



Escuela  
Politécnica  
Superior

# Diseño y Análisis de un Array de Antenas tipo Parche en Tecnología Microstrip



Grado en Ingeniería en Sonido e  
Imagen en Telecomunicación

## Trabajo Fin de Grado

Autor:

Javier Martínez Manzano

Tutor/es:

Stephan Marini

Miguel Angel Sanchez Soriano

Noviembre 2019



# Diseño y Análisis de un Array de Antenas tipo Parche en Tecnología Microstrip

---

## Autor

Javier Martínez Manzano

## Tutor/es

Stephan Marini

*Dpto. de Física, Ing. Sistemas y Teoría de la Señal*

Miguel Angel Sanchez Soriano

*Dpto de Física, Ing. Sistemas y Teoría de la Señal*



Grado en Ingeniería en Sonido e Imagen en Telecomunicación



Escuela  
Politécnica  
Superior



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

ALICANTE, Noviembre 2019



# Índice general

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. Introducción</b>                                  | <b>1</b>  |
| 1.1. Las Telecomunicaciones . . . . .                   | 1         |
| 1.2. Teoría de ondas y señales . . . . .                | 2         |
| 1.3. Las comunicaciones móviles . . . . .               | 6         |
| 1.3.1. Las primeras generaciones de telefonía . . . . . | 6         |
| 1.3.2. La tercera generación . . . . .                  | 8         |
| 1.3.3. Actualidad, la cuarta generación . . . . .       | 8         |
| 1.3.4. El futuro, la quinta generación . . . . .        | 9         |
| 1.4. Motivación . . . . .                               | 10        |
| 1.5. Estructura del proyecto y metodología . . . . .    | 11        |
| <b>2. Teoría de Antenas</b>                             | <b>13</b> |
| 2.1. Conceptos básicos . . . . .                        | 13        |
| 2.2. Caracterización de antenas . . . . .               | 16        |
| 2.2.1. Polarización . . . . .                           | 16        |
| 2.2.2. Impedancia . . . . .                             | 17        |
| 2.2.3. Diagrama de Radiación . . . . .                  | 19        |
| 2.2.4. Directividad . . . . .                           | 21        |
| 2.2.5. Ganancia . . . . .                               | 22        |
| 2.2.6. Eficiencia . . . . .                             | 22        |
| 2.2.7. Ancho de banda y pérdidas de retorno . . . . .   | 22        |
| 2.3. Tipos de antenas . . . . .                         | 24        |
| 2.3.1. Antenas de hilo . . . . .                        | 24        |
| 2.3.1.1. Antena dipolo . . . . .                        | 24        |
| 2.3.1.2. Antena Yagi-Uda . . . . .                      | 24        |
| 2.3.1.3. Monopolio . . . . .                            | 25        |
| 2.3.2. Antenas de apertura . . . . .                    | 27        |
| 2.3.2.1. Bocinas . . . . .                              | 27        |
| 2.3.2.2. Reflectores . . . . .                          | 28        |
| <b>A. Anexo I</b>                                       | <b>33</b> |
| <b>B. Páginas horizontales</b>                          | <b>35</b> |
| <b>C. Importar PDF</b>                                  | <b>39</b> |



# Índice de figuras

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1.1.  | James Clerk Maxwell (1831 - 1879) . . . . .   | 2  |
| 1.2.  | Ejemplo de función senoidal . . . . .   | 4  |
| 1.3.  | Representación esquemática de una Onda Electromagnética . . . . .   | 5  |
| 1.4.  | Martin Cooper (Motorola) junto a teléfonos móviles de primera generación . . . . .  | 7  |
| 1.5.  | Stadika: Concepto de diseño de Small Cells 5G para la ciudad de Helsinki . . . . .  | 11 |
| 2.1.  | Proceso de separación de campo eléctrico . . . . .  | 14 |
| 2.2.  | Antenas dipolo de media onda . . . . .  | 15 |
| 2.3.  | Onda electromagnética polarizada linealmente . . . . .  | 16 |
| 2.4.  | Onda electromagnética polarizada circularmente . . . . .  | 17 |
| 2.5.  | Onda electromagnética polarizada elípticamente . . . . .  | 17 |
| 2.6.  | Circuito equivalente de una antena transmisora . . . . .  | 18 |
| 2.7.  | Ejemplo de patrones de radiación en los planos E y H para antena dipolo . . . . .   | 19 |
| 2.8.  | Comparación de los parámetros del diagrama de radiación en planos cartesianos y polares . . . . .   | 20 |
| 2.9.  | Principales patrones de radiación . . . . .   | 21 |
| 2.10. | Representación gráfica de curva de parámetro S y ancho de banda de la antena . . . . .  | 23 |
| 2.11. | Conjunto de antenas dipolo . . . . .  | 25 |
| 2.12. | Diagramas de radiación del dipolo según su longitud . . . . .   | 26 |
| 2.13. | Antenas Yagi . . . . .  | 26 |
| 2.14. | Esquema de instalación de un monopolo . . . . .   | 27 |
| 2.15. | Diagrama de radiación 3D de un monopolo . . . . .   | 28 |
| 2.16. | Monopolo para transmisión de AM . . . . .   | 29 |
| 2.17. | Bocina para comunicación satelital construida en 1959 por los laboratorios Bell . . . . .   | 30 |
| 2.18. | Antena parabólica del IRAM en Sierra Nevada, parte del proyecto Event Horizon para capturar la primera fotografía de un agujero negro . . . . . | 31 |



# **Índice de tablas**



# **Índice de Códigos**



# 1. Introducción

A lo largo de este trabajo de final de grado se van hacer alusiones a parte de los conceptos básicos de Ingeniería de Telecomunicaciones que han sido impartidos durante el grado. Es por ello que en esta introducción se realizará un repaso de estos conceptos, términos y teorías imprescindibles para poder realizar y entender este estudio.

Se realizará también una breve contextualización del proyecto para dar a entender la necesidad de esta tecnología de antenas para la nueva generaciones de comunicación móvil en actual desarrollo: El 5G.

## 1.1. Las Telecomunicaciones

Para entender el concepto de "Telecomunicación" es importante fijarse en cómo la etimología de la palabra nos lleva hasta su raíz: *Comunicación*. La comunicación, en su significado más primitivo, es el proceso de intercambio de información entre dos sujetos definidos: Un emisor que genera y emite esta información, y un receptor que la recibe y la procesa. Además, en el proceso de comunicación siempre vamos a encontrar un tercer interviniente: El medio, encargado de transportar la información entre ambos sujetos. Por otro lado, nos queda el prefijo *Tele*, proveniente del Griego: Lejos o Distancia. Se si regresa a la palabra original se puede definir el concepto de *telecomunicación* como: El proceso de intercambio de información a distancia, y aunque es una definición correcta, dista del concepto de "Telecomunicaciones" que es utilizado día a día el cual, trae consigo la incursión de la tecnología en él. Es por ello que la Real Academia Española (RAE) define el concepto de *telecomunicación* como:

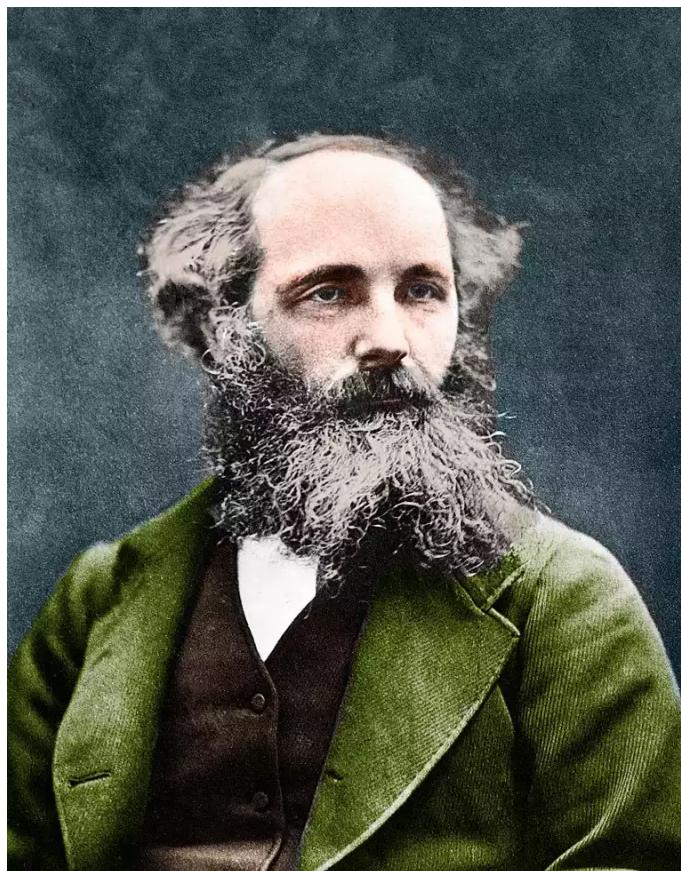
Sistema de transmisión y recepción a distancia de señales de diversa naturaleza por medios electromagnéticos.

En esta nueva definición incluimos un nuevo concepto imprescindible para poder adentrarnos a las telecomunicaciones actuales: El electromagnetismo o la interacción entre campos eléctricos y magnéticos. Este último concepto hace que se pueda entender actualmente a las telecomunicaciones como una rama científica que estudia la transmisión de información, no entre sujetos personales como se han entendido hasta ahora, sino entre máquinas. Cualquier máquina ahora podrá actuar como un sujeto transmisor, que podrá emitir información codificada de una manera determinada de forma que uno o más receptores sean capaces de recibir, decodificar y procesar esta información de manera automática.

El electromagnetismo es la rama de la ciencia encargada de estudiar la interacción entre partículas. El conjunto de fenómenos electromagnéticos que se conocen hoy en día fueron estudiados por científicos como H.C. Ørsted, André-Marie Ampère o Michael Faraday y unificados por James Clerk Maxwell (Fig: 1.1) en su obra de 1865, *A dynamical theory of the*

cargadas con  
campos eléctri-  
cos y magnéti-  
cos

*electromagnetic field*, donde se recogen las cuatro ecuaciones denominadas como "Ecuaciones de Maxwell". La transmisión de la comunicación entre máquinas se realizará mediante impulsos eléctricos que, dada su naturaleza a variar con el tiempo y teniendo en cuenta esta teoría, se transformaran en impulsos magnéticos y viceversa. Estos impulsos electromagnéticos se transmitirán a través de un medio, en forma de ondas electromagnéticas. A lo largo de los siguientes capítulos se estudiará con más detenimiento los conceptos relacionados con las ondas y el medio.



**Figura 1.1:** James Clerk Maxwell (1831 - 1879)

## 1.2. Teoría de ondas y señales

Como se mencionó anteriormente, en el proceso de comunicación en el ámbito de las telecomunicaciones la información se envía en forma de señales. Se consideran las señales como un conjunto de impulsos electromagnéticos transmitidos por un emisor y codificados de una manera determinada para que el o los receptores a los que vaya dirigido puedan procesar la información contenida en una señal o conjunto de ellas. Esta información transmitida en forma de señales es el mensaje.

---

Una señal electromagnética se caracteriza por el hecho de variar su intensidad en el dominio temporal. El ejemplo más básico lo encontramos en la onda Seno o Coseno de la figura 1.2. De esta señal es posible obtener tres parámetros básicos imprescindibles para describir cualquier señal: Amplitud, frecuencia y fase. Se define la amplitud como la variación máxima respecto a un origen determinado y es medido en una magnitud física concreta, en el caso mencionado, la amplitud sería de una unidad, pudiendo ser esta voltios o vatios entre otros. Al tratarse de una señal oscilante aparece el concepto de frecuencia como el número de veces que la señal vuelve a su origen en un tiempo determinado de 1 segundo, la unidad de medida de este parámetro es el *hertzio* (**Hz**), para el caso mencionado, la frecuencia de la onda es de 1 Hz, puesto que en un segundo la onda realiza un ciclo completo. Finalmente, se denomina fase al concepto de adelanto o retraso de la onda en el dominio temporal con respecto a un origen determinado, normalmente es representado mediante el símbolo *phi* ( $\Phi$ ) y es medido en grados o radianes según sea conveniente, para el caso mencionado la fase sería  $0^\circ$ , puesto que se conoce que una onda seno tiene origen en este valor y no se aprecia ningún adelanto o retraso en la onda mencionada con respecto a este.

