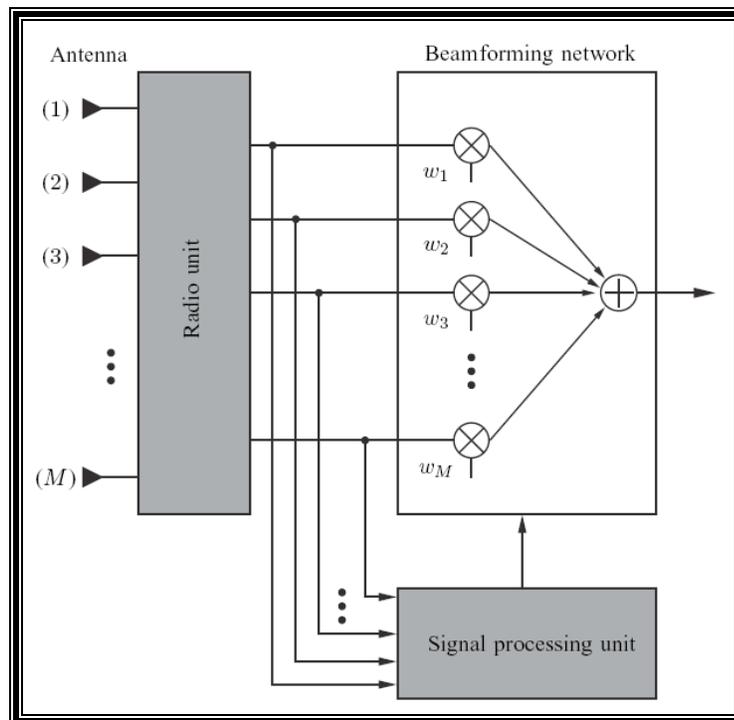


Figura 5.10 Parte de Recepción de una antena inteligente.

El número de elementos en el arreglo o array debe ser relativamente bajo (el mínimo requerido), con el fin de evitar innecesariamente la alta complejidad en la unidad de procesamiento de señal. La figura 5.11 muestra los cuatro ejemplos de diferentes geometrías de arreglo que pueden ser aplicadas en implementaciones de antenas adaptativas. Las antenas arreglo puede ser de una, dos o tres dimensiones, dependiendo de la dimensión del espacio que uno necesita para acceder.

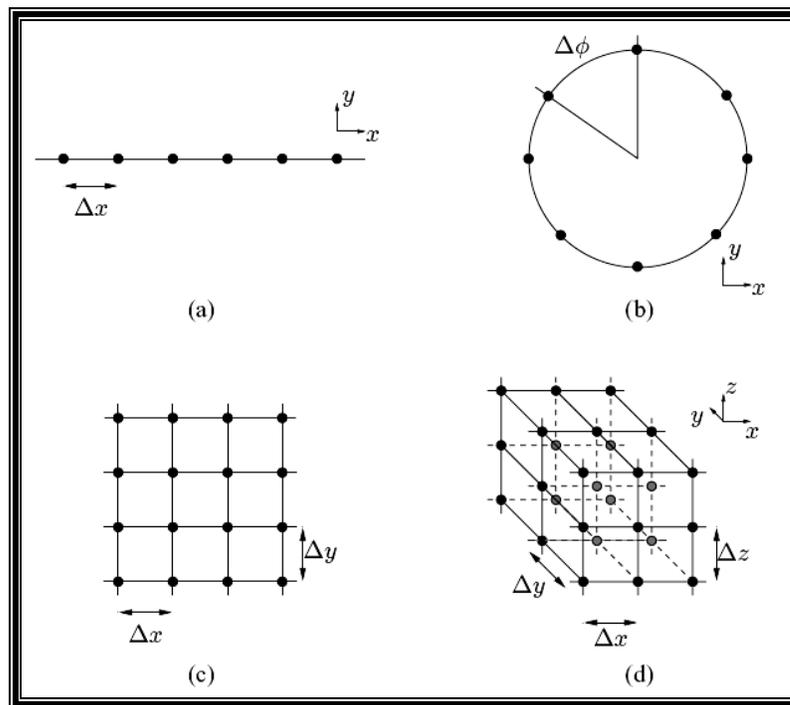


Figura 5.11 Diferentes geometrías de arreglo para antenas inteligentes

Las primeras dos estructuras son utilizadas por beamforming en el plano horizontal (azimut) solamente. Esto será normalmente suficiente para ambientes al aire libre, por lo menos en celdas grandes. El primer ejemplo [42, 46] (a) muestra un arreglo lineal en una dimensión con elemento uniforme espaciado de  $\Delta x$ . Tal estructura puede realizar beamforming en un ángulo azimut dentro de un sector angular. Esta es la estructura más común debido a su baja complejidad. El segundo ejemplo (b) muestra un arreglo circular con elemento angular espaciado de  $\Delta\phi = 2\pi/N$ , donde  $N$  representa en número de elementos. Esta estructura puede realizar beamforming en cualquier dirección pero,

debido a su simetría, es más apropiado para azimut beamforming. Las últimas dos estructuras son utilizadas para realizar beamforming de dos dimensiones, en decir en ambos ángulos azimut y de elevación. Tales especificaciones son generalmente deseables para interiores o densos ambientes urbanos. La figura 5.11 (c) es la vista frontal de un arreglo rectangular de dos dimensiones con un elemento horizontal espaciado de  $\Delta x$  y un elemento vertical espaciado de  $\Delta y$ . Beamforming en todo el espacio, en todos los ángulos, requiere algún tipo de estructura cubica o esférica (configuración de tres dimensiones). El cuarto ejemplo (d) muestra una estructura cubica con separaciones de elementos de  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  y  $\Delta z$ , respectivamente, en cada dirección en el espacio.

La unidad de radio consiste en cadenas de baja conversión y (compleja) conversión de analógica a digital (A/D). Debe haber cadenas de baja conversión  $M$ , uno para cada elemento de arreglo. Las señales recibidas de las unidades móviles son combinadas en uno, que es la entrada a la parte restante del receptor (amplificador, el canal decodificación, etc.).

Basados sobre la señal recibida, la unidad de procesamiento de señal calcula las cargas compleja  $w_1, w_2, \dots, w_N$  con que la señal recibida de cada uno de los elementos de arreglo es multiplicada. Estas cargas determinara el patrón de antena en la dirección ascendente. La estimación de la carga puede ser optimizada mediante uno de los dos principales criterios dependiendo de la aplicación y la complejidad:

- a) Maximización de la potencia de la señal recibida desde el usuario deseado
- b) Maximización de la SIR suprimiendo la señal recibida de las fuentes de interferencia.

En teoría, con  $M$  elementos de antena uno puede “anular afuera”  $M - 1$  fuentes de interferencia, pero debido a la propagación multitrayecto (multipath) este numero será normalmente mas bajo.

El método para calcular las cargas varían dependiendo del tipo de criterio de optimización. Cuando el haz conmutado es utilizado, el receptor probara todos los vectores de carga predefinidos (correspondiente al grupo del lóbulo) y escoge uno mejor dando el nivel mas fuerte de la señal recibida. Si el enfoque de arreglo de fase es utilizado, el cual consiste en dirigir un haz de ganancia máxima hacia el componente más fuerte de la señal, las cargas son calculadas después de que la dirección de llegada (DOA) sea estimada primero. En el enfoque de arreglo adaptivo, donde la maximización de SIR es necesaria, el optimo vector de carga (de dimensión  $M$ )  $\mathbf{w}_{opt}$  puede ser computado utilizando un numero de algoritmos tal como optima combinación y otros que seguirán.

Cuando el haz formando es hecho digitalmente (después A/D). El haz formado y la unidad de procesamiento de señal puede normalmente ser integrada en la misma unidad (DSP, Procesamiento Digital de Señales). La separación en la figura 4.18 es hecha para aclarar la funcionalidad. El haz formado puede ser realizado en cualquiera de los dos en radio frecuencia (RF) o frecuencia intermedia (IF).

#### **5.4.2 Arquitectura de Transmisión.**

Normalmente el proceso adaptativo es aplicado solamente para la uplink/ recepción (de un móvil a la estación base). En este caso la unidad móvil consume menos potencia de transmisión y el tiempo de operacional de la batería es extendida. Sin embargo, el beneficio de adaptación es muy limitada, si no beamforming es aplicado en la transmisión downlink (de la estación base a el móvil). En principio. Los métodos utilizados en el uplink pueden ser conservados en el downlink. La parte de transmisión de un sistema de antena inteligente es técnicamente similar a su parte de recepción como es ilustrado en la figura 5.12.

