

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA EN  
TELECOMUNICACION**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA**



**TRABAJO FIN DE GRADO**

**REVISIÓN DE LOS SISTEMAS DE MICROONDAS PARA  
APLICACIONES MILITARES**



Grado en Ingeniería de Sistemas de Telecomunicación

Autor: Campillo Contreras, Juan Francisco

Director/es: Gómez Tornero, José Luis

Monzó Cabrera, Juan

Septiembre / 2012





<b>Autor</b>	Campillo Contreras, Juan Francisco
<b>e – mail del autor</b>	<a href="mailto:juanfrancampillo@gmail.com">juanfrancampillo@gmail.com</a>
<b>Director(es):</b>	José Luis Gómez Tornero y Juan Monzó Cabrera
<b>e – mail de los autores</b>	<a href="mailto:josel.gomez@upct.es">josel.gomez@upct.es</a> , <a href="mailto:juan.monzo@upct.es">juan.monzo@upct.es</a>
<b>Título de TFG</b>	Revisión de los sistemas de microondas para aplicaciones militares
<b>Descriptor</b>	II Guerra Mundial, Radar, GPS, seguimiento y guiado de misiles
<b>Resumen</b>	
<p>El estudio a desarrollar en este trabajo fin de grado consistirá en realizar un revisión de las tecnologías utilizadas en el sector militar relacionadas con los sistemas de microondas y como estas tecnologías son utilizadas en la actualidad por el sector civil. Como punto de partida se realizará un análisis histórico ambientado en la II Guerra Mundial, y las tecnologías utilizadas en el entorno de la transmisión de ondas de microondas, se analizará en profundidad el sistema de radar. Seguidamente se describirá el sistema que hace posible la localización por satélite mediante el sistema de posicionamiento global GPS y sus aplicaciones tanto civiles como militares. Se analizarán los sistemas de seguimiento y guiado de misiles atendiendo principalmente a los sensores de infrarrojos, radar, o lumínicos que integra el sistema para la localización y seguimiento del blanco. Finalmente se describirán la transferencia de tecnologías e investigaciones realizadas en el sector militar y que han tenido gran impacto en la sociedad civil.</p>	
<b>Titulación</b>	Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación
<b>Departamento</b>	Teoría de la Señal y Comunicaciones
<b>Fecha de presentación</b>	Julio de 2012



Índice	Pag.
0. Objetivos y fases del proyecto.....	7
0.1. Planteamiento inicial del proyecto.....	7
0.2. Objetivos del proyecto.....	7
0.3. Fases del proyecto.....	8
1. Repaso histórico - II Guerra Mundial.....	9
1.1. II Guerra Mundial.....	9
1.2. Tecnologías sobre comunicaciones s.XIX - s.XX.....	10
1.3. El desarrollo de las microondas y el Radar.....	15
1.4. La II Guerra Mundial.....	17
2. Radar.....	19
2.1. Características principales.....	19
2.1.1. Reflexión de las ondas electromagnéticas.....	20
2.1.2. Ecuación de radar.....	20
2.2. Magnetrón.....	23
2.2.1. Componentes del magnetrón.....	24
2.2.2. Operación del magnetrón.....	25
2.2.3. Oscilación transitoria.....	27
2.3. Receptor superheterodino.....	28
2.4. Duplexor.....	29
2.5. Antenas.....	30
2.5.1. Antena parabólica.....	30
3. Sistemas militares de localización por satélite.....	33
3.1. Antecedentes históricos de localización terrestre y marítima.....	33
3.1.1. Anterior a la II Guerra Mundial.....	33
3.1.2. II Guerra Mundial.....	33
3.1.3. Posterior a la II Guerra Mundial.....	34
3.2. Coordenadas y triangulación.....	34
3.2.1. Latitud y longitud.....	34
3.2.2. Localización de un punto por triangulación.....	35
3.3. El GPS.....	36
3.3.1. Segmento espacial.....	37
3.3.2. Segmento de control.....	38
3.3.3. Segmento de usuario.....	39
3.3.4. Métodos de trabajo de GPS.....	40
3.3.4.1. Navegación autónoma.....	40
3.3.4.2. Posicionamiento Diferencial DGPS.....	45
3.3.4.3. GPS Diferencial de Fase y resolución de ambigüedades.....	46
4. Sistemas de seguimineto y guiado de misiles.....	49
4.1. Sistemas de control.....	50
4.2. Contramedidas.....	51
4.3. Sistemas de guía.....	52
4.3.1. Programables.....	52
4.3.2. Pasivos.....	52
4.3.3. Semi-activos.....	55
4.3.4. Activos.....	56
4.3.5. Teledirigidos.....	56
4.3.6. Otros sistemas de guía.....	57
5. Transferencia del sector militar al civil.....	59
5.1. Horno microondas.....	59

---

5.2. GPS civil.....	59
5.3. Sistemas de guiado.....	60
6. Conclusiones.....	61
7. Referencias.....	63

## 0. OBJETIVOS Y FASES DEL PROYECTO

### 0.1. Planteamiento inicial del proyecto

El estudio a desarrollar en este trabajo fin de grado consistirá en realizar un revisión de las tecnologías utilizadas en el sector militar relacionadas con los sistemas de microondas y como estas tecnologías son utilizadas en la actualidad por el sector civil. Como punto de partida se realizará un análisis histórico ambientado en la II Guerra Mundial, y las tecnologías utilizadas en el entorno de la transmisión de ondas de microondas, se analizará en profundidad el sistema de radar. Seguidamente se describirá el sistema que hace posible la localización por satélite mediante el sistema de posicionamiento global GPS y sus aplicaciones tanto civiles como militares. Se analizarán los sistemas de seguimiento y guiado de misiles atendiendo principalmente a los sensores de infrarrojos, radar, o lumínicos que integra el sistema para la localización y seguimiento del blanco. Finalmente se describirán la transferencia de tecnologías e investigaciones realizadas en el sector militar y que han tenido gran impacto en la sociedad civil.