Es posible agrupar estos parámetros en forma de ecuación analítica para el caso de una onda simple sin perdidas físicas ni amortiguación y con un movimiento armónico simple como:

$$x(t) = A \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \phi) \quad (1.1)$$

A partir de los parámetros básicos de las ondas es posible el desarrollo de otros parámetros alternativos que facilitan su comprensión y análisis como son: La longitud de onda, definida como la distancia entre los picos o valles de una onda o el periodo, definido como el tiempo que tarda una onda en recorrer un ciclo completo. Estos dos nuevos parámetros se representan en las ecuaciones 1.2a y 1.2b donde  $c$  es la velocidad de la onda y  $f$  la frecuencia de esta.

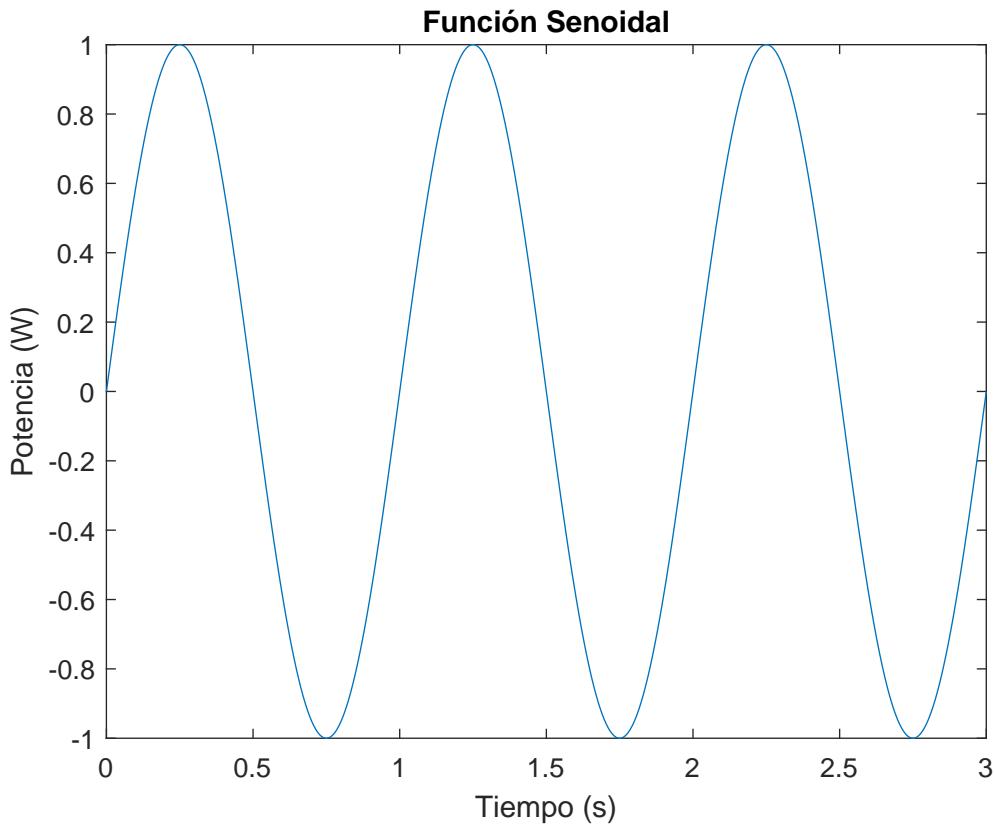
$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.2a)$$

$$T = \frac{1}{f} \quad (1.2b)$$

Pero ondas como la que se hacen referencia en la figura 1.2, cuyo tipo de movimiento es el movimiento armónico simple, no reflejan la realidad y la complejidad de las ondas reales que se usarán para la transmisión de información mediante ondas electromagnéticas. Otros conceptos como la atenuación o la amortiguación han de ser tomados en cuenta para describir con mayor precisión el comportamiento de las ondas en medios de transmisión reales como el aire. Si nos centramos en las Ondas Electromagnéticas (O.E.M), encargadas de transportar los mensajes en forma de energía electromagnética, encontramos que el medio en el que se propagan, no tiene ser necesariamente el aire, ya que estas se pueden propagar en el vacío. En este medio, las O.E.M se propagarán a una velocidad de 300 000 000 m/s, o más conocida como la velocidad de la luz, ya que la luz en sí es una onda electromagnética.

porque por qué

Cuando analizamos un conjunto de partículas subatómicas (electrones o protones) se puede comprobar como a sus alrededores se producen campos eléctricos debido a la interacción entre estos, de repulsión o atracción. A su vez, esta interacción en forma de movimiento de

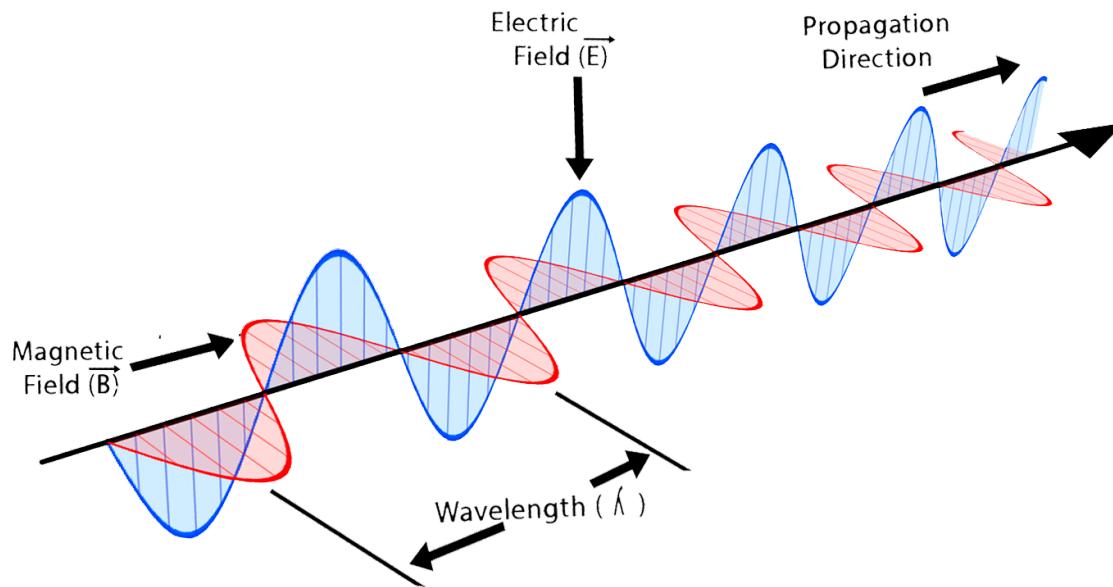


**Figura 1.2:** Ejemplo de función senoidal

las partículas, produce un campo magnético sobre estas. Es entonces donde, la suma de ambos campos debido a las interacciones entre partículas producen campos electromagnéticos, medio donde se propagaran las O.E.M.

Las O.E.M poseen ciertas características que las describen como son su velocidad de fase y grupo, no teniendo por qué ser iguales, ni a su vez iguales a la velocidad de propagación en el vacío. Su vector de propagación, el cual apunta la dirección en la que se dirige una onda y cuya magnitud es el número de onda. O su polarización, propiedad que aparecen en las ondas transversales como es el caso de las electromagnéticas. Por convención, cuando se habla de polarización de una O.E.M nos referimos a la dirección del campo eléctrico. Existen tres tipos de polarizaciones principales: Lineal, circular y elíptica, y es importante remarcar que a lo largo de este estudio todas las antenas a analizar y estudiar serán diseñadas para trabajar con polarización lineal, si una O.E.M de una polarización distinta a la acordada intentara resonar en nuestra antena esta no llegaría a ser captada correctamente y la atenuación producida no permitiría una posible de codificación de esta.

Hasta el momento solo se ha mencionado las señales como mensajes codificados en O.E.M que varían en el dominio temporal, pero gracias al matemático *Joseph Fourier* (1768 - 1830), se pudo empezar a estudiar las ondas desde otro dominio: La frecuencia. Fourier desarrolló



**Figura 1.3:** Representación esquemática de una Onda Electromagnética

una serie de transformaciones matemáticas capaces de convertir las expresiones analíticas descritas en un dominio temporal a un dominio frecuencial y viceversa, a las que se denominaron como: *Transformadas de Fourier*, basadas en el *Teorema de Fourier* el cual señala que cualquier señal periódica puede descomponerse mediante una suma infinita de funciones de tipo sinusoidal ponderadas de forma determinada en amplitud y fase y cuyas frecuencias estén relacionadas armónicamente con la frecuencia fundamental de la onda a analizar.

Gracias a la Transformada de Fourier podemos analizar y sintetizar cualquier onda independientemente de su naturaleza física o matemática, y aunque no será usada como tal a lo largo de este trabajo, se hace necesario remarcar la importancia de este desarrollo matemático y la imprescindible contribución hacia el desarrollo de áreas como la acústica o las telecomunicaciones ya que todo avance realizado en esta materia tiene intrínseca la participación de la Transformada de Fourier, como es en nuestro caso, en el que toda representación de señales se realizará en el dominio frecuencial.

Para terminar con el proceso de intercambio de información se hace indispensable mencionar al medio el cual puede tener dos naturalezas: Guiado o radiado. El medio guiado o alámbrico es aquel que depende de una superficie conductora para transmitir la información, por lo general, un cable con propiedades conductoras como cobre u oro, pero también entran en esta categoría la fibra óptica, que transmite por sus filamentos los mensajes codificados en impulsos de luz.

Por otro lado tenemos el medio radiado o también denominado inalámbrico o no guiado, cuyo medio de transporte son los campos electromagnéticos. En este medio no es posible observar las ondas viajar por el espacio, exceptuando el rango de frecuencias correspondiente a

la luz visible dentro del espectro electromagnético. Una de las principales propiedades de este medio es que las ondas que viajan a distinta frecuencia son inmunes entre sí a interferirse, lo que permite que los mensajes lleguen del emisor al receptor sin apenas haber sido afectadas en su trayecto por otros mensajes viajando por el campo electromagnético. A partir de ahora el papel del emisor y receptor será tomado por las antenas, las cuales serán capaces de enviar o recibir señales transmitidas en el campo electromagnético en una o varias frecuencias o longitudes de onda. Es por esto que las antenas quedan ahora como los elementos claves para la transmisión de información inalámbrica.

En la actualidad existen varios tipos de antena, como estudiaremos más detenidamente en el tema 3, y cada uno de ellas se adaptará más específicamente a nuestras necesidades de directividad, ganancia, ancho de banda o eficiencia entre otros. En el estudio que nos ocupa, se diseñará un array de parches en tecnología microstrip que será capaz de trabajar a las frecuencias especificadas para la 5<sup>a</sup> Generación (5G) de comunicaciones móviles por el 3rd Generation Partnership Project (3GPP).

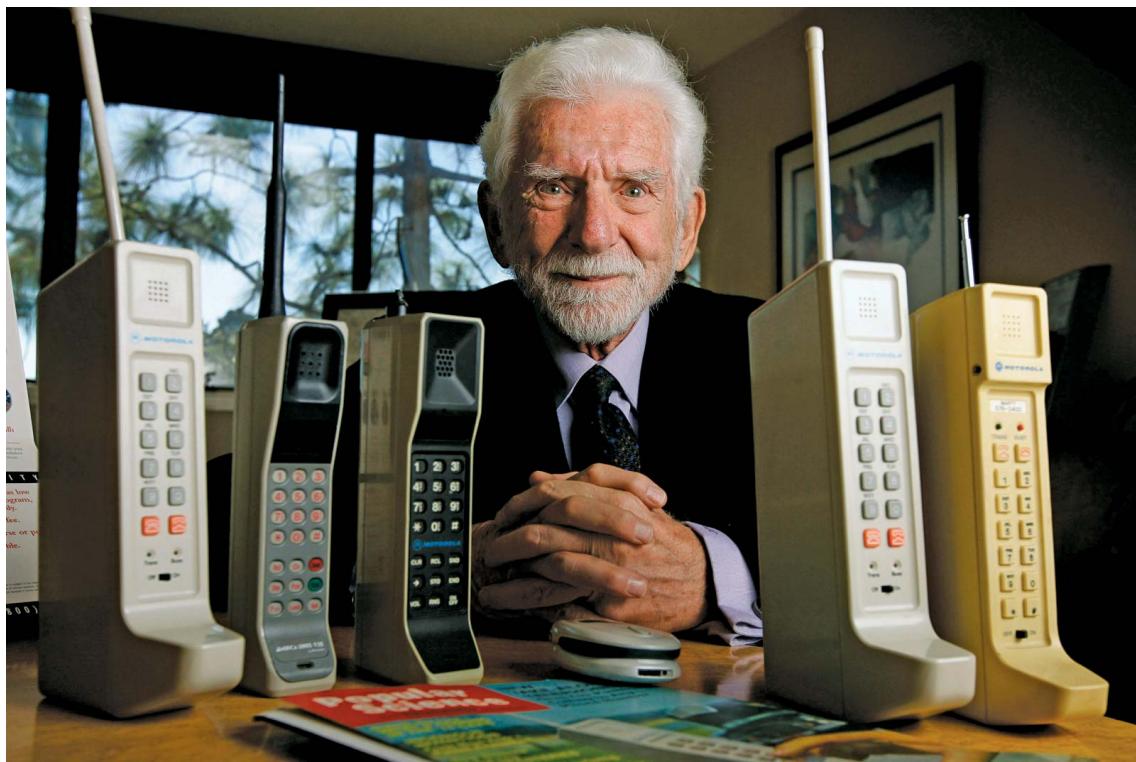
## 1.3. Las comunicaciones móviles

### 1.3.1. Las primeras generaciones de telefonía

Las comunicaciones inalámbricas han supuesto una revolución desde su aparición a finales del S.XX hasta la actualidad. El avance de la tecnología, la miniaturización de los componentes, la necesidad de comunicación internacional e incluso las competencias económicas han sido factores claves en la evolución de las comunicaciones móviles. Al hablar de comunicaciones móviles se incluyen en su espectro desde aquellas primeras comunicaciones analógicas como el *Walkie Talkie* o la 1<sup>a</sup> Generación (1G) hasta los métodos actuales más avanzados como la 4<sup>a</sup> Generación (Long Term Evolution) (4G LTE), comunicaciones vía satélite o Voice over IP (VoIP). Si se estrecha el círculo al ámbito de la telefonía móvil se puede observar como desde los años 80 distintos estándares de comunicaciones móviles han sido adoptados de la mano de la tecnología disponible en la época e incluso obligando a esta a mejorar para conseguir unos mejores resultados sobre el estándar.