La señal es dividida entre  $N$  ramas, las cuales son cargadas por la cargas complejas  $w_1, w_2, \dots, w_N$  en la unidad de lóbulo forming [46]. Las cargas, las cuales determina el patrón de radiación en la dirección downlink, son calculadas por la unidad de

procesamiento de señal. La unidad de radio consiste de convertidores A/D y la conversión superior de cadenas. En práctica, algunos componentes, tal como la antena misma y el procesador digital de señales, serán los mismos como en recepción. La principal diferencia entre uplink y downlink es que dado que no hay antenas inteligentes aplicadas a las terminales del usuario (estaciones móviles), esto solo es limitado el conocimiento del Estado del Canal de Información (CSI) disponible. Por lo tanto, el beamforming óptimo en el downlink es difícil y el mismo desempeño como el uplink no puede ser logrado.

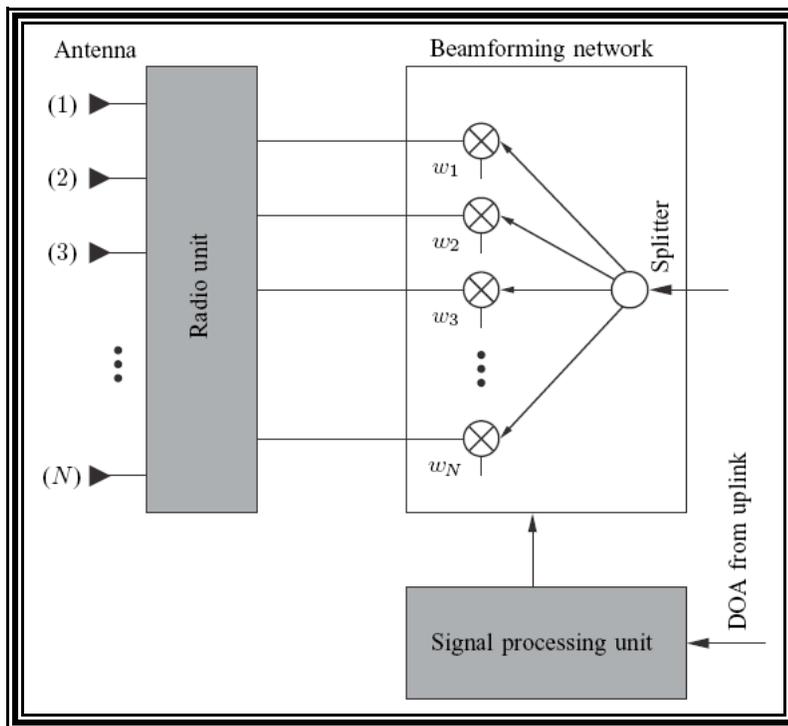


Figura 5.12 Parte de Transmisión de una antena inteligente.

Normalmente existen dos enfoques para superar este deterioro. La primera consiste en idear métodos que no requieren ningún CSI, pero con rendimiento de ganancia algo limitada. El segundo es la suposición de la reciprocidad direccional, es decir, la dirección de la cual la señal está llegando sobre el uplink está estrechamente relacionada al downlink CSI (channel state information). Esta suposición ha sido reforzada por los recientes resultados experimentales.

Físicamente una antena adaptativa se parece mucho a una antena ordinaria pero tiene software incorporado de electrónica y control. Esto coopera con el sistema de control del receptor adaptativo en tiempo real. También puede comunicarse interactivamente con el sistema de control de la red de radio celular. Las técnicas de las antenas inteligentes solo han sido consideradas recientemente para la implementación en estaciones móviles de tierra e instalando unidades en vehículos debido a su alto sistema de complejidad y gran consumo de energía. Varios arreglos de antenas inteligentes para aplicaciones de estación base ya han sido propuestas en [47, 48]. Sin embargo, los esfuerzos limitados solo han sido aun considerados para desarrollar arreglos de antenas adaptativas receptoras adecuadas para Handsets. De hecho, existen varias dificultades prácticas con la implementación de esa solución en el nivel de Handset; son:

- a) El espacio en el dispositivo Handset esta limitado y no permite la implementación de un arreglo de antena con el número de elementos necesarios suficientes para el eficiente procesamiento de señal espacial. En resumen, dos (o varias) antenas en proximidad pueden reducir la eficacia del sistema de la antena debido al acoplamiento.
- b) El problema relacionado al movimiento del móvil que proporciona un escenario omnidireccional.
- c) El costo y la complejidad de la implementación en cada móvil es mucho mayor que la implementación en cada radio estación base.

Aparte de estas dificultades, el algoritmo adaptativo para el procesamiento de la señal en el Handset debe ser rápido; sin embargo necesita solo unos pocos cálculos sencillos y requiere una implementación sencilla de hardware. Para justificar aun más los esfuerzos de investigación a emplear antenas múltiples en Handset, la ganancia en rendimiento debería ser lo suficientemente grande para compensar el costo adicional y el consumo de energía. Finalmente, esto puede ser enfatizado que el uso de antenas digitales

beamforming, tanto en los satélites y en tierra firme y en unidades móviles, siguen siendo un desafío para los futuros sistemas de comunicación satelital.

# Capítulo VI

## Antenas Inteligentes en Comunicaciones Móviles Celulares.

---

---

Después de haber analizado el concepto de Antenas Inteligentes, su origen en la naturaleza, sus tipos de implementaciones y su estructura de una forma global; en este último capítulo analizare la principal aplicación que se le da a las Antenas Inteligentes. La tecnología de antenas inteligentes es hoy en día, una de las técnicas mas prometedoras en comunicaciones móviles que ha alcanzado un enorme interés mundial en los últimos años, debido a la introducción de este tipo de antenas en el mercado de las comunicaciones a aumentado la capacidad en los sistemas celulares, un mayor ancho de banda y la posibilidad de introducir nuevos servicios o la factibilidad de usar estas técnicas en los sistemas satelitales, las redes de área local inalámbricas. Por lo que la razón principal para usar antenas inteligentes en una red de telefonía móvil es la de incrementar su capacidad (la posibilidad de manejar mas usuarios por estación base).

### 6.1 Estructura de la Telefonía Celular.

La red telefónica es uno de los sistemas automáticos más grandes del mundo. Queda al servicio del usuario con sólo levantar el auricular y marcar un número, estableciendo de manera instantánea la comunicación con personas de cualquier continente. Pero además de la telefonía alámbrica, existe una moderna infraestructura de telefonía celular, la cual ofrece los mismos servicios básicos (conferencias, Internet y facsímil), más otros adicionales (mensajes escritos, multimedia).

El concepto de red de radio celular fue inventado en los laboratorios Bell, en Estados Unidos, en 1947. Pero fue después de 35 años que la tecnología permitió implementar el

concepto de “célula” o “celda”, al montar la primera red analógica que se intercomunicaba mediante cables conductores de cobre y al fabricar los primeros equipos.

El teléfono celular es un medio de comunicación electrónico similar al teléfono convencional, con la diferencia de que no requiere cables de conexión, sino que es inalámbrico. El enlace telefónico se lleva a cabo por medio de señales electromagnéticas de alta frecuencia, permitiendo al usuario la comunicación desde cualquier punto de la zona de cobertura sin importar si se encuentra en movimiento o en algún sitio específico (figura 6.1).

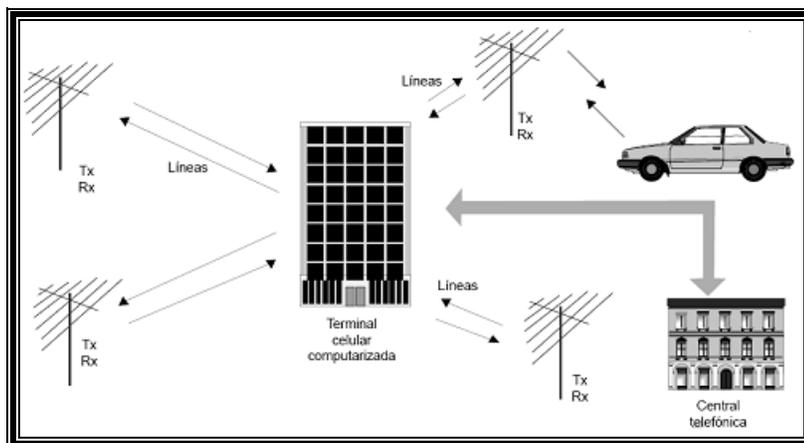


Figura 6.1 Enlace telefónico.