### 0.2. Objetivos del proyecto

En el presente capítulo se realizará una breve descripción del este trabajo y el contenido de los siguientes capítulos, donde en el capítulo **primero** se realizará un breve repaso de los acontecimientos y países implicados en la segunda guerra mundial que tuvo lugar entre 1939-1945, por otra parte también se realizará una descripción de los avances tecnológicos que tuvieron lugar antes y durante este acontecimiento y que tuvieron un gran impacto, decisivo en algunos casos, en dicha guerra, como por ejemplo la investigación del comportamiento de las señales electromagnéticas en el rango de las microondas, el descubrimiento del magnetrón y el radar entre otros grandes descubrimientos.

En el **segundo** capítulo se realizará un análisis en profundidad sobre el radar, donde no solo se describirán los objetivos que persigue el radar, apoyado por las cuestiones teóricas mediante cálculos matemáticos que darán como resultado los valores esperados por un radar, como puede ser la distancia y dirección del objetivo, sino también los dispositivos físicos que componen al radar como principalmente el magnetrón como dispositivo transmisor, el receptor superheterodino, la antena directiva o el duplexor.

Por otra parte, en la segunda mitad del siglo XX se dio un paso hacia delante en la historia sobre la localización de objetivos gracias al lanzamiento de los primeros satélites donde su utilización principal fue la localización por satélite, donde la gran estrella fue el GPS (Global Positioning System). En el capítulo **tercero** de este trabajo se realizará un análisis sobre el GPS y los diferentes sistemas de transmisión de información que utilizan para protegerse de amenazas y simultáneamente poder separar su utilización para el sector militar y el civil.

Siguiendo el hilo por el que conduce este trabajo dedicado a las tecnologías de comunicaciones en el sector militar, el **cuarto** capítulo se centrará en el seguimiento y

guiado de misiles donde se describirán los diferentes medios con los que un sistema electrónico es capaz de dirigirse a su objetivo, ya sea mediante métodos pasivos, activos, semi-activos, programables o teledirigidos, este capítulo realizará un análisis de los mecanismos que hacen a un sistema diferente al otro.

Como penúltimo capítulo, el **quinto**, describirá brevemente como y cuáles han sido las principales tecnologías que han sido transferidas desde el opaco sector militar al sector civil desde el cual la sociedad ha podido disfrutar de dichos avances tecnológicos.

Finalmente en el **sexto** capítulo y finalizando este trabajo se resumirán las principales conclusiones a las que se ha llegado una vez analizado este trabajo y una breve discusión personal referente a los avances tecnológicos realizados en tiempos de guerra.

### **0.3. Fases del proyecto**

Las fases del proyecto son:

- 1.- Lectura de artículos y documentación sobre la II Guerra Mundial.
- 2.- Documentación y análisis del sistema radar y magnetrón.
- 3.- Estudio del GPS.
- 4.- Analizar los diferentes tipos de sistemas de control para el seguimiento de misiles.
- 5.- Documentar y analizar las transferencias de tecnología del sector militar al civil.
- 6.- Realizar un análisis global del trabajo y describir las conclusiones obtenidas.



# 1. Repaso histórico – II guerra mundial

## 1.1. II Guerra Mundial

**La Segunda Guerra Mundial** fue el conflicto armado más importante y destructivo de nuestra era, estalló en 1939 y finalizó en 1945, entre las potencias del **Eje** (Alemania, Italia y Japón) y los **Aliados** (Inglaterra, Francia y Unión Soviética). A este segundo bloque se le adhirió Estados Unidos en 1941.

La causa principal de la guerra fue la ambición de Adolf Hitler (Alemania), Benito Mussolini (Italia) e Hirohito (Japón) por el predominio económico y político del planeta, arrebatándoles sus colonias y semi-colonias a las potencias aliadas.

Se puede decir que el comienzo de esta idea imperialista fue en 1933, cuando el dictador nazi Adolfo Hitler llegó al poder en Alemania y poco después empezó a violar el Tratado de Versalles de 1919. Reactivó su industria militar, reorganizó sus fuerzas armadas y se anexó Austria. A lo largo de 1938 invadió Checoslovaquia. Mientras tanto Italia invadió y conquistó Albania.

A continuación se describirán los acontecimientos principales que tuvieron lugar a lo largo de la segunda guerra mundial:

El 1 de septiembre de 1939 Alemania invadió Polonia, provocando así que Inglaterra y Francia le declaren la guerra. En los meses siguientes Alemania invadió Dinamarca, Noruega, Bélgica y Holanda. En junio de 1940 cayó París, la capital de Francia. En agosto del mismo año la aviación alemana bombardeó Londres sin descanso, pero no lograron la rendición de Inglaterra.