El 1G fue el primer estándar de telefonía móvil. Fue lanzado en 1979 por la Nippon Telegraph and Telephone (NTT) en Japón, donde rápidamente se extendió su uso desde su comienzo en el área metropolitana de Tokyo hasta cubrir por completo el área de la isla. Dos años más tarde en 1981 la Nordic Mobile Telephone (NMT) empezó a desplegar esta red en países como Finlandia, Dinamarca o Noruega y más tarde extendiéndose hasta Rusia bajo su propio estándar. En Estados Unidos y Australia esta generación se desplegó bajo el estándar Advanced Mobile Phone System (AMPS) desarrollado por Motorola y en Reino Unido como Total Access Communications System (TACS). En España la Compañía Telefónica Nacional de España (CTNE) actualmente conocida como Telefónica, desplegó, bajo el servicio Moviline, su oferta de 1G mediante el estándar ETACS, una actualización del sistema TACS que incluía una nueva banda de frecuencias. Esta primera generación de telefonía móvil se basaba en el uso de la electrónica sólo en los servicios de red de acceso, ya que el resto de la red de comunicación se sostenía sobre la red analógica de telefonía ya existente en cada país, con lo

que solo se permitía el tráfico de voz sobre ella.



**Figura 1.4:** Martin Cooper (Motorola) junto a teléfonos móviles de primera generación

Tras una década, en el 1992, apareció el siguiente estándar de telefonía fue la 2<sup>a</sup> Generación (2G), donde se adoptaron sistemas digitales tanto en la red de acceso o Radio Access Network (RAN), como en el Core, es decir la parte central de la red de telecomunicaciones donde, entre otras funcionalidades, se enruta el tráfico. El estándar asociado al 2G fue el denominado Global System for Mobile communications (GSM), este era capaz de, además de realizar llamadas, ahora si sobre la red digital, la transmisión de paquetes de datos, lo que permitió el uso de mensajería instantánea con el SMS o las primeras conexiones a Internet móvil, aun más consolidado con la evolución del estándar GSM: el General Packet Radio Service (GPRS), que conseguía throughputs, o tasas de transmisión efectivas de hasta 230 Kbps en su último release (EDGE), también conocido como el 2.5G. Esta generación de telefonía móvil se desplegó sobre las bandas de 900 y 1800 Mhz. En España, tras la desaparición del servicio MoviLine, apareció Movistar, también bajo el mando de Telefónica, con el primer despliegue de red digital móvil. Tras la liberación del mercado de las telecomunicaciones, otras operadoras como Aritel (Vodafone) o Amena (Orange) empezaron a ofrecer sus servicios móviles a nivel nacional.

Otra de las novedades del estándar 2G fue la incursión de la denominada Tarjeta SIM, la cual permitía identificar a cada suscriptor. En su interior era capaz de almacenar la información sobre la suscripción del usuario, un directorio telefónico o los parámetros de la red a la

que se debía conectar según la operadora. Actualmente la mayoría de países que adoptaron esta tecnología están en proceso de desconexión de sus estaciones bases 2G puesto que se considera un estándar ya obsoleto y su uso ha quedado restringido a ciertas zonas donde las operadoras no consideraron conveniente el despliegue de nuevas redes de telefonía como en zonas rurales o carreteras.

### **1.3.2. La tercera generación**

A principios de este siglo, la 3<sup>a</sup> Generación (3G) de telefonía fue lanzada por la International Telecommunication Union (ITU) bajo el nombre de IMT-2000. A esta generación de telefonía también se le denominó Universal Mobile Telecommunications System (UMTS), y es que es el primer estándar que aseguraba compatibilidad telefónica entre países ya que el consorcio encargado de velar por el correcto uso del estándar, la 3GPP, estaba formado por empresas tecnológicas internacionales como American Telephone and Telegraph (ATT), Ericsson, Motorola o NTT. Este nuevo servicio de telefonía permitía conectividades de hasta 20 Mbps en su banda de 2100 MHz, lo que permitió la proliferación de los *smartphones*, donde ahora ya era posible acceder fácilmente a Internet, el correo electrónico u otros servicios multimedia online.

El 3G implementaba un nuevo tipo de modulación denominada Wideband Code Division Multiple Access (W-CDMA), el cual permitía una mayor eficiencia espectral debido a que todos los usuarios eran capaces de transmitir simultáneamente, pero separados mediante códigos de identificación únicos. Para separar la señal en el medio de transmisión cada bit era multiplicado por el código de identificación de cada usuario. Conforme pasaron los años, nuevos sub-estándares fueron lanzados mejorando las especificaciones iniciales del 3G, como el High Speed Packet Access (HSPA), que permitía tasas de transmisión de hasta 42 Mbps y 168 Mbps en HSPA+ e introducía por primera vez los conceptos de Multiple Input Multiple Output (MIMO) y beamforming que se explicarán más adelante.

### **1.3.3. Actualidad, la cuarta generación**

Finalmente, en el año 2013 se lanzó oficialmente el 4G LTE, desarrollado también por el 3GPP. El término LTE, en español, "evolución a largo plazo" es adoptado para este estándar puesto que realmente esta generación no añade una arquitectura nueva al sistema sino que se basa en las arquitecturas ya consolidadas del 3G y el 2G. Es por esto que la ITU no consideró que el LTE desplegado actualmente sea una completa nueva generación, en este caso 4<sup>a</sup> Generación (4G). Las principales características del Long Term Evolution (LTE) son un incremento de las tasas de transmisión, una mayor eficiencia energética y seguridad, una menor latencia, y más fácil de desplegar por los operadores.

Con el LTE se han llegado a conseguir tasas de hasta 173 Mbps de bajada, y con la implementación de MIMO con 4 antenas en los dispositivos, esta se duplicaba hasta los 300 Mbps. Además, en este nuevo estándar, sólo se utiliza la conmutación de paquetes, es decir, se descartaban por completo en el core de la red, los antiguos sistemas de conmutación de circuitos para transferir las llamadas. La modulación escogida para el LTE fue la Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), la cual transporta la información modulada en

---

Quadrature Amplitude Modulation (QAM) pero multiplexado en un conjunto de diferentes portadoras, lo que permite una mayor eficiencia espectral con respecto al 3G.

#### 1.3.4. El futuro, la quinta generación

El 5G es el nuevo estándar de telefonía móvil, sucesora de la 4G, llevado a cabo por el 3GPP en su Release 15 y 16. Este nuevo estándar de telefonía permitirá:

- Conexiones con throughputs, o tasas de transmisión efectivas de hasta 10 Gbps, es decir, hasta 10 veces más rápido que el 4G.
- La latencia, definida como la suma de retrasos temporales producidas en un sistema de comunicación debido a la velocidad de propagación limitada, perdidas, etc. se reducirán hasta valores de 1 ms en comparación con el rango de entre 30 y 50 ms que obtenemos en redes 4G y (Wi-Fi)
- Capacidad de conexiones masivas para dispositivos Internet Of Things (IoT) lo que permitirá el desarrollo de redes de comunicación Machine To Machine (M2M) aumentando la eficiencia energética de estas, así como su disponibilidad y seguridad, lo que será imprescindible para tecnologías emergentes como la conducción autónoma o las Smart Cities, es decir, el proceso de uso de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) para modernizar el entorno urbano ofreciendo servicios de mejora del transporte público, seguridad ciudadana, ahorro energético, etc.
- Mejora de la diversidad en recepción con respecto al 4G mediante el uso del MIMO Masivo. Esta tecnología aprovecha el uso de múltiples antenas sobre un mismo dispositivo para usarlas como enlaces independientes, de forma que la velocidad de conexión pueda aumentar de forma significativa. Con Massive MIMO (mMIMO) se dispondrán de decenas de antenas por dispositivo para hacer que la conexión sea más rápida y eficiente.
- El uso del beamforming, proceso por el cual se direcciona el haz de emisión de la antena y mediante técnicas de procesado digital se calcula en qué dirección se hará más eficiente la comunicación entre la antena y el dispositivo además de poder hacer cálculos sobre ruido e interferencias para mejorar la eficiencia de la antena.

Además, el 5G emitirá sobre nuevas bandas de frecuencia, las cuales categorizaremos como *Bandas Sub-6Ghz* y *Bandas Super-6Ghz*. En el caso del plan nacional para el 5G aprobado por el Ministerio de Industria, Comercio y Turismo (MINETUR), principal responsable de la gestión de los temas referentes a telecomunicaciones a nivel estatal en España, las bandas de frecuencias aprobadas para el 5G son:

- **700 Mhz:** Esta banda antes usada para la retransmisión de la Televisión Digital Terrestre (TDT) y adjudicada para su uso en el 5G mediante el segundo dividendo digital será clave para la retransmisión de señales móviles 5G que necesitan alcanzar los interiores de los hogares y las oficinas puesto que su mayor longitud de onda con respecto a otras bandas la hace apta para penetrar o difractar sobre muros.
-

- **3.4-3.8 Ghz:** Estas bandas de frecuencias eran anteriormente usadas para radioenlaces de transporte de señal de televisión, actualmente en desuso. Permitirán mayores tasas de velocidad con respecto a los 700 Mhz, pero su atenuación será mayor, lo que la hace adecuada para transmisión en zonas urbanas o carreteras.
- **26 Ghz:** En este rango de frecuencias entramos en las denominadas como Milimeter Wave (mmWave) es decir, ondas cuya longitud de onda esté en el orden de milímetros. Esta banda de frecuencia presume de tener mayor disponibilidad en cuanto a ancho de banda lo que permitirá conexiones de banda ancha ultrarrápidas.

Como se puede, la tendencia futura en cuanto a comunicaciones móviles de alta velocidad va de la mano y es directamente proporcional a la frecuencia a la que se emita la señal, pero a su vez, este incremento de frecuencia hace más vulnerables a las transmisiones de ser interferidas o atenuadas durante su retransmisión, lo que haría muy difícil el uso de las redes 5G cuando la antena se sitúa en el exterior y los dispositivos en interiores. En este escenario surge el concepto, ya existente en el 4G del uso de Small Cells. Las Small Cells son pequeñas estaciones base que se sitúan en puntos estratégicos tanto en interiores como oficinas o centros comerciales, como en exteriores en sitios con una gran afluencia de personas y por ende, de dispositivos móviles.

En el 5G, el concepto de Small Cell (fig. 1.5) es imprescindible. Debido al crecimiento exponencial del uso de dispositivos por parte de usuarios y empresas cada vez se hará más difícil el hecho de que una sola estación base pueda dar cobertura y una tasa de transmisión aceptables al estándar a estos dispositivos. Es por ello que en los nuevos despliegues de 5G las operadoras se inclinarán más por el uso de muchas Small Cells a lo largo de la ciudad que den servicio a los usuarios de un rango muy limitado de espacio, pero con muy buena cobertura y tasas de transmisión, que a la instalación de estaciones base convencionales que dan cobertura en radios muy amplios de distancia, lo que en grandes urbes puede suponer la saturación de la propia estación base.