El concepto de telefonía celular, se deriva de que en estos sistemas de comunicación el territorio de cobertura se divide en áreas llamadas celdas o células. En cada celda existe una estación base con antenas encargada de recibir las llamadas y enviarlas hacia los teléfonos celulares que se mueven dentro de su zona. Cada estación base puede cubrir una área de entre 1.5 y 28 Km, dependiendo de la topografía y de los obstáculos de la zona (figura 6.2).

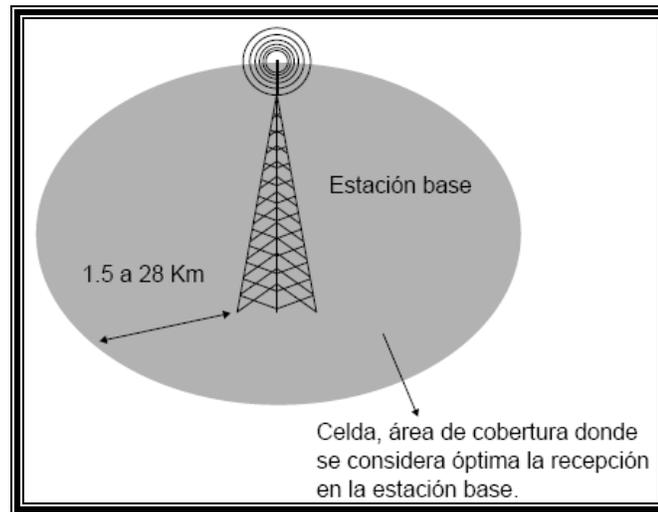


Figura 6.2 Estación base.

Una de las ventajas de esta división de una zona en células, es la posibilidad de utilizar una porción muy pequeña del espectro electromagnético para proporcionar el servicio de telefonía. Veamos por qué. Para que dos estaciones transmisoras receptoras anexas no se interfieran entre sí, es indispensable que ambas utilicen frecuencias distintas de transmisión y recepción; en tal caso, las compañías de telefonía celular tendrían que contratar una gran cantidad de canales de comunicación para cubrir una zona muy extensa, lo que no resulta conveniente ni para las compañías ni para el usuario, por el consiguiente aumento en los costos. [49]

La solución a la que se llegó fue sumamente ingeniosa: se diseñaron las células de cobertura en forma semejante a un panal de abejas (figura 6.3), y se utilizaron sólo tres canales de comunicación, acomodados de tal forma que nunca se tuvieran dos células de una misma frecuencia juntas.

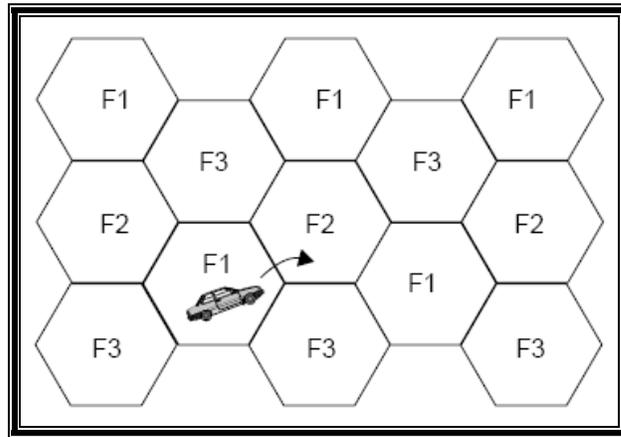


Figura 6.3 Celdas de cobertura (tipo panel).

Las llamadas desde o hacia los teléfonos celulares son recibidas en el centro de conmutación que actúa como el cerebro del sistema. Cuando una estación base recibe la señal de una llamada desde un teléfono celular, la envía al centro de conmutación para que éste analice el número marcado y determine si se está llamando a otro teléfono celular o a un teléfono convencional; si la llamada está dirigida a otro teléfono celular, el centro de conmutación verifica cuál es la estación base más cercana al teléfono celular de destino y la envía allí (figura 6.4).

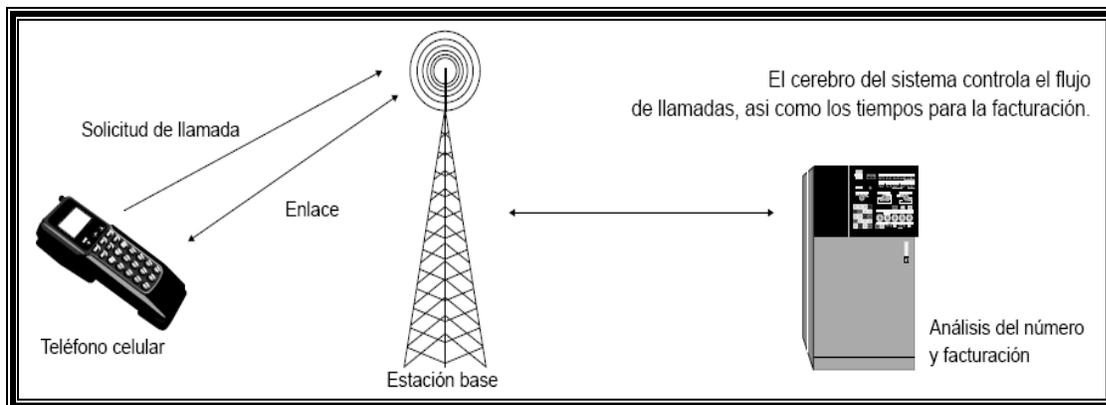


Figura 6.4 Proceso de comunicación celular.

Una vez que concluye la llamada, se libera el canal que había sido utilizado, pudiendo ser ocupado en cualquier momento por otro usuario que solicite comunicación o entre en

la célula en el momento en que está realizando la llamada. La asignación de tal canal es asignada de manera automática por la computadora central.

### **6.1.1 Movimiento entre dos celdas.**

Para ejemplificar este caso, vea la figura 6.3. Note que, en su trayectoria, el auto abandona una celda en la que se está utilizando la frecuencia 1 y entra en otra en la que se emplea la frecuencia 2. En este caso, cuando el receptor detecta que la señal que está recibiendo de la estación de frecuencia 1 se está debilitando, rastrea en los otros dos canales para localizar si ya está entrando en la zona de influencia de otra repetidora; en caso afirmativo, envía una señal de control a la estación de frecuencia 1, para que dirija la comunicación del usuario hacia la estación de frecuencia 2 detectada, y una vez que se ha realizado esta conmutación, el teléfono desactiva el receptor de frecuencia 1 y cambia para recibir la señal de la estación de frecuencia 2. Este proceso se repite todas las veces que el usuario abandone la zona de influencia de una estación para entrar en otra adyacente. Esta transferencia de llamadas se llama *hand-off*, y normalmente implica una pérdida en la comunicación de una fracción de segundo (llega al segundo en casos extremos); pero una pérdida de señal de audio de esa naturaleza en una conversación telefónica no suele resultar grave; sin embargo, cuando se trata de la transmisión de datos (por ejemplo, para el envío de documentos) sí se llegan a presentar problemas. Figura 6.5.

Un caso especial se produce cuando un usuario de teléfono celular de una ciudad se desplaza a otra, la cual no está en el área de influencia de su proveedor de servicios de telefonía celular. En este caso, y gracias a convenios entre las empresas de distintas ciudades, una estación base de la localidad en que está el usuario detecta su teléfono celular, lo reconoce como de una compañía asociada y envía la señal a su centro de conmutación; desde ese momento, este centro de conmutación lo reconoce como una llamada propia (aunque la facturación la lleva a cabo la empresa original). Este proceso se llama *roaming*.