Animado por los avances alemanes, el dictador italiano Benito Mussolini envió sus tropas a Grecia y Egipto con el objetivo de conquistarlas, pero fueron derrotadas. Esto obligó a Hitler a enviar ayuda para controlar los Balcanes y el norte de África. Estas fuerzas fueron vencidas por los aliados en la **Batalla de El Alameín**, en julio de 1942, y tuvieron que huir a Italia, donde también fueron derrotados.

En junio de 1941, Hitler ordenó la invasión a la Unión Soviética. Sus fuerzas avanzaron hacia Moscú, pero estando muy cerca tuvieron que retroceder por el contraataque ruso y la llegada del invierno. Finalmente fueron aplastados por los soviéticos en la gran **Batalla de Stalingrado** (junio de 1942 – febrero de 1943). Mientras tanto los nazis aplicaban una política de exterminio contra los judíos, la denominada **Solución final**, en crueles campos de concentración como el de Auschwitz en Polonia.

En el Océano Pacífico los japoneses realizaron el **bombardeo de Pearl Harbor** en diciembre de 1941, provocando el ingreso de Estados Unidos a la Segunda Guerra Mundial. La ofensiva japonesa consiguió conquistar China, el Sudeste Asiático y casi todas las islas del Pacífico. Pero a partir de la victoria estadounidense en la **Batalla de Midway** en junio de 1942, los japoneses empezaron a perder posiciones.

Finalmente, en junio de 1944 los aliados iniciaron una gran contraofensiva con el **Desembarco de Normandía**, obligando a los alemanes a replegarse hacia su país. En agosto fue liberada París y en febrero de 1945 toda Francia quedó libre de alemanes. Los aliados invadieron Alemania en marzo, pero los soviéticos llegaron primero a Berlín (25 de abril de 1945). Hitler se suicidó el 30 de abril de 1945 en su búnquer en Berlín. Y el 9 de mayo de 1945 el mariscal alemán Wilhelm Keitel firmó la rendición de su país en Berlín.

El 6 y 9 de agosto de 1945, Estados Unidos arrojó bombas nucleares sobre las ciudades japonesas de Hiroshima y Nagasaki, lo que aceleró la rendición del emperador Hirohito el 2 de setiembre de 1945.

## 1.2. Tecnologías sobre comunicaciones durante s.XIX y principios de s.XX.

En este apartado se describirá cronológicamente los avances e ingenios que a lo largo de la historia han ayudado a mejorar las comunicaciones a través de las ondas electromagnéticas, donde en 1922 se realiza un descubrimiento que será el presagio del radar y continuaremos hasta llegar a las tecnologías empleadas en la II Guerra Mundial.

- **1800** Alejandro Volta diseña la primera batería.
- **1820** Christian Oersted descubre los primeros efectos del electromagnetismo. En un famoso experimento en la Universidad de Copenhage, Oersted dispuso una brújula bajo un conductor eléctrico. Al hacer circular corriente por el conductor, la aguja de la brújula se mueve, demostrando que las corrientes eléctricas producen campos magnéticos.
- **1821** Michael Faraday descubre la inducción, demostrando que los efectos descubiertos por Oersted son **reversibles**. Faraday logra hacer circular corriente por conductores eléctricos que giran alrededor de un imán permanente. De hecho, se inventa el primer generador eléctrico, convirtiendo energía mecánica en energía eléctrica.
- **1830** Joseph Henry diseña un sistema práctico para enviar señales eléctricas y detectarlas en extremos distantes. Es el predecesor del telégrafo.
- **1837** Samuel Morse inventa el primer telégrafo. En 1838 presenta la patente de su invento, y la obtiene en 1848. El sistema utilizaba una llave para cerrar o abrir un circuito eléctrico, una batería, un conductor para unir las estaciones telegráficas y un receptor electromagnético, que producía un sonido indicando el cambio en el pasaje de corriente. El retorno de la corriente se producía por **tierra**, por lo que bastaba un solo conductor eléctrico entre las estaciones telegráficas. Completó el sistema diseñando el conocido **código Morse**, consistente en puntos y barras, los que eran representados por cortes pequeños o prolongados en la corriente. El telégrafo fue la primera aplicación práctica y comercial que utilizaba la electricidad. De hecho, fue el primer sistema **digital** de comunicaciones.
- **1843** Pocos años después del invento del telégrafo, Alexander Bain, un escocés dedicado a la relojería, presenta en Gran Bretaña, una patente por el concepto de *mejoras en la producción y regulación de corrientes eléctricas, impresiones electrónicas y señales telegráficas*. Alexander Bain había diseñado un sistema capaz de transmitir imágenes a través de líneas telegráficas, es decir, inventó el primer **fax**.
- **1866** Después de 12 años de frustrados intentos, y con una inversión total de 12 millones de dólares (una verdadera fortuna para la época), Cyrus Field y su grupo

logran poner en funcionamiento el primer telégrafo entre América y Europa. Utilizaron el *Great Eastern*, el barco más grande de la época y cinco veces más grande que cualquier otro barco entonces a flote. A bordo de este barco, y de otros anteriores que terminaron en fracasos, viajaron personajes conocidos, como el doctor William Thomson, inventor del galvanómetro marino (instrumento decisivo en el éxito del tendido del cable), y el propio Samuel Morse.