Bajo todo este nuevo escenario de comunicaciones avanzadas que plantea para un futuro muy cercano se han de plantear qué tecnologías se usarán para cubrir las metas y especificaciones marcadas de la manera más robusta y eficiente. El 5G tendrá una completa dependencia de los sistemas informáticos diseñados para alcanzar estas metas, mediante técnicas de procesado digital y nuevos algoritmos podremos ir añadiendo características e incluso mejorando las ya existentes sin necesidad de alterar todo el sistema ya instalado en la red.

## 1.4. Motivación

Ante todo este nuevo escenario de tecnología móvil que se plantea para los próximos años cabe la necesidad de adaptar la tecnología existente para ser compatible con las nuevas especificaciones. En el fondo la pieza clave de toda comunicación inalámbrica digital es la antena, y es importante que un correcto diseño de esta para asegurar que los parámetros de funcionamiento de están aseguren una correcta adaptación al estándar.

Las antenas de parche de tipo microstrip llevan siendo usadas durante décadas para la transmisión de información entre dispositivos móviles y las estaciones base, así como en comunicaciones aéreas, satelitales, o aeroespaciales, debido a la flexibilidad respecto a su tama-

---



**Figura 1.5:** Stadika: Concepto de diseño de Small Cells 5G para la ciudad de Helsinki

ño, peso, coste, rendimiento e incluso facilidad de instalación. En este proyecto se diseñarán y analizaran una serie de arrays o conjunto de antenas, que nos permitirán mejorar ciertas características del sistema, para trabajar a las frecuencias de 2.4, 6, e incluso 27 Ghz, bandas usadas en las comunicaciones Wi-Fi actuales y que se prevén usar en comunicaciones 5G en el futuro.

## 1.5. Estructura del proyecto y metodología

Este proyecto estará dividido en dos partes fundamentales, un marco teórico, donde se realizará una completo resumen sobre los conceptos básicos de las líneas de transmisión: Adaptación e impedancias, tecnología microstrip en líneas de transmisión, etc. Antenas: Tipos de antena, parámetros de estudio básicos, etc. Y en un marco más específico, sobre las antenas de tipo parche en tecnología microstrip: Métodos de alimentación, componentes, tipos, análisis, etc. Finalmente se expondrá la parte de experimentación, donde se estudiarán y analizarán los diseños de distintos tipos de configuraciones de arrays para antenas de tipo parche con tecnología microstrip.

Para realizar la parte experimental del proyecto se hará uso del software de análisis electromagnético 3D: Ansys®HFSS (High Frequency Structure Simulator). Este software es usado para diseñar y simular componentes electrónicos de alta frecuencia como antenas, arrays, filtros o placas de circuito impreso. Con el, se diseñarán las configuraciones de antenas especificadas

y se simularán sus efectos electromagnéticos como si se tratara de una cámara anecóica, para finalmente poder analizar los resultados obtenidos y los valores de los parámetros característicos de la antena así como comprobar la viabilidad del producto final en términos de rendimiento o dimensiones.

Por otro lado, se hará uso de la herramienta de cálculo matemático MathWorks®MATLAB, con la que realizaremos cálculos básicos sobre las dimensiones de la antena a diseñar en función a los parámetros de construcción de esta.

## 2. Teoría de Antenas

En este capítulo se realizará una breve contextualización sobre el concepto de antena así como un repaso a los parámetros que las caracterizan. Estos conceptos son, por lo general, aplicables a cualquier tipo de antena, en capítulos posteriores se especificará lo aprendido para el caso de las antenas en tecnología microstrip.

### 2.1. Conceptos básicos

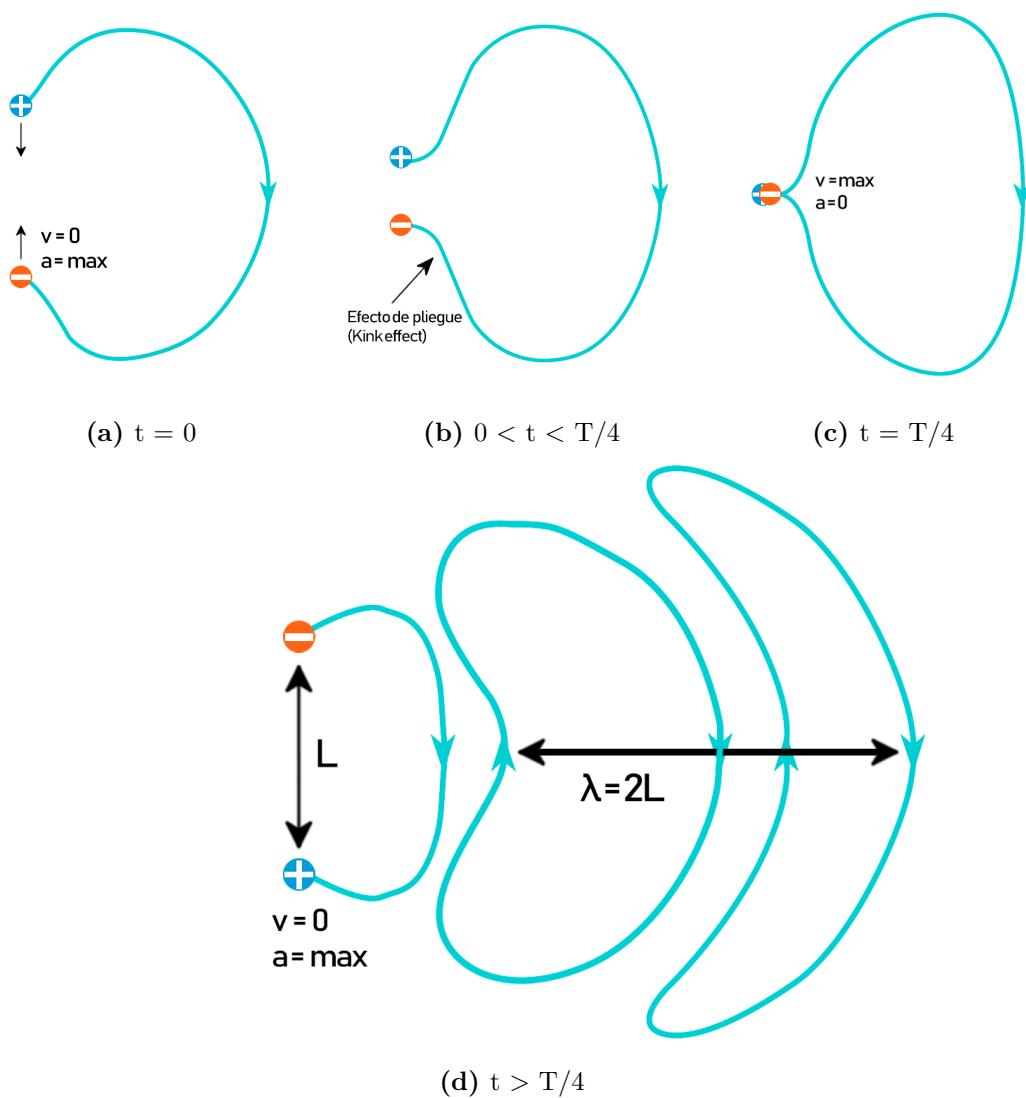
Las antenas son transductores entre un medio guaiado y uno radiado. En su diseño más simplificado se analizaría un conductor metálico por el cual fluye una corriente variable en el tiempo. Se entiende como medio guiado a cualquier tipo de línea de transmisión: Cable coaxial, fibra óptica así como guías de onda. Y como medio radiado el aire o el espacio. Las antenas transmisoras serán las encargadas de transformar estas corrientes eléctricas a O.E.M, mientras que las receptoras tomarán las O.E.M desde el medio radiado y las convertirán de nuevo a impulsos eléctricos para su posterior procesado. Las primeras antenas fueron diseñadas en 1888 por *Heinrich Hertz* pero no fue hasta 1895 cuando *Guglielmo Marconi* empezó a desarrollar antenas con el objetivo de transmitir información a largas distancias.

Como se explica en el , cualquier variación de un campo eléctrico generará un campo magnético y viceversa. Cuando ambos campos conviven y existen variaciones de estos campos se dice que existe una radiación electromagnética. Para entender el principio de funcionamiento de una antena se tomará como ejemplo el caso de hilo conductor cerrado. Si se introdujera una corriente eléctrica fluctuante en el tiempo dentro del conductor, por el principio de inducción electromagnética (Tercera ecuación de Maxwell, Ley de Faraday-Lenz) se produciría un campo magnético fluctuante y un campo eléctrico asociado a su alrededor, estaríamos hablando de un campo electromagnético. Pero este campo electromagnético no se propagaría y estaría siempre al rededor del conductor cerrado. Para poder propagar las O.E.M se debe conseguir separar la onda electromagnética del conductor.

Para entender el efecto de separación se tomará como referencia dos cargas eléctricas de distintas polaridades separadas a una distancia determinada (fig. 2.1a), a esto se le conoce como dipolo eléctrico y producirán un campo eléctrico cuyas líneas de fuerza irán del positivo al negativo. Estas dos cargas intentarán juntarse debido al efecto de atracción. En el momento de mayor separación de las cargas, su velocidad será nula y su aceleración máxima. Conforme se vayan acercando la velocidad irá aumentando y la aceleración disminuyendo hasta que en el punto donde se encuentran la velocidad será máxima y la aceleración nula. Suponiendo un escenario teórico sin pérdidas estas cargas estarían fluctuando e intercambiando sus posiciones indefinidamente. Si se analiza el campo eléctrico producido por las cargas mientras estas están fluctuando se observaría como, en vez de seguir encontrando un campo eléctrico simple de menor intensidad, este se deforma debido

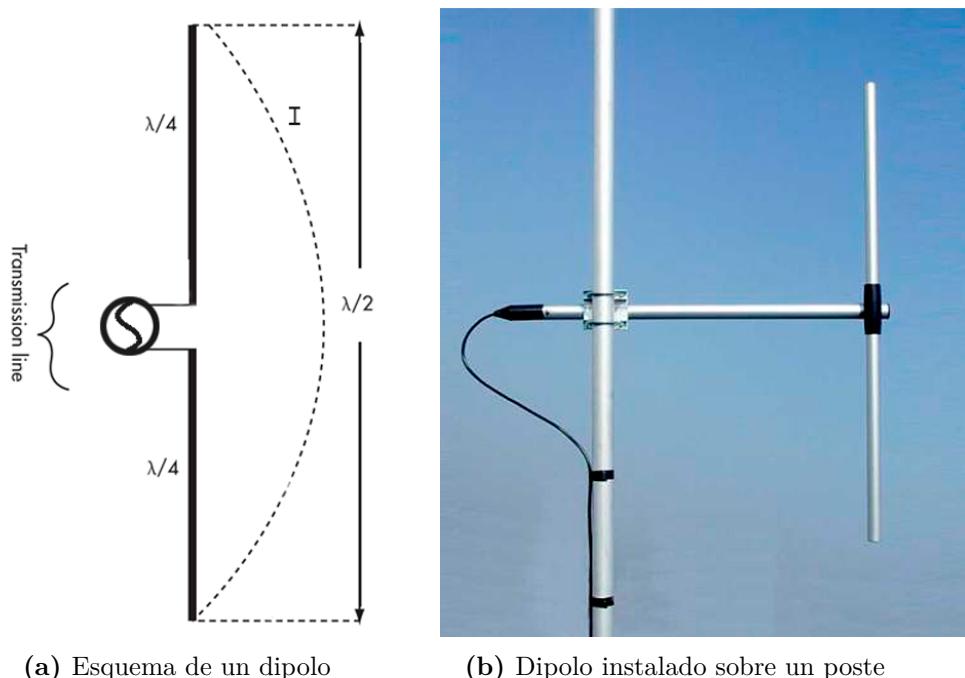
a la aceleración presente en las cargas. Esta deformación es también conocida como efecto *kink* (fig. 2.1b).

Continuando con el experimento se observa como pasado un lapso de un  $1/4$  del periodo de la oscilación, momento en el que las dos cargas se cruzan en el mismo punto, el campo eléctrico producido es nulo, cerrándose así las líneas de campo que habían sido producidas cuando las partículas estaban aún separadas (fig. 2.1c). Es entonces cuando se produce la propagación y generación del frente de onda del campo eléctrico, con su respectivo campo magnético asociado. Se debe observar como la longitud de la O.E.M propagada es exactamente el doble de la longitud existente entre las dos cargas (fig. 2.1d).