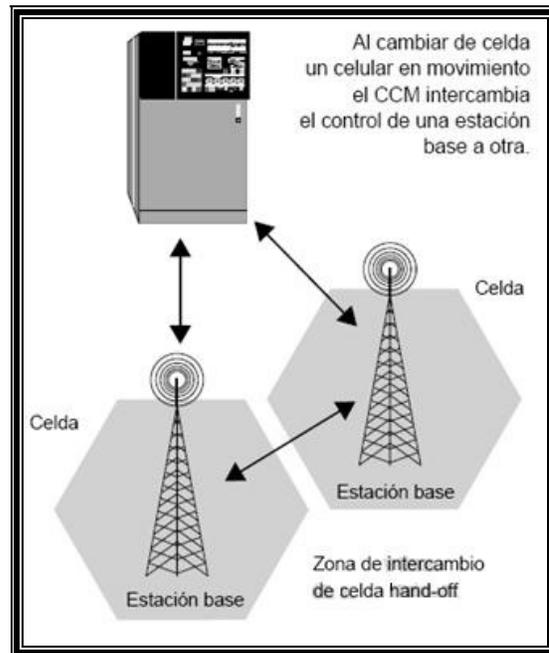


Figura 6.5 Movimiento entre celdas

Las llamadas desde los teléfonos celulares en las que intervienen teléfonos convencionales, pasan por el centro de conmutación de la empresa local de telefonía. La llamada viaja del teléfono convencional a la central de conmutación respectiva a través de líneas telefónicas normales, de allí pasa al centro de conmutación de la compañía proveedora del servicio de telefonía celular. Dicha conexión puede ser de varios tipos: satelital, microondas, fibra óptica, etc. Luego, el centro de conmutación de telefonía celular localiza dentro de su red el teléfono celular del destinatario, envía la señal a la estación base más cercana y ésta transfiere la llamada al teléfono celular.

## 6.2. Evolución del Sistema Celular.

Mantener la capacidad siempre ha sido un desafío como el número de servicios y el incremento de suscriptores. Para lograr la demanda de la capacidad necesaria por el número creciente de suscriptores, el sistema de radio celular tenía que evolucionar durante años. Para justificar la necesidad del sistema de antenas inteligentes en la actual

estructura de sistema celular, presentare una pequeña evolución estructural del sistema celular.

Los Sistemas de Comunicación Celular son Sistemas de Comunicación Inalámbrica Móvil que divide una gran área geográfica en pequeñas secciones o celdas, cada una con un transmisor inalámbrico de baja potencia, con el propósito de optimizar el uso de un número limitado de frecuencias. De un total de menos de 1000 frecuencias utilizables, un subconjunto de frecuencias es asignado a cada celda y después reutilizado en varias celdas. Cada teléfono móvil utiliza dos frecuencias, uno del teléfono al transmisor de la celda y otro del transmisor de la celda al teléfono. Varias celdas pueden utilizar simultáneamente el mismo subconjunto de frecuencias, siempre que no sean adyacentes como las demás esto conducirán a interferencia. [50]

La unidad geográfica básica de un sistema celular es una celda que tiene conceptualmente una forma (panal) hexagonal. En realidad una celda no puede ser hexagonal debido al patrón de radiación de una antena. Mas bien, es redonda, pero incluso es teóricamente circular ya que el patrón de radiación es modificado debido a las características geográficas como las montañas, colinas etc. (Figura 6.6).

### **6.2.1 Frecuencia Reutilizada.**

Las celdas son agrupadas como se muestra en la figura 6.6, el cual representa un grupo de siete celdas. Debido al limitado número de frecuencias disponibles las frecuencias individuales tiene que ser reutilizadas de una manera que no genere interferencia. En este ejemplo, las celdas con un mismo número utilizan el mismo conjunto de frecuencias. El factor de la frecuencia reutilizada en este caso es de  $1/7$ , es decir, cada celda utiliza un séptimo de los canales disponibles. Se puede observar que no hay celdas adyacentes que utilizan el mismo conjunto de frecuencias, por lo tanto no hay interferencias.

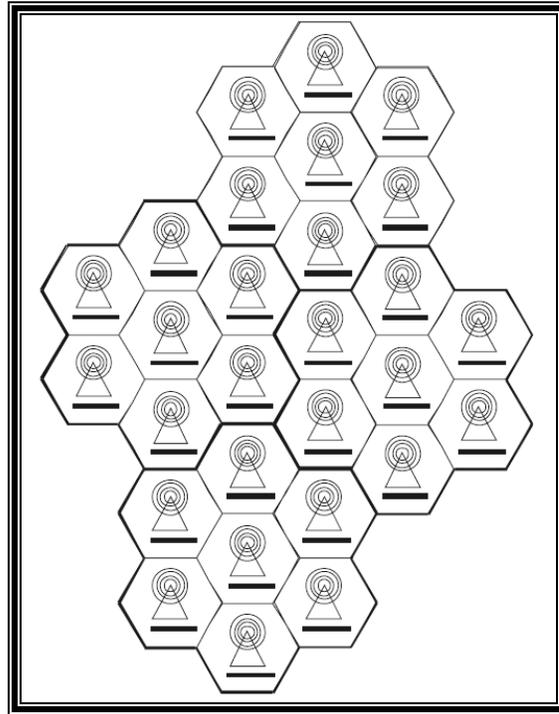


Figura 6.6 Agrupamiento de celdas.

### 6.2.2. Cell Splitting (División Celular)

Cuando una celda se hace madura (o llena de usuarios), el mismo enfoque puede ser utilizado para partir o dividir la celda en celdas más pequeñas. De esta manera celdas urbanas con una alta densidad de tráfico pueden ser divididas en tantas áreas como sea necesario para proporcionar un nivel aceptable de servicio. Cuando las celdas son reducidas en tamaño, en consecuencia la potencia del transmisor es reducida. Este concepto es ilustrado en la figura 6.7. [50]

#### 6.2.2.3 Handoff.

Un problema es creado cuando un usuario móvil viaja de una celda a otra durante una llamada. Desde que las celdas adyacentes no utilizan los mismos canales (frecuencias) una llamada debe ser disminuida o transferida de un canal a otro cuando un usuario cruza la línea entre las celdas. La disminución es inaceptable, un proceso de handoff fue

creado a través del cual la red de telefonía móvil transfiere automáticamente la llamada de un canal a otro mientras el móvil cruza sobre una celda adyacente [50] (figura 6.8).

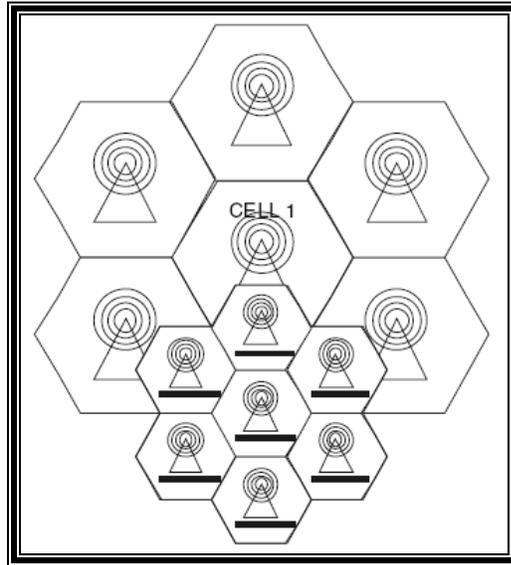


Figura 6.7 División celular

Durante una llamada, ambas partes están en un canal de voz. Cuando la unidad móvil se mueve fuera del área de cobertura de una celda dada la recepción se debilita y el sitio de la celda en uso solicita un Handoff. El sistema cambia la llamada a un canal más fuerte en un nuevo sitio sin interrumpir la llamada o alertar al usuario.

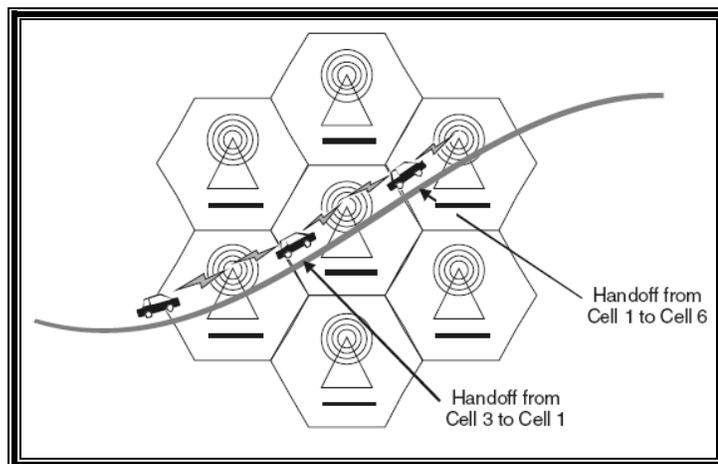


Figura 6.8 Sistema Handoff.