- **1875** Bell Contrata a Thomas A. Watson, quien sería su asistente de experimentos durante largos años. Por esta época, Bell ya tenía en mente la idea de transmitir voz sobre los cables telegráficos. En marzo de 1875, Bell conoció a Joseph Henry, quien en ese momento era Secretario del Instituto Smitsoniano en Washington D.C. Bell comentó con Henry sus ideas acerca del **telégrafo musical** y de la transmisión de voz sobre los cables telegráficos. Henry desestimó la idea del telégrafo musical, e instó a Bell a dedicarse a la transmisión de voz, asegurándole que esto era *la semilla de un gran invento*. Bell abandonó la idea del telégrafo musical y se dedicó completamente a la invención del **Teléfono**. El 2 de junio de 1875, durante uno de los experimentos y en forma accidental, Bell escuchó un sonido al otro lado del telégrafo en el que Watson estaba haciendo algunas pruebas. Al inspeccionar el estado del telégrafo, se dieron cuenta que por error, uno de los contactos estaba demasiado apretado, y no llegaba a abrirse completamente, pero si a variar su resistencia. Fue la primera transmisión de un sonido a través de un cable eléctrico.
- **1876** Con las ideas en mente, pero aún sin tener un sistema capaz de transmitir voz, Bell presenta su solicitud de patente, el 14 de febrero de 1876. Increíblemente, esta solicitud fue presentada pocas horas antes de una solicitud similar, presentada el mismo día por Elisha Gray. La patente de Bell, Número 174.465, es conocida como la patente más exitosa jamás presentada. La solicitud de patente trata sobre **Mejoras en la Telegrafía**, y la idea básica es utilizar corrientes de intensidad variable sobre los cables telegráficos, en vez de abrir y cerrar el circuito, a los efectos de poder **sumar** tonos. Finalmente, el 10 de marzo de 1876, una semana después que la patente de Bell fuera aceptada, Bell y Watson logran transmitir una señal de voz a través de un cable eléctrico. La primer frase de la historia transmitida por un cable eléctrico fue: “*Mr. Watson, come here, I want you!*” (“*Sr. Watson, venga aquí, lo necesito!*”). La primera señal de voz transmitida por Bell y recibida por Watson se logró utilizando un transmisor líquido, algo que nunca había sido probado anteriormente por Bell, pero que **casualmente** estaba descrito en la solicitud de patente presentada, por Elisha Gray y negada por la oficina de patentes. El **transmisor líquido**, que se puede observar en la figura 1, consistía en una bocina que concentraba la voz sobre una membrana, la que vibraba según la presión de aire. A esta membrana estaba sujeta una barra metálica, la que se sumergía en un recipiente con agua ácida. Un contacto eléctrico estaba sujeto a la barra y otro al fondo del recipiente que contenía el líquido conductor. La resistencia entre los dos contactos variaba al subir y bajar la barra dentro del líquido. Estaba claro que este dispositivo no sería comercialmente viable. Bell diseña otro transmisor, basado en inducción electromagnética. Un imán permanente y una pieza móvil de metal interactuaban para inducir corriente en una bobina. El sistema original utilizaba el mismo transductor como micrófono y como altavoz. Los primeros teléfonos de Bell no utilizaban alimentación externa, sino que utilizaban la energía electromagnética generada en el transmisor.
- **1877** Thomas Edison presentó una solicitud de patente para un nuevo tipo de transmisor, que haría viable la telefonía. El dispositivo ideado por Edison se basa en una interesante propiedad del carbón: su resistencia eléctrica varía con la presión. La idea consistía en disponer una barra compuesta de gránulos de carbón entre dos

electrodos. Uno de ellos está fijo, mientras que el otro está unido a un diafragma que se mueve según la presión de aire. De esta manera, la resistencia entre los dos electrodos varía según la presión de aire y por lo tanto la corriente varía según las señales acústicas, en la figura 2 se puede observar este dispositivo.

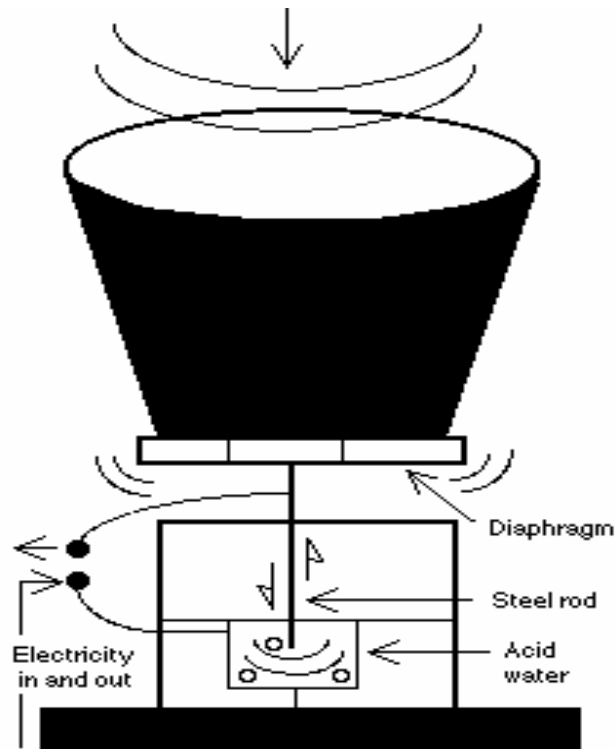


Figura 1. Transmisor líquido.