**Figura 2.1:** Proceso de separación de campo eléctrico

En la práctica se puede simular el experimento en lo que se denomina como antena dipolo, la antena más básica existente, que será estudiada con mayor detenimiento a lo largo de este capítulo. En una antena dipolo, al aplicar una tensión variable sobre los bornes de esta, las cargas irán oscilando de un extremo a otro según la polaridad del generador en ese instante, produciendo campos eléctricos capaces de separarse de la antena, con su consiguiente generación de campos magnéticos. El conjunto de la propagación de ambos campos son los campos electromagnéticos en los que se propagará la O.E.M. En la figura 2.2 se pueden observar ejemplos de antenas dipolo.



**Figura 2.2:** Antenas dipolo de media onda

El principio básico de diseño de antenas se basa en la geometría de estas. Es importante remarcar que para que la transmisión de la señal aplicada por el generador y que se desea convertir en O.E.M, la longitud de los lados del dipolo deben estar relacionados con la longitud de onda de la señal que se desea transmitir. En el caso del dipolo, los extremos tendrán una longitud de  $\lambda/4$ . Al juntan ambos extremos se puede observar que la antena tendrá una dimensión total de  $\lambda/2$ , y si se tiene en cuenta que la longitud de onda de la O.E.M generada es el doble de la longitud de la antena, se obtendrá una O.E.M radiada cuya frecuencia sea idéntica a la aplicada por el generador.

Aunque se ha analizado el caso de una antena para que funcione como transmisora, el mismo principio de funcionamiento se aplica cuando queremos que esta funcione como receptora de señales. Una O.E.M que viaje por el espacio será capaz de hacer oscilar las cargas de una antena receptora cuando su frecuencia y las longitud de la antena estén directamente relacionadas y se produzca la resonancia sobre esta. La diferencia es que a la salida de la antena receptora no tendremos un generador, sino lo que denominaremos como carga, pudiendo ser esta cualquier tipo de componente eléctrico o electrónico que sea capaz de trabajar con las corrientes eléctricas producidas por la fluctuación de cargas eléctricas en el interior de la antena.

## 2.2. Caracterización de antenas

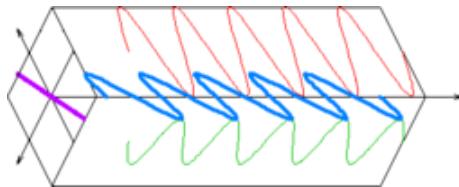
Para saber qué tipo de antena se puede hacer más conveniente para un uso concreto se ha de tener en cuenta sus características. Las principales características de las antenas son:

### 2.2.1. Polarización

Como se hizo mención en el [capítulo 1](#), las O.E.M pueden estar polarizadas. Si se secciona a una O.E.M perpendicularmente a su vector de propagación y vemos el dibujo que va formando campo eléctrico en dicha sección conforme pasa el tiempo observaríamos qué tipo de polarización tiene la O.E.M. Las tres polarizaciones más comunes son: Lineal, circular y elíptica.

- **Polarización lineal:** Cuando se observa que la figura trazada por el campo eléctrico es una recta, se dirá que esta está polarizada linealmente. Analíticamente se producirá polarización lineal cuando las fases de las componentes ortogonales del campo eléctrico difieran en un múltiplo entero de  $\pi$  radianes. La variación temporal de los campos eléctricos con polarización lineal se puede representar fasorialmente como:

$$\vec{E} = \hat{x}e^{j(\omega t - kz)} \quad (2.1)$$



**Figura 2.3:** Onda electromagnética polarizada linealmente

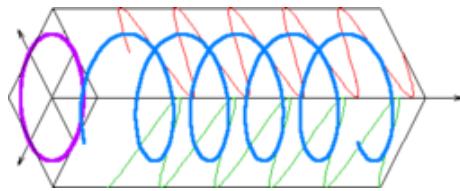
- **Polarización circular:** Cuando se observa que la figura trazada por el campo eléctrico es un círculo, se dirá que esta está polarizada circularmente. Analíticamente se producirá polarización circular cuando las fases de las componentes ortogonales del campo eléctrico sean  $\pi/2$  o  $3\pi/2$  y las amplitudes sean iguales. La variación temporal de los campos eléctricos con polarización circular se puede representar fasorialmente como:

$$\vec{E} = (\hat{x} + j\hat{y})e^{j(\omega t - kz)} \quad (2.2a)$$

$$\vec{E} = (\hat{x} - j\hat{y})e^{j(\omega t - kz)} \quad (2.2b)$$

En este caso el signo que se encuentra en el interior de la suma de componentes indicará el sentido de giro en la polarización circular: Positivo será una rotación levógira y negativo una rotación dextrógira.

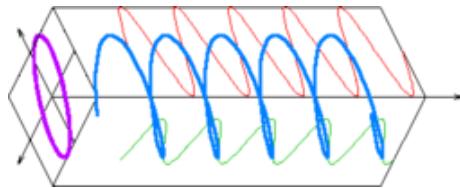
- **Polarización elíptica:** Cuando se observa que la figura trazada por el campo eléctrico es una elipse, se dirá que esta está polarizada elípticamente. El resto de casos en los que la



**Figura 2.4:** Onda electromagnética polarizada circularmente

polarización no sea ni circular ni lineal serán polarizaciones elípticas. La variación temporal de los campos eléctricos con polarización elíptica se puede representar fasorialmente como:

$$\vec{E} = ((2 + j)\hat{x} - 3j\hat{y})e^{j(\omega t - kz)} \quad (2.3)$$



**Figura 2.5:** Onda electromagnética polarizada elípticamente

En las ámbitos de las radiocomunicaciones y en concreto de la telefonía móvil, la polarización más común en la que se emiten y reciben las O.E.M es la lineal-vertical. En otros casos como la transmisión de televisión se utiliza polarización lineal-horizontal. En comunicaciones vía satélite se alternan las polarizaciones lineales horizontales y verticales para reducir la interferencia entre señales que transmiten en el mismo rango de frecuencias.

Se ha de tener en cuenta que cada antena se diseña para trabajar con una polarización concreta y las señales recibidas cuya polarización sea distinta a esta serán atenuadas debido al *factor de pérdidas por polarización* ( $C_p$ ):

$$C_p = |\hat{u}_{tx} \cdot \hat{u}_{rx}| \quad (2.4)$$

Donde  $\hat{u}_{tx}$  es el vector unitario del campo eléctrico incidente y  $\hat{u}_{rx}$  es el vector unitario del campo eléctrico de la antena receptora.

## 2.2.2. Impedancia

Cualquier antena se puede expresar como una carga en un circuito eléctrico, lo que facilita su análisis de impedancias, potencias y adaptación (fig. 2.6). Existen varios parámetros de impedancia que caracterizan a la antena. Por lo general, teniendo en cuenta la *Ley de Ohm*, se define la impedancia de una antena como la relación entre la tensión y la corriente en los bornes de esta.

$$Z_a = \frac{V_i}{I_i} = R_a + jX_a \quad (2.5)$$

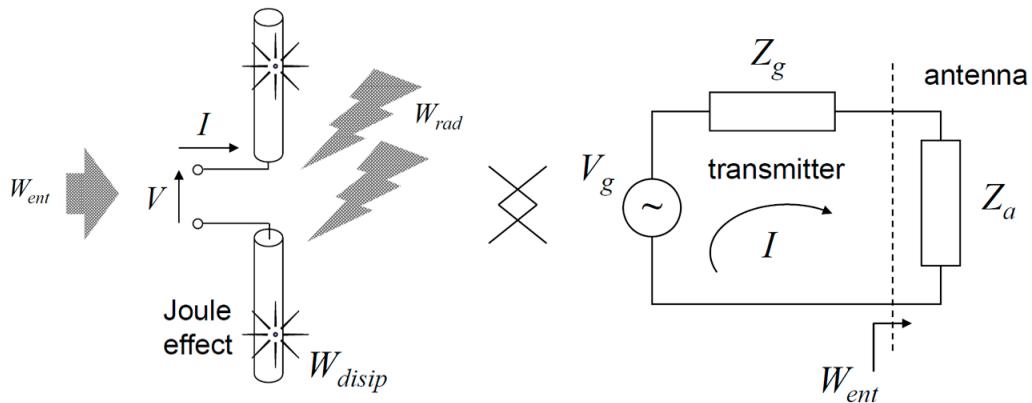
Donde  $R_a$  es la componente real u óhmica de la impedancia y  $jX_a$  es la parte imaginaria o reactiva de la impedancia. La componente real puede ser a su vez descompuesta en dos términos: La resistencia de radiación y la resistencia óhmica o de pérdidas. La resistencia de radiación se define como la relación entre la potencia total radiada y la corriente eficaz en los terminales de la antena al cuadrado. La resistencia ohmica de la antena se define como la relación entre la potencia disipada debido a las pérdidas resistivas y la corriente que circula por sus terminales al cuadrado. Por otro lado la parte reactiva de la impedancia dependerá de sus dimensiones, la frecuencia de resonancia o el tipo de antena que estemos usando.

$$Z_a = (R_r + R_\Omega) + jX_a \quad (2.6)$$

Si se analizan las potencias según el tipo de resistencia, de radiación y óhmica, se obtiene que:

$$P_r = \frac{1}{2} |I_o|^2 R_r \quad (2.7a)$$

$$P_\Omega = \frac{1}{2} |I_o|^2 R_\Omega \quad (2.7b)$$



**Figura 2.6:** Circuito equivalente de una antena transmisora

Otro concepto importante es la denominada adaptación de impedancias. Para que las pérdidas de la antena sean mínimas y conseguir así una máxima transferencia de potencia entre las líneas de transmisión y la antena es importante que las impedancias de cada sistema conectado sean iguales. Cuando las impedancias de nuestros circuitos difieren se pueden producir réplicas o ecos que se reflejan en el sistema entrante e interfieren con la señal que intenta propagarse por la línea de transmisión. Para solucionarlo se debe recurrir a métodos de adaptación como transformadores  $\lambda/4$  o circuitos en serie o stub.

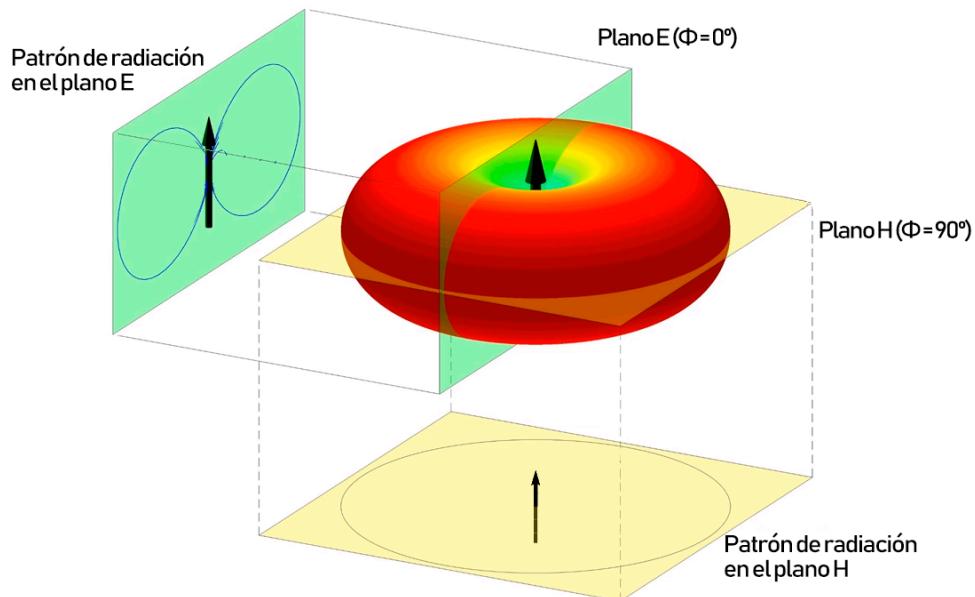
### 2.2.3. Diagrama de Radiación

El diagrama de radiación es usado para representar gráficamente las propiedades de la radiación de una antena en función de unas coordenadas angulares espaciales, a una distancia fija. Para su representación se usan coordenadas esféricas o polares. Es una manera muy efectiva de conocer en qué direcciones concentra su radiación nuestra antena así como posibles radiaciones no deseadas que puedan existir un diseño particular. Para representar sobre un plano polar el diagrama de radiación aplicaremos la siguiente ecuación:

$$t(\theta, \phi) = \frac{|E(r, \theta, \phi)|^2}{|E_{max}(r)|^2} = \frac{P(r, \theta, \phi)}{P_{max}(r)} \quad (2.8)$$

El consistir en un plano de dos dimensiones: Ángulo de radiación ( $\theta$ ) e intensidad de radiación ( $t(\theta, \phi)$ ), debemos tener en cuenta que solo obtendremos el diagrama de radiación para un solo ángulo de transmisión de la antena. Es mediante el ángulo  $\phi$  con el que podremos ir variando los resultados en el diagrama de radiación para poder observar como se propaga la antena en diferentes planos como son comúnmente el plano E y H (fig. 2.7).