### 6.3 Aplicación de las Antenas Inteligentes en Sistemas de Comunicación Móviles.

Las antenas inteligentes son aquellas que poseen la capacidad de ajustar su diagrama de radiación de forma predefinida. Por lo que el sistema funciona de tal forma que cuando el usuario se desplaza, se modifica la dirección del lóbulo para que se mueva con él. La razón por lo que en los sistemas de comunicación móviles se está utilizando las antenas inteligentes en los últimos años es que este tipo de tecnología presenta un incremento importante de la capacidad de los sistemas, además de otras variadas ventajas en las redes celulares que incluyen un aumento en el ancho de banda, un nivel más alto de seguridad, y la posibilidad para nuevos servicios. [51]

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

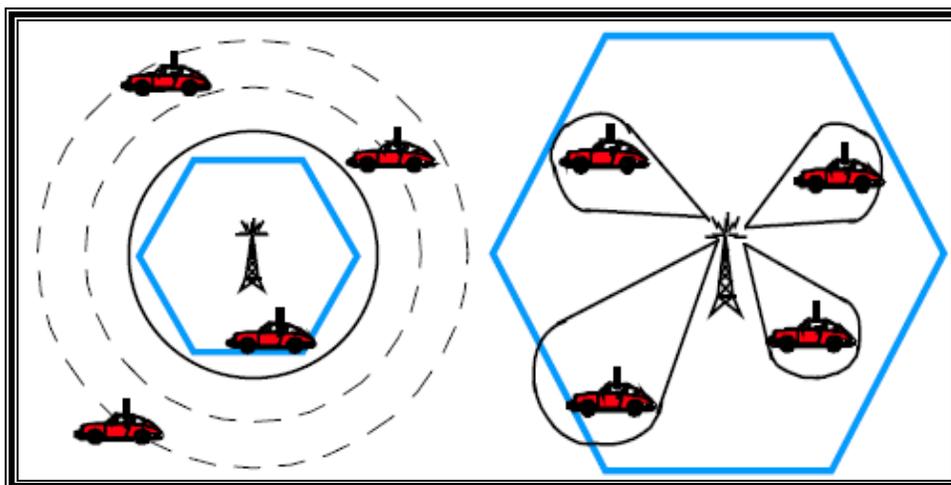


Figura 6.9 Rango de extensión utilizando una antena inteligente.

### **6.3.1 Razones para el Uso de Antenas Inteligentes.**

El hecho de que un sistema de antenas inteligentes en la estación base, permite incrementar al mismo tiempo tanto la capacidad del sistema como la calidad de la comunicación, constituyen una razón importante para el uso de las mismas.

Otra gran razón es que este tipo de tecnología es muy beneficiosa para el medio ambiente; puesto que las antenas inteligentes *en vez de radiar energía en todas las direcciones como las antenas tradicionales* (figura 6.9), *envía la señal directamente a cada usuario y sólo cuando se requiere el servicio, consiguiéndose así, un considerable ahorro energético y una disminución de este tipo de contaminación.* [51] Si a esto sumamos, que la antena inteligente posibilita un considerable descenso en el número de estaciones base necesarias en una red.

Tradicionalmente, las antenas utilizadas en las redes de comunicaciones móviles radian la energía en todas las direcciones dentro de su sector, de forma que sólo un pequeño porcentaje de la misma alcanza al usuario deseado. El resto se convierte en interferencias para los otros usuarios, como ya se ha mencionado, lo que en último término limita la capacidad del sistema y degrada la calidad de servicio.

Se espera que la introducción de antenas inteligentes tenga un gran impacto en las redes de comunicaciones celulares. Afectando muchos aspectos tanto de la planificación como de despliegue de sistemas móviles.

#### **6.3.1.1 Capacidad y Cobertura.**

Dado que el gran interés de las antenas inteligentes es el aumento del rango y la capacidad. Las antenas inteligentes pueden aumentar el área de cobertura y/o la *capacidad* de un sistema de comunicación inalámbrico. La *Cobertura* o *área de cobertura*, es simplemente el área en la cual la comunicación entre un móvil y la

estación base se puede lograr. Dado que la capacidad es una medida del número de usuarios que un sistema puede soportar en un área dada. [52]

En áreas densamente pobladas la fuente principal de ruido es la interferencia de otros usuarios. El despliegue de arreglos adaptivos (antenas arrays) debe aumentar simultáneamente el nivel de señal recibido útil y bajar el nivel de interferencia, así proporcionando una mejora significativa de la SIR (Signal to Interference Ratio). Un impacto inmediato para aumentar el SIR es la posibilidad de reducir la distancia reutilizando la frecuencia. Esto llevará a un gran aumento de la capacidad desde que más portadores pueden ser asignados por celda. [53] Una ventaja inmediata será notada en sistemas TDMA (GSM) que están más afectados por el incremento de SIR. Un ejemplo es mostrado en la figura 6.10, donde el cluster tradicional de siete celdas ha sido reducido a un cluster de tres celdas. Esto llevara a un aumento de la capacidad de  $7/3$  (133%).

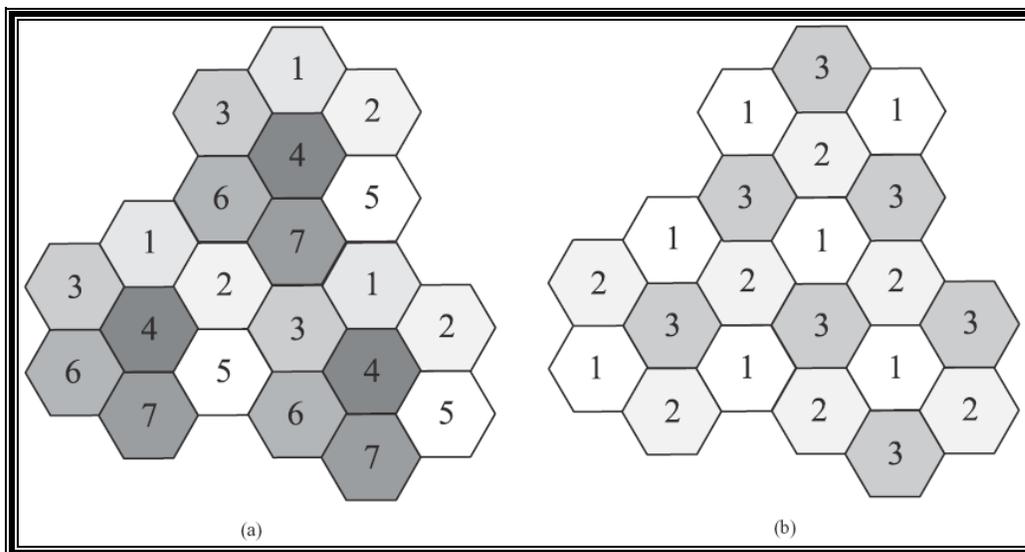


Figura 6.10 (a) Cluster Tradicional de siete celdas y (b) Cluster de tres celdas posible permitido por reducción de interferencia cuando empleamos antenas inteligentes [53].

Otra ventaja añadida de sistemas de antena inteligentes es la seguridad. En una sociedad que llega a ser más dependiente a realizar negocios y la distribución de información

personal, la seguridad es una cuestión importante. Las antenas inteligentes hacen más difícil de intervenir una conexión porque el intruso debe estar posicionado en la misma dirección tal como el usuario esta viendo o teniendo línea de vista con la estación base para intervenir con éxito una conexión [48].

Finalmente, debido a la detección natural espacial del sistema de antenas inteligentes, la red tendrá acceso a la información espacial acerca de los usuarios [53]. Esta información puede ser explotada estimando las posiciones de los usuarios mucho mas exacto que en redes existentes. Por consiguiente, la colocación exacta puede estar usada en servicios para localizar a la gente en caso de llamadas de emergencia o para cualquier otro servicio específico para la localización o posición [53].

#### **6.3.1.2 Reducción y Rechazo de la Interferencia.**

Ahora en áreas pobladas, aumentar la capacidad es la principal importancia. Por lo que se plantean dos estrategias relacionadas para incrementar la capacidad; *la reducción de la interferencia* en el downlink y en el *rechazo de la interferencia* en el uplink.

Para reducir la interferencia, los haces direccionales son conducidos hacia los móviles. La interferencia a los móviles de un canal común solo ocurre si estos (los móviles) están dentro del estrecho beamwidth (ancho del haz) del haz direccional. Esto reduce la probabilidad de la interferencia del canal común comparado con un sistema que utiliza antenas de estación base omnidireccional.