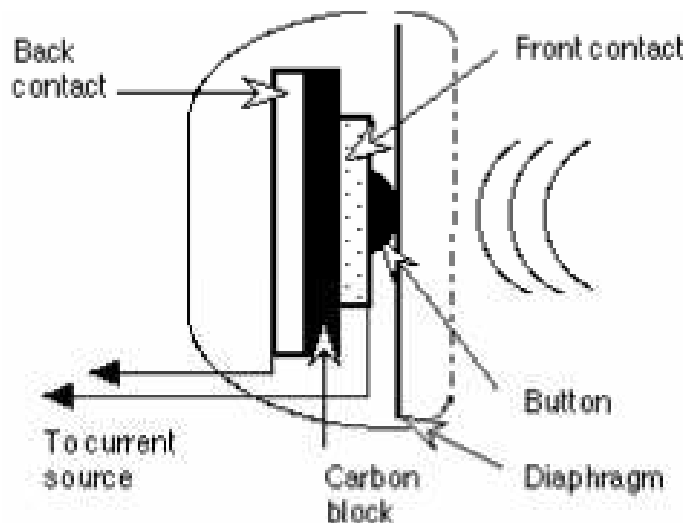


Figura 2. Transmisor con base en carbón.

- **1891** El físico francés Edouard Branly construyó el primer receptor de ondas electromagnéticas al que denominó cohesor. Consistía en un tubo lleno de limaduras de hierro conectado a una pila y un galvanómetro.

- **1895** Mientras la telefonía sobre cables telegráficos crecía, los intentos de realizar comunicaciones inalámbricas comenzaban. Guillermo Marconi logra realizar la primera transmisión telegráfica inalámbrica utilizando ondas de radio. Pocos años antes (entre 1886 y 1888), Heinrich Rudolph Hertz, había demostrado que las predicciones de James Clerk Maxwell de **1860** acerca de las radiaciones electromagnéticas, realmente funcionaban en la práctica. En **1899** estableció la primera comunicación telegráfica inalámbrica entre Francia e Inglaterra, a través del Canal de la Mancha.
- **1889**: Las agrupaciones de antenas fueron propuestas por Sydney George Brown y James Erskine-Murray, aunque los primeros experimentos no se produjeron hasta 7 años después. Las antenas de microondas, como reflectores parabólicos, lentes, bocinas y guías de onda ya se usaron **antes de 1900**.
- **1901** Marconi estableció la primera -comunicación transoceánica entre Cornwall en Gran Bretaña y Terranova, en Canadá. La frecuencia utilizada fue 820 KHz (366 m). La potencia del transmisor eran 15 kW. La antena transmisora era un monopolo en abanico, soportado por dos mástiles de 48 m separados 60 m. La antena receptora fue un hilo metálico, suspendido de una cometa.
- **1904** John Ambrose Fleming, el mismo que trabajaba con Marconi en la transmisión telegráfica inalámbrica, inventa un *rectificador electrónico de dos electrodos* (o diodo de vacío). Fleming entendía que el principal problema en la radiotelegrafía consistía en la recepción de las señales. Con su invento, era posible detectar las señales radiotelegráficas de manera confiable. Puede decirse que este invento marca el nacimiento de la electrónica. El dispositivo consistía en un tubo al vacío, con dos elementos, llamados **cátodo** y **ánodo**. En la primera implementación de este elemento, el cátodo consistía en un filamento que se calentaba por pasaje de corriente. En implementaciones posteriores, el cátodo era calentado mediante un filamento incandescente. Al calentarse, el cátodo emite electrones. Si se aplica una diferencia de potencial adecuada entre cátodo y el ánodo, los electrones liberados en el cátodo son atraídos por la placa, viajando libremente dentro del tubo vacío. De esta manera, se produce una corriente entre cátodo y placa. La corriente en sentido inverso no puede circular.
- **En 1905** las antenas habían evolucionado hacia un monopolo piramidal con carga capacitiva, a 70 KHz, en el lado británico y una estructura capacitiva con 200 radiales, a una altura de 60 m, en Terranova.
- **1906** Se construye en América el primer sistema para transmisión de voz a través de ondas electromagnéticas. Comenzando la era electrónica: rectificadores, triodos, válvulas termoiónicas, amplificadores, etc.
- **1906** Marconi midió el primer diagrama de radiación de una antena de hilo paralela al suelo. Dicha antena es la precursora de las actuales antenas de onda progresiva, rómbicas y V.
- **1908** Lee De Forest mejora el diodo de Fleming, inventando el *tubo electrónico de 3 elementos* o **triodo**. Este dispositivo fue el primer amplificador eléctrico. El dispositivo agrega al diodo de Fleming una **grilla** (una especie de malla metálica), entre el cátodo y placa. Los electrones pueden pasar entre los huecos de esta malla, desde el cátodo hasta la placa. Sin embargo, al aplicar un potencial adecuado entre el cátodo y la grilla, se logra que la grilla repela cierta cantidad de electrones, disminuyendo por lo tanto la corriente entre cátodo y placa. Por lo tanto, variando el potencial entre cátodo y grilla se regula la corriente entre cátodo y placa. Lee De Forest patentó su **audión** (triodo). El invento del triodo permitió amplificar las señales telefónicas, y por lo tanto habilitó la telefonía entre ciudades lejanas. También este invento permitió la amplificación de las señales de radiofrecuencia utilizadas por Marconi.