- **Plano E:** Es el plano donde podemos encontrar el vector del campo eléctrico y su dirección de máxima radiación (XZ). Este plano se encuentra en  $\phi = 0^\circ$ .
- **Plano E:** Es el plano donde podemos encontrar el vector del campo magnético y su dirección de máxima radiación (XY). Este plano se encuentra en  $\phi = 90^\circ$ .



**Figura 2.7:** Ejemplo de patrones de radiación en los planos E y H para antena dipolo

Existen ciertos parámetros que caracterizan a una antena que pueden ser localizados y calculados con facilidad gracias al diagrama de radiación tanto en coordenadas polares como en cartesianas

(fig. 2.9). Estos parámetros son:

- **Lóbulos:** Son los haces de radiación. Se dividen en:
  - **Lóbulo principal:** Se define siempre como la dirección de máxima radiación, siendo este siempre el haz con mayor intensidad de radiación.
  - **Lóbulos secundarios:** Son los primeros haces de menor intensidad que aparecen en los laterales del lóbulo principal.
  - **Lóbulos menores:** Son el resto de haces de radiación los cuales son, normalmente, indeseados. Cuanto más directiva sea la antena, mayor será su número.
  - **Lóbulos trasero:** Es el haz de radiación que encontraremos siempre a  $180^\circ$  respecto al lóbulo principal. Normalmente, suele ser indeseado y su presencia puede producir interferencia con otras antenas del entorno así como una menor eficiencia para el propósito de nuestra antena.
- **Ancho de haz a -3dB (HPBW):** Se define como el ángulo recorrido por el lóbulo principal desde sus dos pasadas por -3dB de potencia, es decir, la mitad de la potencia máxima radiada.
- **Ancho de haz entre nulos (FNBW):** Ángulo recorrido desde los dos nulos localizados a los laterales del lóbulo principal.
- **Nivel de lóbulos laterales (SLL):** Se define como la diferencia de niveles entre el nivel del lóbulo principal y el primer lóbulo secundario.
- **Relación delante/atras (F/B):** Diferencia de niveles entre el lóbulo principal y el trasero:

$$F/B(dB) = -10 \log_{10} t(\theta + 180^\circ) \quad (2.9)$$

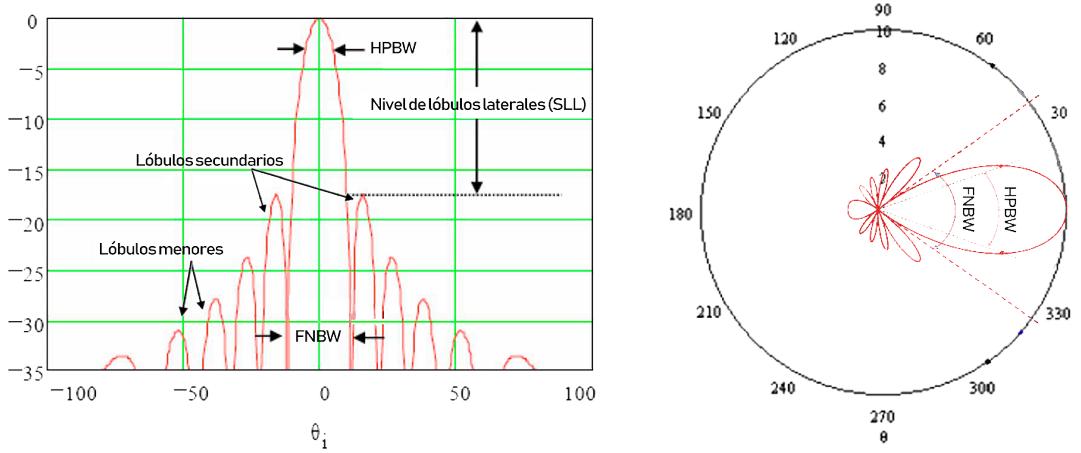
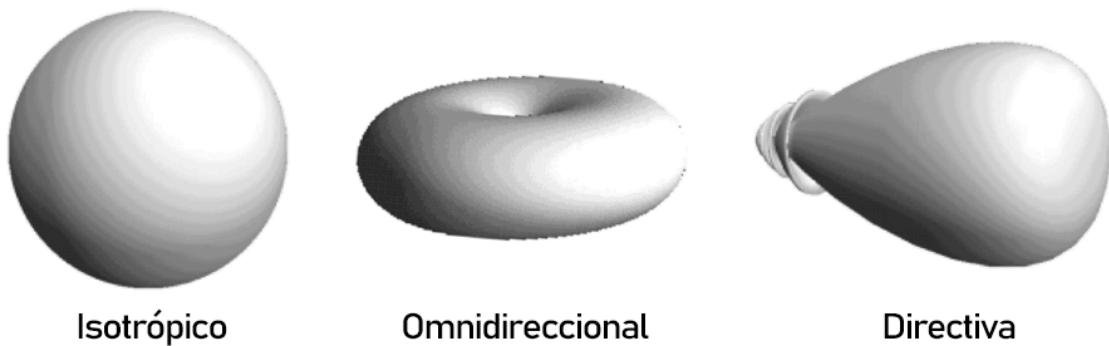


Figura 2.8: Comparación de los parámetros del diagrama de radiación en planos cartesianos y polares

Los patrones principales de radiación son:

- **Isotrópico:** La radiación de la antena fluye en todas las direcciones del espacio. Esta antena es completamente teórica ya que es imposible simular su patrón de directividad en una antena real. Se tiene como referencia para el cálculo de directividad de una antena.
- **Omnidireccional:** Se dice que la antena es omnidireccional cuando el patrón de radiación es simétrico y equidistante en todos los ángulos del plano para uno o varios planos de radiación.
- **Directiva:** Una antena es directiva cuando uno o varios de sus haces destacan sobre los demás. Esto puede ocurrir de manera intencionada, donde buscamos que el haz apunte hacia una dirección concreta, ej: Radioenlaces. O involuntariamente, cuando por ejemplo, tenemos lóbulos traseros o secundarios de bastante intensidad radiando a la vez que el principal.



**Figura 2.9:** Principales patrones de radiación

#### 2.2.4. Directividad

La directividad de una antena se define como la relación entre la intensidad de potencia de radiación en una dirección y distancia concretas, y la misma potencia radiada en caso de que la antena fuera isotrópica, es decir, cuya potencia radiada sea igual en todas las direcciones del espacio (eq. 2.10). Este parámetro es muy importante para caracterizar la antena ya que nos representa la capacidad de una antena para concentrar la intensidad de radiación en una dirección determinada. Es posible obtener analíticamente el valor de directividad para un ángulo completo en el plano polar mediante:

$$D(\theta, \phi) = \frac{P(r, \theta, \phi)}{P_{iso}} = \frac{P(r, \theta, \phi)}{\frac{W_{rad}}{4\pi r^2}} \quad (2.10)$$

Si nos fijamos en el patrón de radiación de una antena, se dirá que esta es más directiva cuanto mayor sea el nivel de intensidad de un haz así como menor sea la anchura del mismo. Para el caso de las antenas directivas ( $D > 20\text{dB}$ ), se puede obtener una directividad considerando que

la radiación es uniforme sobre el ángulo sólido definido sobre el HPBW (Ancho de haz a -3dB) mediante la aproximación:

$$D = \frac{4\pi}{\Delta\theta_{-3dB}\Delta\phi_{-3dB}} \quad (2.11)$$

### 2.2.5. Ganancia

La ganancia de una antena se define como la relación entre la intensidad radiada en una dirección concreta y la intensidad de radiación que se recibiría en caso de que la antena fuera isotrópica (eq. 2.12a). Este parámetro se relaciona proporcionalmente con la directividad mediante la eficiencia de transmisión de la antena.(eq. 2.12b)

$$G(\theta, \phi) = \frac{P(r, \theta, \phi)}{\frac{W_{ent}}{4\pi r^2}} \quad (2.12a)$$

$$G(\theta, \phi) = \eta_t D(\theta, \phi) \quad (2.12b)$$

Es importante distinguir la diferencia entre directividad y ganancia. Cuando se trabaja con directividad, se hace referencia a la potencia que está radiando la antena, por otro lado, con la ganancia se hace referencia a la potencia entregada a la antena. Esta diferencia viene marcada por la eficiencia.

### 2.2.6. Eficiencia

La eficiencia de una antena se define como la relación entre la potencia radiada por la antena y la potencia entregada a esta (eq. 2.13). Es un factor clave para caracterizar las perdidas óhmicas de las antenas. Como se ha mencionado anteriormente, la eficiencia también relaciona los conceptos de ganancia y directividad.

$$\eta = \frac{W_{rad}}{W_{ent}} = \frac{G}{D} \quad (2.13)$$

Las pérdidas sufridas por una antena pueden ser debidas a una mala adaptación entre el medio guiado y radiado, desacoplamientos, y otro tipo de pérdidas durante la conducción, externas a la antena. Se puede también definir un parámetro de eficiencia global en el que se introduzca el coeficiente de desadaptación de impedancias (eq. 2.14):

$$\eta_t = \eta_r(1 - |\rho|^2) \quad (2.14)$$

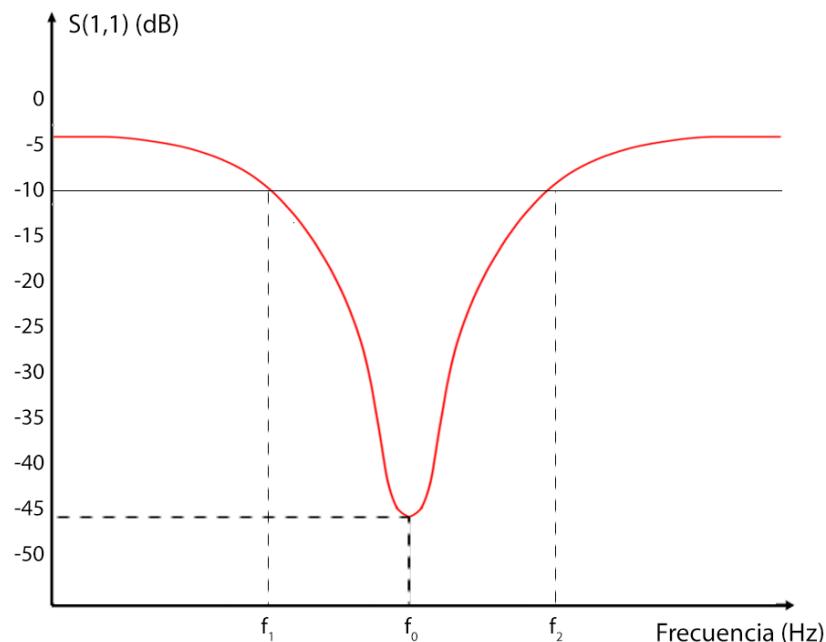
### 2.2.7. Ancho de banda y pérdidas de retorno

El ancho de banda de la antena es el rango de frecuencias del espectro electromagnético para los que se cumplen las características anteriormente mencionadas en las antenas: Radiación, directividad, impedancia, eficiencia, etc.

$$BW = f_2 - f_1 \quad (2.15)$$

Las pérdidas de retorno de una antena o parámetros S (Scattering parameter) definen la relación entre los puertos de entrada y salida del sistema. Un puerto se describe como el lugar en el que se entrega energía en forma de voltaje o corriente. En un sistema de comunicación radio transmisor, compuesto por una línea de transmisión, que provee de energía a una antena, el parámetro principal que describe la capacidad de transmisión de la antena es el parámetro S11. Este parámetro indica cuanta de la energía proporcionada a la antena esta siendo devuelta por esta a la linea de transmisión. Cuanto menor sea este parámetro mejor será nuestro sistema de comunicaciones puesto que significará que la mayor parte de la energía transmitida por el medio guiado habrá sido transmitida por la antena al medio radiado.

A la hora de realizar este estudio, el parámetro S11 ha sido el determinante para determinar la calidad de la antena así como para definir su ancho de banda, ya que se ha definido el ancho de banda de las antenas diseñadas como el rango de frecuencias abarcado por el gráfico del parámetro S11 cuando este está por debajo de los 10dB (fig. 2.10).