La interferencia puede ser rechazada usando haces direccionales y/o formando nulos en la estación base recibiendo el patrón de antena en dirección a los usuarios interferidos en el canal común. La reducción de la interferencia y el rechazo pueden permitir que el número de celdas por cluster sea reducido, aumentando la capacidad del sistema. [54]

La reducción de la interferencia puede ser aplicada utilizando un array con haces guiados o cambiados. Utilizando haces direccionales para comunicarse con móviles en

el downlink, una estación base es menos probable de intervenir con estaciones base de canal común que si utilizara una antena omnidireccional. Podemos representarlo en la figura 6.11. Teóricamente, el número de celdas por cluster puede ser disminuido, aumentando la eficiencia y la capacidad espectral como muestra la figura 6.12.

Habrà un pequeño porcentaje de tiempo durante el cual la interferencia del canal común es fuerte pudiéramos decir cuando un móvil esta dentro del haz principal de una estación base cercana. Esto puede ser reducido rechazando (handing off) el móvil dentro de su celda actual a otro canal que no experimenta fuerte interferencia en su canal común. [52]

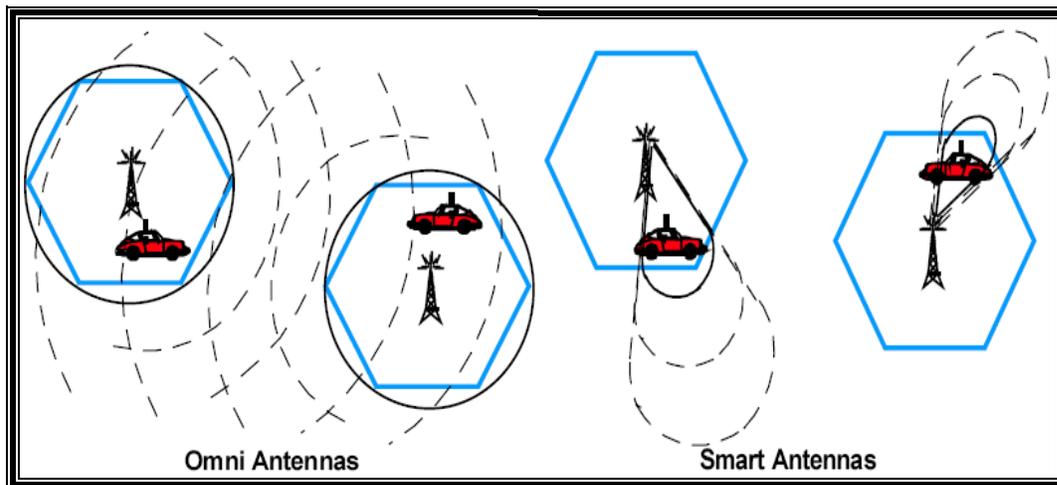


Figura 6.11 Reducción de interferencia utilizando antenas inteligentes: haz direccional interfiere con pocas celdas.

### 6.3.1.3 Otros Beneficios.

- ❖ *Mejora de la seguridad.* Gracias a que la transmisión entre la estación base y el terminal móvil es direccional, no será posible que un equipo ajeno intercepte la comunicación, a menos que se sitúe en la misma dirección en la que apunta la antena. Además, sería posible una localización precisa de usuarios que estuvieran realizando un uso fraudulento de los servicios ofertados por la red de comunicación móvil. [55]

- ❖ *Introducción de nuevos servicios.* Cuando utilizamos las antenas inteligentes la red tendrá el acceso a la información espacial sobre los usuarios es posible que esta información pueda ser usada para estimar las posiciones de los usuarios mucho mas exactas que en redes existentes, también es posible pensar en servicios tales como la radio localización en llamadas de emergencia, tarificación geográfica, publicidad de servicios cercanos, información en lugares turísticos, gestión avanzada de flotas entre otros servicios. [55]

#### **6.3.1.4 Inconvenientes de las antenas inteligentes.**

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

- ❖ *Mayor complejidad de los transceptores.* En comparación con los sistemas radiantes convencionales, los sistemas de antenas inteligentes son mucho más complejos y difíciles de diseñar; es evidente que un transceptor de antena inteligente es mucho mas complejo que un transceptor de estación base tradicional. Será necesaria una cadena de transmisión/recepción independiente para cada elemento del *array*, y todas ellas deberán estar balanceadas y calibradas en tiempo real. Además, es imprescindible el uso de potentes procesadores (DSPs, por ejemplo) para ejecutar los algoritmos de optimización, conformación de haz, detección del ángulo de llegada, etc. En definitiva, se llega a la conclusión de que no será posible diseñar independientemente el sistema radiante y la propia estación base. [55]
- ❖ *Tamaño físico* Para que una antena inteligente obtenga una ganancia razonable, es necesario un arreglo de antenas con varios elementos. Típicamente se han sugerido arreglos que consisten de seis a diez elementos, los mismos que deberán estar separados horizontalmente al aire libre para ambientes móviles. [51]

- ❖ *Dirección del Recurso* Las antenas inteligentes son principalmente una tecnología de radio, esto implica también nuevas demandas en funciones de las redes tales como recursos y dirección de movilidad. Cuando se inicia una nueva conexión o la conexión existente es entregada a una nueva estación base, ninguna información angular está disponible en la nueva estación base. Esto puede ser manejado permitiendo a la estación base un barrido continuo a través de la célula con un haz de "búsqueda" que busca a candidatos para una nueva conexión o un "handover".
- ❖ *Planificación de la Radio* Para que las antenas inteligentes puedan tener la ganancia deseada las estaciones base deben poder separar a los usuarios en el dominio angular. Esto significa que algunas de las estrategias actuales para planificación de radio necesariamente deben ser modificadas.

## **6.4 Modos de Aplicación en Redes de Comunicación Móviles.**

La introducción de esta tecnología (Antenas Inteligentes) en una red de comunicaciones móviles. Podremos encontrar tres modos de aplicarla, en función del grado de aprovechamiento de la selectividad espacial que ofrece ([42], [44] y [45]):

### **6.4.1 Receptor de alta sensibilidad (HSR).**

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

- ❖ La primera: al mejorar la sensibilidad en el enlace ascendente, aumentará la extensión de la zona de cobertura. Esta mejora podría llegar a ser tan grande como para que fuera el enlace descendente el más restrictivo a la hora de calcular la cobertura de una estación base.

- ❖ La segunda: la mayor ganancia de la antena significa también que los móviles más cercanos podrían emitir con menor potencia manteniendo la calidad del enlace, con el consiguiente ahorro de baterías.
- ❖ Por último, se lograría una mejora de la relación C/I, lo que implicaría menores tasas de error y una mejor calidad. No podría emplearse la mejora en la C/I para incrementar la capacidad de un sistema CDMA, ya que dicha mejora sólo está presente en el enlace de subida y no en el de bajada.

#### **6.4.2 Rechazo de interferencias por filtrado espacial (SFIR).**

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

#### **6.4.3 Acceso múltiple por división espacial (SDMA).**

Esta sería la configuración más compleja, pues consiste en aprovechar al máximo las propiedades de selectividad espacial de las antenas de ambos enlaces para ubicar simultáneamente a varios usuarios en el mismo canal. Es decir, que podría haber varios usuarios utilizando al mismo tiempo la misma frecuencia y el mismo código de *scrambling* (o el mismo *timeslot* en GSM), estando discriminados únicamente por su posición angular respecto de la estación base.

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

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

La aplicación de SDMA a UMTS es bastante dudosa: al ser un sistema CDMA existen gran cantidad de usuarios compartiendo simultáneamente la misma frecuencia y que se distinguen sólo por su código de *scrambling*. Por tanto, sería muy complejo implementar un sistema capaz de diferenciar a cada usuario por su situación espacial, además de poco necesario, ya que los códigos de *scrambling* producen una separación suficiente y existen códigos de sobra para todos los usuarios.

# CONCLUSIONES

---

---

Los sistemas de telefonía móvil han encontrado inconvenientes en la prestación de servicios debido al subdimensionamiento de las redes, provocando problemas de: capacidad, cobertura e interferencia.

La alternativa actuales son los “Sistemas de Antenas Inteligentes”, que propone eliminar los inconvenientes en la telefonía móvil y logrando un máximo desarrollo de servicio. El SAS es una tecnología que aumenta el alcance y la capacidad de las estaciones base, dando como resultados: nuevos servicios, mayor seguridad, beneficios económicos, ecológicos y tecnológicos en los sistemas de comunicaciones móviles.