- **1910** El primer teléfono instalado en un automóvil data de 1910. La historia es interesante. Lars Magnus Ericsson (el fundador de la compañía Ericsson en 1876) y su esposa Hilda, se mudaron a una zona rural de Suecia en 1901. Cuando Ericsson le compró un automóvil a su esposa (toda una novedad en aquella época), Hilda quiso utilizarlo para recorrer el terreno. Preocupado por lo que le pudiera pasar en su recorrido con el nuevo vehículo, Lars Ericsson le dio a Hilda un teléfono, y dos largas varas, ¡las que debía utilizar para conectarse a las líneas telefónicas existentes! Debía buscar algún par libre, y enviar señal de campanilla a la operadora más cercana, para que le comunicara con su esposo.

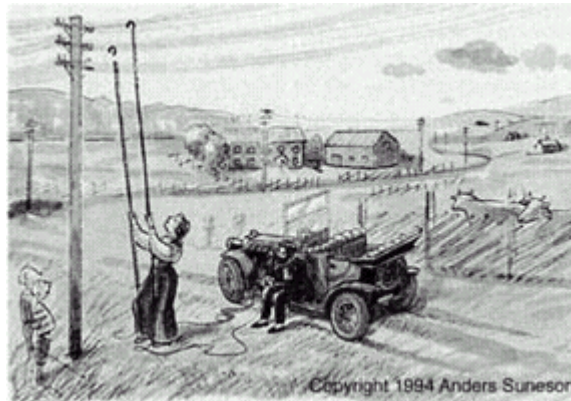


Figura 3. Teléfono en automóvil.

- **El período comprendido entre 1910 y 1919** se caracteriza por la construcción de transmisores con grandes antenas de baja frecuencia y elevada potencia. En la década 1910-1919 también se introdujeron nuevas técnicas, como las ayudas a la navegación, las comunicaciones con submarinos sumergidos y los sistemas de control a distancia. Nace la transmisión AM, usando una frecuencia portadora modulada por una señal de voz.
- **1914** En Estados Unidos se funda la A.R.R.L. (American Radio Relay League), primera organización de Radioaficionados de este País.
- **En 1916** Marconi realizó una serie de experimentos con señales de 2 y 3 m de longitud de onda, utilizando reflectores parabólicos cilíndricos, contruidos con hilos verticales. Los resultados de la experiencia aconsejaron la utilización de frecuencias de HF e impulsaron el descubrimiento de los enlaces troposféricos en 1932.
- **1918** Armstrong proyectó el circuito superheterodino, básico para receptores AM (moduladores de amplitud).
- **1920** La emisora MARCONI WIRELESS de Chelsford (Inglaterra) transmite, en plan de ensayo el primer concierto de música clásica. Amstrong desarrolla el circuito superheterodino.
- **1922:** La BBC emitió su primer programa no experimental en noviembre. En España, la primera emisora fue Radio Barcelona, inaugurada en el 24 de Octubre de **1924**. **En 1925** ya existían unos 600 emisores de ondas medias.

Las primeras antenas de radiodifusión eran muy similares a las utilizadas para las comunicaciones punto a punto pero pronto evolucionaron hacia el radiador de media onda, que ofrecía la ventaja de la cobertura omnidireccional.

Los receptores superheterodinos, inventados por Edwin H. Armstrong, fueron posibles gracias a los tubos electrónicos. Los receptores utilizaban como antenas la red eléctrica y como masa las cañerías de agua, pero pronto evolucionaron hacia las antenas en forma de T y piquetas de masa.

- **En 1922** Taylor y Young, del Naval Research -Laboratory (NRL), detectaron objetos en movimiento, midiendo las interferencias producidas en un sistema de radio de onda continuara la longitud de onda de 5 m con el transmisor y receptor separados, presagiando los sistemas de **radar**. Propusieron continuar los trabajos, pero su plan no fue aceptado.
- **1923** Se instala la primera central telefónica de larga distancia (Bavaria, Alemania). Vladimir Zworykin patenta su invento el tubo de rayos catódicos usado más adelante como el principal elemento para la televisión. Los radioaficionados FRED SCHENELL (1MO), en América, y LEON DELOY (8AB), en Francia, establece una comunicación en la banda de 110 metros. Zworykin inventa el tubo para transmisión de señales de televisión.
- **1924** Radioaficionados realizan los primeros QSO entre Francia y Australia. El día 23 de Marzo a las 10 de la noche comienzan las primeras emisiones experimentales españolas de radio en Onda Media desde el madrileño Prado del Rey n.18-22 a través de RADIO IBERICA, EAJ-6, que se inauguraría el día 12 de mayo a las diez de la noche.
- **1925: Televisión**, los primeros experimentos de televisión se iniciaron en Gran Bretaña. En 1925 John Logie Baird presentó un sistema de exploración mecánica de las imágenes.
- **En 1926** Uda realizó las agrupaciones de un solo elemento activo, con elementos parásitos. Dichas antenas denominadas **Yagi**, fueron dadas a conocer por el japonés así llamado, en un artículo publicado en inglés en el año 1928.
- **1928** El físico alemán Paul Nipkow, inventor de la televisión realiza la primera transmisión inalámbrica de imágenes.
- **En 1929** Franklin desarrolló un radiofaro en Escocia. Se empezó a utilizar el sistema de búsqueda de dirección (DF) de Adcock consistente en cuatro monopolos. En 1928 Diamond y Dunmore desarrollaron el primer sistema de aterrizaje instrumental ILS.