**Figura 2.10:** Representación gráfica de curva de parámetro S y ancho de banda de la antena

Además, dentro del rango de ancho de banda de la antena, se encontrará el mínimo de la curva del parámetro S. Este mínimo se definirá como la frecuencia de trabajo de la antena e intentaremos centrarlo siempre según las necesidades de nuestro diseño.

## 2.3. Tipos de antenas

En la práctica existen una gran variedad de tipos de antenas disponibles en el mercado, cada una de ellas es más conveniente según la aplicación para la que vaya a ser usada. Los parámetros descritos anteriormente serán fundamentales para diferenciar los tipos de antenas disponibles y saber identificar cual se adapta mejor a unas necesidades específicas. A continuación se mencionaran los tipos de antenas más comunes así como una breve descripción, resumen de las características principales y usos más comunes.

### 2.3.1. Antenas de hilo

#### 2.3.1.1. Antena dipolo

Como se ha ido mencionado a lo largo del proyecto, el concepto más básico de antena se define como un dipolo (fig. 2.11). En la práctica un dipolo no es más que una linea de transmisión abierta cuyos extremos han de estar relacionados con la longitud de onda de la frecuencia a la que se quiera emitir para que la antena así posea resonancia. El patrón de radiación de un dipolo es, por lo general, omnidireccional en el plano H y con dos lóbulos en el plano E, obteniendo así un patrón de radiación tridimensional con forma toroidal cuyo radio interno es el diametro de los extremos del dipolo y con directividades entre los 1dB y 4dB. Según la longitud de los extremos abiertos del dipolo, el diagrama de radiación podrá ir variando e incluso llegaremos a observar la aparición de lóbulos secundarios y menores en ciertos múltiplos de la frecuencia a la que se quiera emitir (fig. 2.12). Por ello, lo más común es que estos extremos midan en conjunto la mitad de la longitud de onda a la que se necesite emitir. A esta variación se le conoce como: Dipolo de media onda (Half-wave dipole).

En su interior, a la frecuencia de resonancia, la distribución de corrientes muestra nulos en los extremos y un vientre en el centro y su polarización dependerá de la perspectiva según la localización del plano de masa: Si el campo eléctrico es perpendicular al plano de masa se observará una polarización lineal vertical, mientras que si se sitúa paralelo, se obtendrá una polarización lineal horizontal. La impedancia de estas antenas suele situarse sobre los  $73\Omega$ .

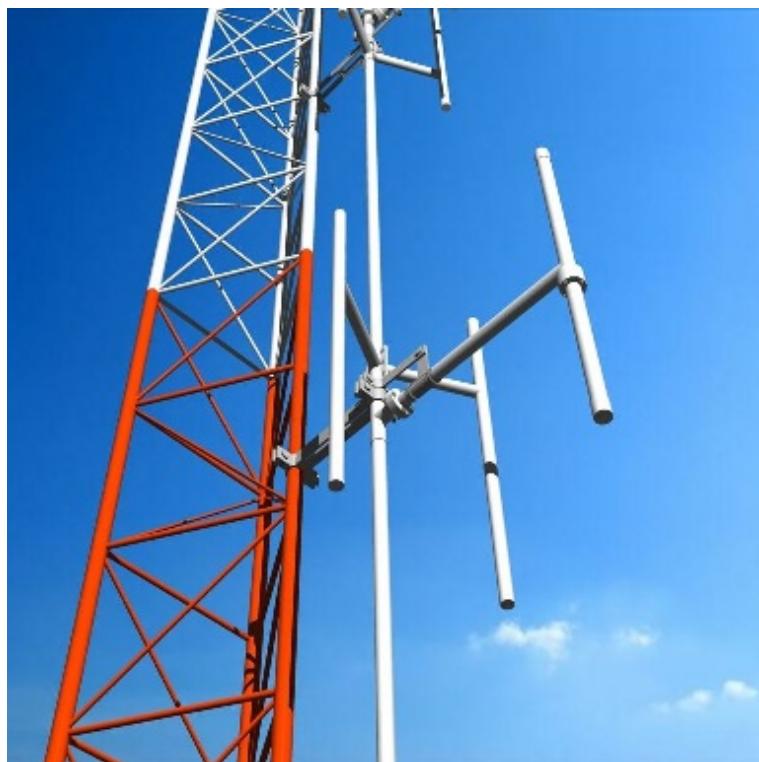
En la práctica, podemos encontrar derivaciones del dipolo según el caso de uso específico. Las modificaciones más usadas son:

#### 2.3.1.2. Antena Yagi-Uda

La Antena Yagi-Uda (fig. 2.13a), inventada por *Hidetsugu Yagi* y *Shintaro Uda* en la cual un se agrupan un conjunto de elementos parásitos aumentando así la directividad y el ancho de banda de la antena. Esta antena se compone de tres partes principales: Los elementos directores, los reflectores y el dipolo. Los elementos directores son los encargados de incrementar la intensidad del campo en su dirección y reducirlas hacia el lado del reflector, por otro lado el reflector es el encargado de concentrar la radiación incidente en el dipolo.

Estos elementos parásitos no se conectan a ninguna línea de transmisión sino que funcionan a través de inducción electromagnética mutua. En las antenas Yagi la ganancia puede llegar hasta

---



**Figura 2.11:** Conjunto de antenas dipolo

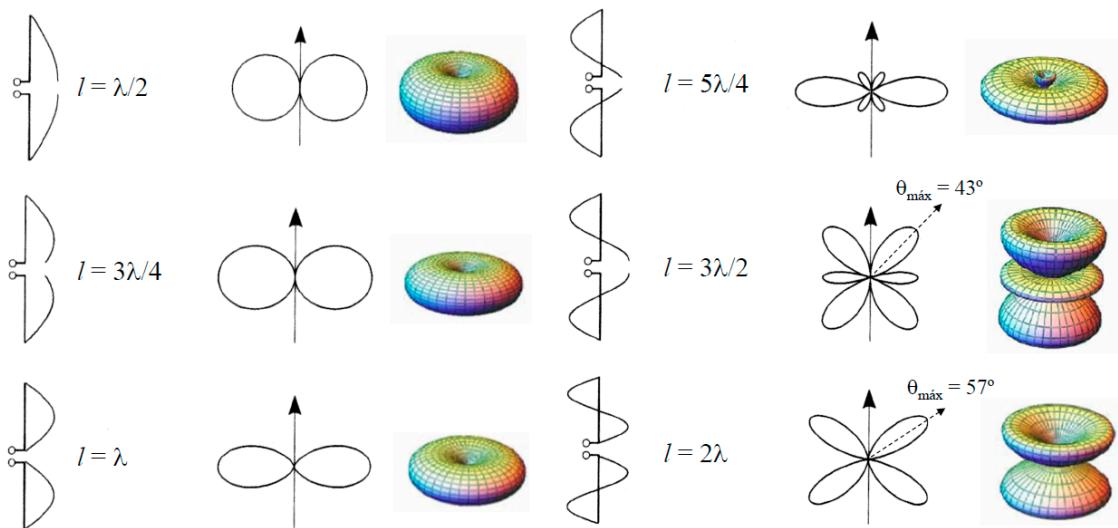
los 40 dB por lo que es comúnmente usada para la recepción de transmisiones de TDT y radio de Frecuencia Modulada (FM) en hogares situados en las lejanías del repetidor local.

#### 2.3.1.3. Monopolio

Otra variación conocida del dipolo es el monopolio, antena de Marconi o antena de cuarto de onda. En él, obviamos uno de los extremos del dipolo y lo sustituimos por un plano de masa lo cual hará la simulación electromagnética del extremo anulado del dipolo (fig. 2.14). El concepto original de Marconi para el monopolio se basaba en un cable de cuya longitud fuera un cuarto de la longitud de onda a la que se iba a transmitir ( $\lambda/4$ ) situada sobre un plano de tierra que actuase como espejo electromagnético, obteniendo así una recreación de un dipolo de media onda.

A efectos prácticos, obtendremos un dipolo de media onda con una impedancia igual a la mitad del dipolo original. El diagrama de radiación contendrá solo la parte superior del toroide obtenido en el dipolo pero con el doble de intensidad de radiación que en este, es decir, con una ganancia 3dB mayor (fig. 2.15).

La polarización de la antena será siempre lineal vertical, puesto que el plano de masa comúnmente usado está instalado sobre el suelo terrestre. Esta masa debe ser buena conductora ya que es de vital importancia para la correcta reflexión de las O.E.M procedentes del extremo radiante. Estas antenas suelen ser instaladas sobre los techos de barcos, donde el agua actúa sobre una



**Figura 2.12:** Diagramas de radiación del dipolo según su longitud



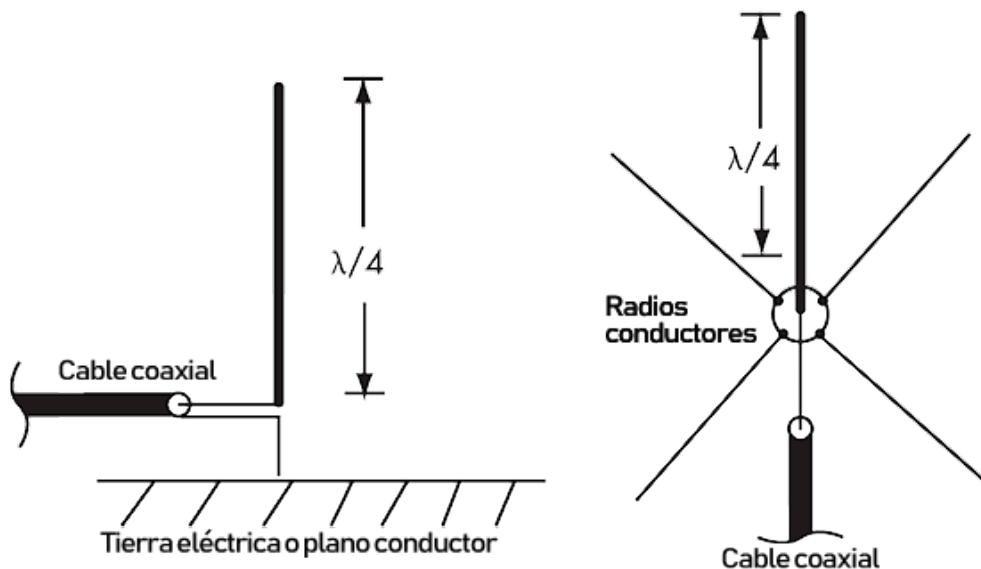
(a) Antena Yagi para recepción de TDT    (b) Diagrama de radiación común de antena yagi

**Figura 2.13:** Antenas Yagi

perfecta masa conductora, o sobre el techo de los coches, que al ser metálico, también ayuda a la correcta reflexión de las O.E.M.

En caso de que la antena se instale sobre superficies no conductoras, existen distintas alternativas como humedecer la tierra o instalar radios conductores. Los radios son tiras metálicas dispuestas concéntricamente al rededor del monopolo. Cuanto mayor sea la longitud de las tiras, mejor simulación del dipolo obtendremos. Unas tiras muy pequeñas resultaran en un diagrama de radiación muy separado del suelo.

La ventaja principal de estas antenas es la reducción a la mitad de la longitud necesaria para el funcionamiento de la antena. En situaciones como las antenas de los coches, barcos o aviones, es importante reducir al máximo la longitud de las antenas para que no afecten al uso del vehículo. Otro uso muy importante es para la baja frecuencia, por ejemplo, en transmisiones de Amplitud Modulada (AM), donde la frecuencia de transmisión ronda entre los 500 y 900 KHz, la longitud



**Figura 2.14:** Esquema de instalación de un monopolio

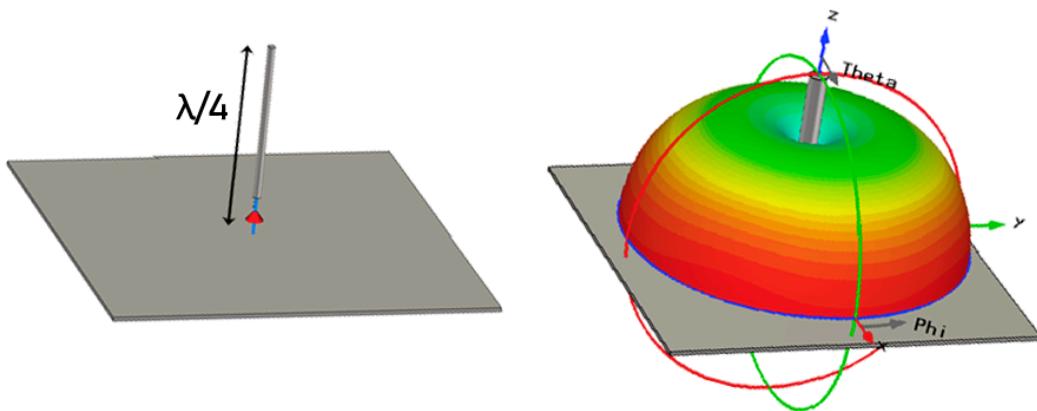
de la antena dipolo de media onda necesaria para la retransmisión sería de entre 100 y 200 metros, mientras que con el monopolio, estas distancias se reducen a la mitad, facilitando su construcción, instalación y mantenimiento (fig. 2.16).