La antena inteligente, no presenta inteligencia alguna, su inteligencia se basa en la utilización de algoritmos adaptativos. Los algoritmos adaptativos, favorecen a la conformación de haces, optimización de recursos, control, procesamiento de señales y continuo de los sistemas.

Desde el punto de vista de eficiencia, las antenas inteligentes son una solución tecnológica adecuada para la optimización de la potencia de radiación. Con la utilización de procesadores de alta capacidad, se posibilita la formación de haces directos, estrechos y enfocados solo al usuario deseado.

Las antenas inteligentes permiten un aumento de capacidad en los sistemas actuales de telefonía móvil. Su aplicación conjunta con SDMA y algoritmos adaptativos prevé la posibilidad que los sistemas con TDMA y CDMA multipliquen sus capacidades por 3 y 5 veces respectivamente. A pesar del incremento en el número de usuarios, la interferencia entre células adyacentes no constituiría un problema, debido al enfoque y directividad de los haces radiados por el sistema.

---

En lo que se refiere a la calidad de los sistemas de telefonía móvil, la tecnología de antenas inteligentes mejoran las transmisiones de voz, datos y video. Reduciendo los efectos de multitrayectoria e interferencias de señales, el intercambio de tráfico entre usuario y radio base se vuelve fluido. De igual manera la utilización de algoritmos de “beamforming”, receptores sensibles y técnicas de acceso al canal, permiten que la funcionalidad de los sistemas alcance un óptimo desarrollo.

Los algoritmos utilizados en la tecnología de antenas inteligentes son flexibles, pueden ser programados de manera que las antenas enfoquen sus señales en determinadas zonas; evitando radiar las señales en lugares donde la información pueda ser violentada.

El aporte que hace el sistema de antenas inteligentes es una solución adecuada en las comunicaciones móviles y en muchas otras áreas tecnológicas. A corto plazo las telecomunicaciones tendrán una fortaleza en la utilización de esta nueva tecnología, su total desarrollo e implementación mejorarán el desempeño de las actuales redes de telefonía móvil, cumpliendo los objetivos con que fueron ideadas.

# GLOSARIO

---

---

<b>Ancho de banda</b>	Espectro de frecuencias a los que emite la antena. En los radares de subsuelo, normalmente el ancho de banda es del orden de la frecuencia central.
<b>Anchura del lóbulo:</b>	Haz de 3 dB.
<b>Antena:</b>	Parte del radar de subsuelo utilizada para emitir hacia el interior del medio la energía que les suministra la unidad de control en forma de potencia, con la direccionalidad y las características adecuadas a la aplicación deseada. También han de recibir la parte de energía que se refleja en las discontinuidades electromagnéticas del medio y regresa hacia la superficie.
<b>Antenas alámbricas:</b>	Construidas mediante hilos conductores que soportan las corrientes que dan lugar a los campos magnéticos radiados. La disposición de estos hilos puede ser variada. Las antenas de georradar suelen funcionar a base de una espira con forma de mariposa.
<b>Antenas de apertura:</b>	La onda se genera mediante una disposición de campos que se excitan mediante guías de ondas. Suelen estar asociadas a un reflector y son las habituales en telecomunicaciones.
<b>Antenas de media longitud de onda:</b>	Antenas con una espira que funciona como un dipolo y que emite una onda cuya longitud en el vacío es el doble de la longitud máxima de la espira
<b>Antenas direccionales:</b>	Antenas que presentan direcciones privilegiadas de radiación.
<b>Antenas isotrópicas:</b>	Antenas que radian en todas las direcciones del espacio por igual.
<b>Atenuación:</b>	Disminución de la energía de una onda (y por lo tanto, también de su amplitud) durante la propagación por un medio. Generalmente, las principales causas de atenuación son la absorción del medio y la expansión geométrica del frente de ondas
<b>Banda de frecuencias</b>	Porción del espectro radioeléctrico que contiene un conjunto de frecuencias determinadas

---

<b>Beamwidth</b>	Abertura (angular) del haz de antena. Ángulo entre dos puntos opuestos del haz de radiación de una antena, en los que la potencia es igual a la mitad de la potencia en la dirección de máxima radiación. SIN. half-power width.
<b>Broadcasting</b>	Radiodifusión. Transmisión radioeléctrica, destinada a ser recibida por el público en general; transmisión simultánea de señales radioeléctricas a un número ilimitado de aparatos receptores. Las emisiones de radiodifusión son generalmente de índole recreativa, informativa, cultural o cívica y pueden incluir programas musicales, deportivos, de radioteatro, de participación del público, de variedades, de transmisión de actos o espectáculos desde el lugar donde se desarrollan, así como radionovelas, noticiarios, charlas, etc.
<b>Células:</b>	Regiones en las cuales está instalada una estación de radio.
<b>Conectividad:</b>	Posibilidad de establecer rutas de comunicación entre distintos puntos de una red o entre distintas redes de comunicaciones o entre usuarios de una o de varias redes.
<b>Diagrama de radiación:</b>	Representaciones gráficas del frente de ondas que radia una antena en las diferentes direcciones del espacio.
<b>Directividad de una antena</b>	Parámetro que caracteriza a las antenas direccionales. Cociente de la densidad de potencia que se tiene a una cierta distancia de la antena direccional emisora y la densidad de potencia que se tendría en el mismo punto si la antena emisora fuese isotrópica y radiase la misma potencia que la direccional.
<b>Eficiencia de la antena:</b>	Parámetro que relaciona la ganancia con la directividad de una antena. Da una estimación de las pérdidas de potencia que tienen lugar en el interior de la antena.
<b>Espectro radioeléctrico</b>	El espacio que permite la propagación sin guía artificial de ondas electromagnéticas cuyas bandas de frecuencias se fijan convencionalmente por debajo de los 3,000 gigahertz.
<b>Ganancia de una antena</b>	Cociente entre la potencia máxima radiada por la antena por unidad de ángulo sólido y la potencia total distribuida por la antena en todo el espacio.
<b>Haz de 3 dB:</b>	Distancia angular entre las direcciones del diagrama de radiación donde la potencia es la mitad del valor máximo. Esta potencia equivale aproximadamente a 3 dB menos que el valor máximo de la potencia.

---

<b>Interferencia</b>	Efecto de una energía no deseada debida a una o varias emisiones, radiaciones, inducciones o sus combinaciones sobre la recepción de un sistema de radiocomunicación, que se manifiesta como degradación de la calidad, falseamiento o pérdida de la información que se podrá obtener en ausencia de esta energía no deseada.
<b>Lóbulo principal:</b>	Zona del espacio donde la radiación es máxima
<b>Lóbulos secundarios:</b>	Zonas que rodean al lóbulo principal y que presentan una amplitud menor.
<b>Microondas:</b>	Frecuencias de las bandas de UHF, SHF y EHF. Entre 300 MHz y 300 GHz.
<b>Potencia en antena</b>	(1) Potencia entregada a la antena por el emisor que la excita. (2) Cuadrado de la corriente circulante por un punto dado, multiplicado por la resistencia de la antena en el mismo punto de esta última.
<b>Reflector:</b>	Superficie donde se produce la reflexión de parte de la energía que incide. Estas superficies son discontinuidades bruscas de uno o varios parámetros electromagnéticos y, a menudo, separan diferentes unidades materiales de un medio.
<b>Zonas de Fresnel</b>	Zonas de la superficie iluminada que contribuyen en la reflexión; dependen de la separación entre el emisor y el reflector y de la longitud de onda de la señal incidente
<b>Wireless</b>	Radiocomunicación, comunicación inalámbrica.
<b>Wireless communication</b>	Comunicación inalámbrica (sin hilos), telecomunicación sin conductores, radiocomunicación

# ACRÓNIMOS

---

---

<b>A/D</b>	Conversor Analógico a Digital
<b>BER</b>	Tasa Binaria de Error
<b>CDMA</b>	Acceso Múltiple por División de Código
<b>C/I</b>	Relación Portadora a Interferencia
<b>DCS</b>	Sistema Digital de Comunicaciones
<b>DoA</b>	Dirección de Llegada
<b>DSP</b>	Procesador Digital de Señal
<b>GSM</b>	Sistema Global de Comunicaciones Móviles
<b>HPBW</b>	Ancho de Haz de Media Potencia
<b>PIRE</b>	Potencia Isotrópica Efectiva Radiada
<b>RF</b>	Radiofrecuencia
<b>SDMA</b>	Acceso Múltiple por División Espacial
<b>SFIR</b>	Rechazo de Interferencias por Filtrado Espacial
<b>SINR</b>	Relación Señal a Ruido más Interferencia
<b>SNR</b>	Relación Señal a Ruido
<b>UMTS</b>	Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles

# REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

---

- [1] Murillo Fuentes Juan J.: “Teoría de la señal y Comunicaciones”: Universidad de Sevilla, Junio 2003.
- [2] <http://www.marconicalling.com/introstring.htm>
- [3] C. A. Balanis, “Antenna Theory: Analysis and Design”. John Wiley & S., 2ª edición, 1997.
- [4] IEEE, “Standard Definitions of Terms for Antennas,” IEEE Std. 145–1993.
- [5] Sierra C. Manuel, Besada S. José Luis, de Haro A. Leandro, “Radiación y Propagación”, Universidad Politécnica de Madrid, Julio 2004
- [6] Cardama Aznar Ángel “Antenas” Segunda edición: septiembre de 2002.
- [7] Frenzel E. Louis, “Principles of Electronic Communication Systems”, 2003
- [8] [http://www.zpenergy.com/downloads/Orig\\_maxwell\\_equations.pdf](http://www.zpenergy.com/downloads/Orig_maxwell_equations.pdf)  
“On the Notation of MAXWELL’s Field Equations”. January 2008.
- [9] Franco G. Ángel :El espectro electromagnético Universidad del País Vasco Octubre 2006.
- [10] Constantino Utreras, <http://cabierta.uchile.cl/libros/c-utreras/node16.html> “Teorema de Gauss y Flujo Eléctrico”
- [11] [http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/campo\\_electrico/linea/linea.htm](http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/campo_electrico/linea/linea.htm)
- [12] Feynman Richard, “Feynman lectures on Physics Volume 2”, Addison Wesley Longman. 1974
- [13] <http://www.sociedadelainformacion.com/departfqtobarra/magnetismo/inducccion/Inducccion.htm>
- [14] <http://tamarisco.datsi.fi.upm.es/ASIGNATURAS/FFI/apuntes/camposMagneticos/teoria/variables/variables2/variables2.htm>
- [15] <http://tamarisco.datsi.fi.upm.es/ASIGNATURAS/FFI/apuntes/camposMagneticos/teoria/variables/variables12/variables12.htm>

- 
- [16] Pérez I. Liliana– Física II- Dpto. de Física- Facultad de Ingeniería- UBA (2004)
- [17] Cardama Aznar Ángel. "Antenas", Universidad Politécnica de Cataluña. (2002)
- [18] Miguel Ferrando, Alejandro Valero. Depto. Comunicaciones. Universidad Politécnica de Valencia
- [19] Wayne Tomasi; Electronic Communications System: Fundamentals Through Advanced, Fifth Edition
- [20] Prof: Heddy Lu Giménez N. UFT. Universidad Fermín Toro Venezuela.
- [21] Ph.D. Bernal Iván; Revisión de Conceptos Básicos de Antenas y Propagación; Quito, Ecuador; 2008.
- [22] [www.carlosmezquida.com/word/wp-content/archive/Pagina\\_2\\_CAPITULO3.pdf](http://www.carlosmezquida.com/word/wp-content/archive/Pagina_2_CAPITULO3.pdf)
- [23] [www.itu.int/publications/](http://www.itu.int/publications/)
- [24] [http://www.ensenamexico.net/hector/it/reporte\\_antenas.php](http://www.ensenamexico.net/hector/it/reporte_antenas.php) Héctor Manuel Lara García; **Posgrado en Telemática UABC**
- [25] [http://es.wikipedia.org/wiki/Antena\\_Yagi](http://es.wikipedia.org/wiki/Antena_Yagi)
- [26] <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4040050/Descargas/capseis/yagiuda.pdf>
- [27] <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4040050/Descargas/capseis/antenahelicoidal.pdf>
- [28] Nakar, Punit Shantilal; Design of a compact Microstrip Patch Antenna for use in Wireless/Cellular Devices. Department of Electrical and Computer Engineering, Florida state university
- [29] Stutzman, W.L. and Thiele, G.A., Antenna Theory and Design, John Wiley & Sons, Inc, 1998.
- [30] <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4040050/Descargas/capseis/antenparabolicas.pdf>
- [31] [http://antenasparatodos.blogspot.com/2008\\_06\\_01\\_archive.html](http://antenasparatodos.blogspot.com/2008_06_01_archive.html)
- [32] Kumar, G. and Ray, K.P., Broadband Microstrip Antennas, Artech House, Inc, 2003.

- 
- [33] Garg, R., Bhartia, P., Bahl, I., Ittipiboon, A., *Microstrip Antenna Design Handbook*, Artech House, Inc, 2001.
- [34] J. R. Risser, "*Dielectric and metal-plate lenses*", Chapter 11, *Microwave Antenna Theory and Design*, S. Silver, Ed. MIT Radiation Laboratory Series, vol. 12, New York: McGraw-Hill, 1949
- [35] H. Jasik, "*Antenna engineering handbook*", Mc-Graw Hill, Chapter. 14 et 15, 1961
- [36] R. E. Collin, F. J. Zucker, "*Antenna theory*", Mc-Graw Hill, Chapter. 18, 1969
- [37] D. L. Sengupta, R. E. Hiatt, "*Reflectors and lenses*", Chapitre 10, *Radar Handbook*, M. I. Skolnik, Ed. New York: McGraw-Hill, 1970
- [38] E. M. T. Jones, "Paraboloid reflector and hyperboloid lens antennas", *IRE trans. on Antennas and Propagation*, pp. 119-127, Juillet 1954
- [39] K. Chang, "*Handbook of microwave and optical components*", vol. 1 "*Microwave passive and antenna components*", Wiley, New York, chap. 11 (J. J. Lee), 1989.
- [40] R. H. ROY, "An Overview of Smart Antenna Technology: The next Wave in Wireless Communications" 1998 *IEEE Aerospace Conference*, Vol. 3 May 1998.
- [41] H. Krim, M. Viberg; *IEEE Signal Process. Mag.*, July 1996
- [42] P. H. Lehne and M. Pettersen, "An overview of smart antenna technology for mobile communications systems," *IEEE Communications Surveys*, vol. 2, no. 4, Fall Quarter 1999.
- [43] S. Bellofiore, "Smart antenna systems for mobile platforms," Ph.D. dissertation, Arizona State University, Dec. 2002.
- [44] B. SALAS, M. PIZARROSO: *Antenas inteligentes como solución a problemas de calidad y capacidad en redes celulares y de acceso sin hilos*. VIII Jornadas Telecom I+D, septiembre de 1998.
- [45] M. CHRYSSOMALLIS: *Smart antennas*. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 42, n° 3, Jun. 2000.
- [46] Introduction to Smart Antennas Constantine A. Balanis, Panayiotis I. Ioannides; Department of Electrical Engineering, Arizona State University
- [47] A. O. Boukalov and S. G. Haggman, "System aspects of smart-antenna technology in cellular wireless communications – an overview," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 48, no. 6, June 2000.

---

[48] J. C. Liberti and T. S. Rappaport, *Smart Antennas for Wireless Communications: IS-95 and Third Generation CDMA Applications*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR, 1999.

[49] Ing. Montoya Figueroa Artículo “La Telefonía Celular”; ELECTRÓNICA y servicio Año 2000

[50] Edwin Wright and Deon Reynders; “Practical Telecommunications and Wireless Communications”, IDC Technologies, Perth, Australia.

[51] Ortega C. Patricio. Ing., Enríquez P Oscar, Ing.; “Estudio de las Antenas Inteligentes y Principales Aplicaciones”; XIX Jornada en Ingeniería Eléctrica y electrónica.

[52] Dietrich, Jr., Carl B. “Adaptive Arrays and Diversity Antenna Configurations for Handheld Wireless Communication Terminals”; Electrical and Computer Engineering; PhD;

[53] I. Stevanović, A. Skrivervik, and J. R. Mosig, “Smart antenna systems for mobile communications,” Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Suisse, Tech. Rep., Jan. 2003. [Online]. Available: <http://lemawww.epfl.ch>

[54] S. C. Swales, M. A. Beach, and D. J. Edwards, "Multi-Beam Adaptive Base-Station Antennas for Cellular Land Mobile Radio Systems," 39th IEEE Vehicular Technology Conference, Vol. 1, pp. 341-348, 1989.

[55] Moreno J. Oscar; Franco M. Ignacio. “Telefonía investigación y desarrollo. Telefonía Móvil en España”.