### 1.3. El desarrollo de las microondas y el RADAR.

En los primeros decenios del siglo XX las frecuencias de trabajo, en las bandas de LF, MF y HF, hacían que las antenas tuvieran unas dimensiones mucho menores o comparables a la longitud de onda. En dichas bandas los circuitos se pueden considerar como de elementos concentrados. Las bandas de microondas no están claramente definidas, pero se entiende que empiezan a partir de UHF, hasta banda X. En dichas bandas las antenas son mucho mayores que la longitud de onda, y los circuitos son de elementos distribuidos.

- **En el año 1930** se detectó, por primera vez un avión en vuelo, de una forma accidental. L. A. Hyland del Naval Research Laboratory (NRL). Comprobó, mientras probaba un sistema DF (direction finding), que al pasar un avión por las cercanías, se producía un incremento en la señal recibida.

- **1931** Primera transmisión electrónica de imágenes de televisión en Berlín. ALLEN DUMONT inventa el osciloscopio.
- **1931** Se estableció un enlace entre Francia y Oran Bretaña utilizando antenas reflectores a 1760 MHz. Marconi midió el alcance sobre el mar de una transmisión a 500 MHz, sobre el Mar Mediterráneo, encontrando que se podían recibir señales a una distancia igual a cinco veces el alcance visual, descubriendo lo que se conocería después como enlaces troposféricos.
- **1932** De los laboratorios de la A.R.R.L., en EE.UU., sale el prototipo del receptor superheterodino de JAMES LAMB. El día 26 de Septiembre comienzan las emisiones experimentales de EAQ-MADRI, la primera emisora de radiodifusión en Onda Corta de España.
- **En 1932 - RADAR:** ya se había perfeccionado el sistema de radar en el NRL, y se podían detectar aviones a una distancia de 80 kilómetros del transmisor. Las primeras experiencias con un radar pulsado en EEUU se realizaron en el NRL, en Abril de 1936, con un sistema a la frecuencia de 28.3 MHz y un ancho de pulso de 5 microsegundos. Al cabo de unos meses el alcance se aumentó en 40 Km.

Pronto se llegó a la conclusión de que era necesario subir en frecuencia, especialmente para los sistemas embarcados. Los primeros sistemas a 200 MHz se empezaron a desarrollar en **1936**. Con una potencia de 6 kW se alcanzaba una distancia de 50 millas. El sistema se denominó CXAM.

- **1935 El RADAR, En Gran Bretaña** se iniciaron los estudios sobre el radar cuando se propuso a Sir Robert Watson-Watt la construcción de un haz destructor con ondas de radio. Las conclusiones del estudio fueron de que no era viable, pero recomendaba estudiar el problema de la detección de objetos. En 1935 propuso las condiciones de funcionamiento. En **1936** se probó un sistema de interferencia de onda continua a 6 MHz. En **1935** se probó un sistema pulsado a 12 MHz, con un alcance de 40 millas.
- **1938** Se tenía en funcionamiento el famoso sistema de radar Chain Home, a 25 MHz, con un total de 5 estaciones costeras.
- **En Alemania se detectaron barcos en 1938** con un prototipo de radar llamado FREYA. La frecuencia de trabajo era de 125 MHz y el alcance entre 30 y 60 km.

En otros países como Francia, Rusia, Italia y Japón también se hicieron experimentos de interferencia en sistemas de comunicaciones de onda continua, e incluso Francia y Japón instalaron sistemas que se revelaron poco útiles en general.

- **1930 Radioastronomía:** Las interferencias que se producían en las comunicaciones de LF especialmente en el verano, hicieron que los laboratorios de la Bell encargaran a Karl G. Jansky, en 1930, un estudio para que determinara dichas direcciones, a fin de diseñar las antenas con nulos en ellas. Jansky construyó una antena tipo cortina de Bruce 8 elementos con reflector, funcionando en la banda de 14 metros, rotatoria. Con dicha antena comprobó que el ruido estaba originado en las tormentas, pero descubrió además una fuente de ruido que estaba siempre presente, y que tenía una periodicidad de 24 horas. Tras meses de observación Jansky determinó que provenía de la tierra y del sol y además que, había un ruido que provenía de la galaxia, con un máximo en el centro. Jansky había descubierto la Radioastronomía. Con las medidas del ruido se estableció el límite de sensibilidad que se podía alcanzar con un sistema receptor de onda corta.



- **1938** Grote Reber construyó una antena parabólica de 9 metros de diámetro, que funcionaba en la banda de 2 metros, con la que estableció los primeros radio mapas del cielo. John D. Kraus descubrió en 1946, en la Universidad de Ohio State, la antena hélice que se aplicó a la construcción de un radiotelescopio en 1951. La banda de funcionamiento era de 200 a 300 MHz.
- **1936** El ingeniero norteamericano Armstrong desarrolla los estudios técnicos para la puesta en práctica de la FM. Fue desarrollado el primer modelo de calculadora programable ZUSE Z1 por el ingeniero alemán Konrad Zuse, esta calculadora solo trabajaba con elementos mecánicos.
- **1936:** Las primeras transmisiones experimentales de TV electrónica se realizaron durante los juegos Olímpicos de Berlín en 1936. Las emisiones regulares de la BBC comenzaron el mismo año. Se utilizaba la frecuencia de 45 MHz. La antena transmisora era una agrupación circular de dipolos.
- **1937** Es desarrollado el tubo Klystron Reflex para generación de señales de microondas.