### 2.3.2. Antenas de apertura

#### 2.3.2.1. Bocinas

Las antenas de tipo bocina se caracterizan por su forma cónica o rectangular parecida a la de un altavoz. Su uso se remonta a finales del año 1800, pero este tipo de antenas adquirió popularidad durante la segunda guerra mundial (fig. 2.17). La diferencia de estas antenas con respecto a las antenas de tipo cable es que estas son alimentadas mediante una guía de onda. Una guía de onda es una estructura física capaz de transportar modos electromagnéticos en su interior. Suelen usarse para la guiado de emisiones de alta frecuencia, más en concreto de microondas debido a su baja atenuación en estas magnitudes. En el interior de las guías de ondas, las O.E.M viajan confinadas de modo que no hay pérdidas por radiación en el espacio y se consiguen evitar las interferencias electromagnéticas externas durante su guiado.

Por lo general, las bocinas son usadas para la radiación de microondas y tienen un papel importante en campos como la radio astronomía o seguimiento satelital, además de ser usado junto a otros elementos como reflectores o lentes y sirven como estándar universal para la calibración de antenas de alta ganancia. En el caso de las bocinas piramidales, las dimensiones de los lados de la apertura definen qué plano de radiación es más efectivo en la antena. Si la longitud mayor es la del plano horizontal se denominarán bocinas de plano H, y en el plano vertical, bocinas de plano E. El modo de propagación siempre es el Transversal Eléctrico (TE) 10. En el caso en el que la bocina sea circular, el modo de propagación será el TE11.



**Figura 2.15:** Diagrama de radiación 3D de un monopolo

La directividad de este tipo de antenas es una de sus principales ventajas siendo esta muy moldeable solo variando las dimensiones de la apertura de la bocina. Su principal desventaja llega en su eficiencia, que suele rondar entre el 50% y el 60%.

### 2.3.2.2. Reflectores

Las antenas reflectoras han sido usadas desde el descubrimiento de la propagación electromagnética en 1888 por *Hertz*, quien realizó sus primeros experimentos con reflectores en forma de cilindro parabólico. Durante el período de la segunda guerra mundial, este tipo de antenas fueron estudiadas para numerosas aplicaciones radar. Con el paso del tiempo, este tipo de antena son muy comunes en ámbitos como la radio astronomía, comunicaciones por microondas, y seguimiento satelital. Aunque los reflectores puedan tomar cualquier forma, es común observarlos en formas planas, cónicas o curvas, en especial en forma parabólica.

Aunque los reflectores se puedan diseñar y analizar mediante técnicas del campo de la óptica como la óptica geométrica y el trazado de rayos, lo más común es usar la teoría geométrica de la difracción o Geometric Theory of Diffraction (GTD). Cada tipo de reflector nos brindará una serie de características diferentes a la antena que pueden ser convenientes según el uso final de esta, como el área efectiva de radiación, la relación delante/atrás, o los diagramas de radiación y ganancias.

En la actualidad uno de las superficies reflectoras más usada es la curva parabólica, o como se conoce popularmente, antena parabólica. Esta antena se caracteriza por su superficie reflectora, una parábola de revolución. Lo interesante de esta geometría es su capacidad de concentración de los haces electromagnéticos sobre el foco de la parábola. Existen distintos tipos de antenas parabólicas según el diseño de la posición del foco respecto a la superficie reflectora:

- **Parabólica de foco centrado:** La superficie reflectora es parabólica y el alimentador está sobre el foco.

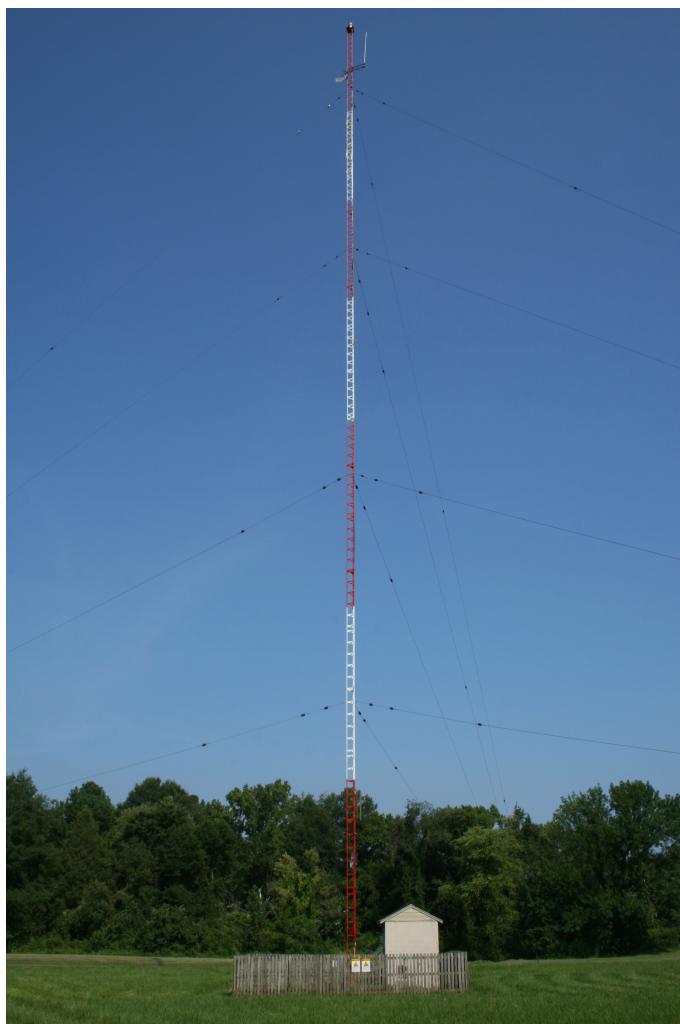
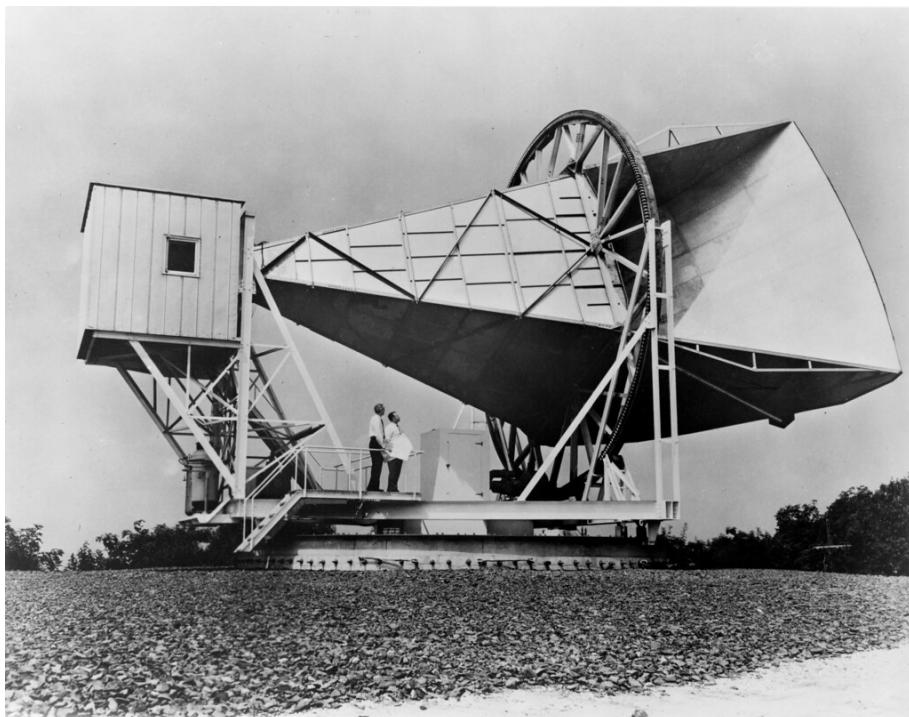


Figura 2.16: Monopolio para transmisión de AM

- **Parabólica off-set:** La superficie reflectora es una sección del reflector parabólico normal y se encuentra desplazado con respecto al foco. Este variación de antenas parabólicas son más eficientes que las de foco centrado puesto que el alimentador no hace sombra sobre la superficie reflectora
- **Parabólica Cassegrain:** En esta variación, encontramos dos superficies reflectoras: Una superficie parabólica cóncava y una superficie hiperbólica convexa. Con este sistema se consigue un alto nivel de ganancia, lo que lo hace útil para aplicaciones astronómicas.

Por lo general, este tipo de antenas se caracterizan por su patrón de radiación, en donde la mayor parte de la energía radiada se concentra sobre un lóbulo principal estrecho. La potencia restante se disipa en forma de lóbulos secundarios en otras direcciones. Además, podemos encontrar un lóbulo trasero debido al efecto spillover, es decir, la parte de la radiación procedente del alimentador que sobresale al reflector, el cual puede ser reducido añadiendo material capaz de absorber microondas o aumentando el tamaño del reflector.

---



**Figura 2.17:** Bocina para comunicación satelital construida en 1959 por los laboratorios Bell

En la actualidad podemos encontrar este tipo de antenas comúnmente en balcones y tejados en los edificios de las ciudades puesto que durante décadas este tipo de antenas han sido usadas para la recepción de televisión por satélite. También son muy usadas para radio enlaces, ofreciendo servicios de internet WiMax, operadores VoIP o comunicaciones rurales. Finalmente, otra de las aplicaciones más importantes de los reflectores parabólicos se encuentra en la radio astronomía, donde estas antenas son instaladas en conjunto formando arrays.

Un array de antenas es un conjunto de estas diseñadas para trabajar de forma conjunta y así obtener resultados que con una sola antena sería imposible de conseguir. El último ejemplo más destacado lo encontramos con la fotografía del primer agujero negro por parte del proyecto *Event Horizon Telescope*. En este proyecto se usaron varios radio telescopios instalados en distintas partes del mundo como el Alfonso Serrano en México, el South Pole Telescope en el Polo Sur, el James Clerk Maxwell Telescope en Hawái o el Instituto Radio Astronómico Milimétrico (IRAM) (fig. 2.18) 30-m en España. La finalidad de la utilización de estos telescopios es la de actuar como un solo radio telescopio cuyo diámetro sería imposible de alcanzar mediante uno solo.

### 2.3.3. Antenas Microstrip

Las antenas microstrip son una extensión de las líneas de transmisión por tecnología microstrip cuyo extremo queda abierto y con unas dimensiones específicas de forma que el parche disipa energía en forma de radiación. Este tipo de antenas serán las utilizadas para el desarrollo de este estudio debido a sus características de construcción y sus capacidades técnicas y serán analizadas a fondo en el .



**Figura 2.18:** Antena parabólica del IRAM en Sierra Nevada, parte del proyecto Event Horizon para capturar la primera fotografía de un agujero negro



## **A. Anexo I**

Aquí vendría el anexo I



## **B. Páginas horizontales**

Aquí se muestra cómo incluir páginas en horizontal.  
Esta página está en vertical





Esta página está de nuevo en vertical

---

## C. Importar PDF

A continuación se muestra una página importada de un PDF externo. Observar los comentarios en el código de este anexo para más información. También puedes leer el manual con todas las opciones en <http://osl.ugr.es/CTAN/macros/latex/contrib/pdfpages/pdfpages.pdf>.



Alicante 15 DE MARZO DE 2007

Expediente número

Referencia del peticionario **AYUNTAMIENTO DE ALICANTE**

Departamento de Medio Ambiente

C/San Nicolás, nº 2, 4º

03001 ALICANTE

Contacto: Juan Luís Beresaluz

**DOCUMENTO DE SÍNTESIS**

***ELABORACIÓN DEL MAPA ACÚSTICO MUNICIPAL DE LA CIUDAD DE  
ALICANTE***

Fecha de realización del estudio: MAYO 2005 – MARZO 2007