#### 1.4. La segunda guerra mundial (1939-1945)

La segunda guerra mundial supuso un esfuerzo considerable en el desarrollo de todas las tecnologías asociadas a las comunicaciones sobre todo de los sistemas de radar. Las investigaciones realizadas sentaron las bases para los desarrollos futuros de sistemas de aplicación civil.

Se usaron los reflectores, lentes y bocinas, que ya se habían diseñado a finales del siglo XIX, para demostrar las teorías de Maxwell. Durante esta época se utilizaron las guías de onda abiertas para alimentar reflectores o lentes, y las bocinas como radiadores poco directivos. También se desarrollaron las bocinas con dos modos para controlar la distribución de campos en la apertura.

Se desarrollaron variaciones del reflector parabólico, como cilindros o sectores. Las antenas **pillbox** o **cheese** se inventaron durante los años de la guerra. Para conformar el haz en forma de cosecante se deformaron los paraboloides o se utilizaron múltiples alimentadores. Se diseñaron arrays de guías ranuradas, en la cara estrecha o en la cara ancha, con diseños resonantes o de onda progresiva.

Durante la guerra se desarrolló toda la tecnología de guías de onda. Los trabajos de investigación fueron recopilados posteriormente por el **Radiation Laboratory** del M.I.T., bajo la supervisión del **National Defense Research Coninúttee**. Muchos de los textos siguen siendo una referencia obligada en la actualidad.

Por otra parte, el **magnetron** fue descubierto en el año 1940 en Gran Bretaña, por Boot y Randall. Dicho descubrimiento permitió el desarrollo del radar en ondas centimétricas. Se obtuvo una potencia media de 400 W utilizando un magnetron de 6 cavidades, a la longitud de onda de 9.8 cm.

En Estados Unidos se construyó el sistema EAGLE, con un array de 250 dipolos, a la longitud de onda de 3.2 cm, con la posibilidad de barrido en un margen de 60 grados.

**En 1936** la RBC inició la emisión de TV, utilizando sistemas mecánicos y electrónicos. Pronto se demostró la superioridad de los sistemas electrónicos. Durante la siguiente década se demostraron las ventajas de aumentar el ancho de banda y la frecuencia (VHF).

## 2. RADAR

### 2.1. Características principales.

Un sistema de RADAR (*radio detection and ranging*), realiza una detección y medición de distancias por radiofrecuencia utilizando para ello las características especiales que tienen las ondas electromagnéticas.

Un radar está compuesto principalmente por una antena muy directiva, un transmisor de alta potencia, un receptor con gran sensibilidad, y entre ambos un dispositivo que da paso al receptor y al transmisor en diferentes instantes de tiempo aislando fuertemente al contrario y que se denomina duplexor.

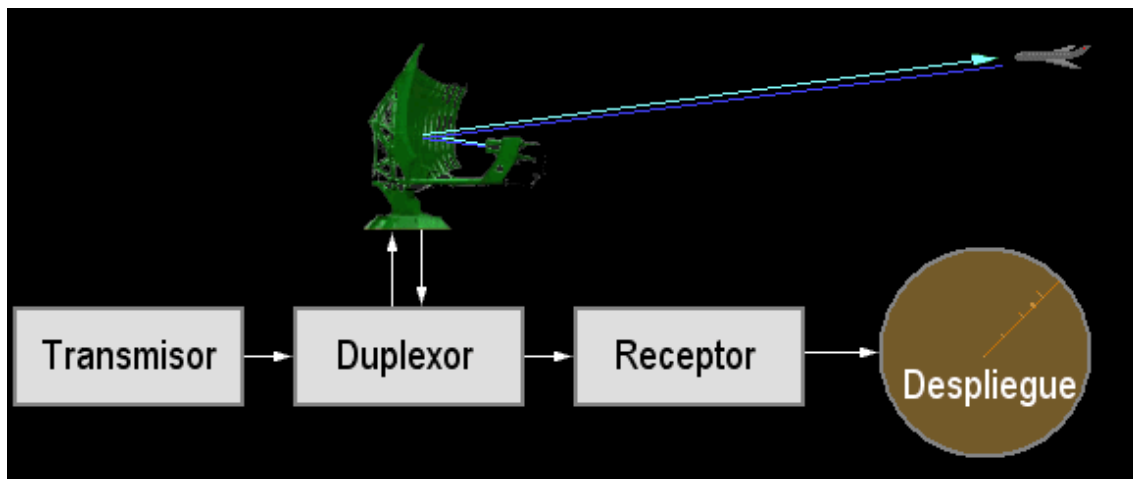


Figura 4. Esquema de radar.

Para el equipo de transmisión se utilizara un magnetrón, para la recepción se utilizara un receptor superheterodino y la antena será una antena muy directiva para poder determinar la dirección.

El radar realiza la transmisión de ondas de microondas a muy alta potencia y recibe el eco con un dispositivo receptor muy sensible, ya que la energía que se recibe es una mínima parte de la señal que se ha transmitido. Debido a que una posible derivación de la energía en transmisión al dispositivo de recepción podría ser destructivo para éste, se utiliza el duplexor, el cual deja paso durante un corto periodo de tiempo al equipo transmisor para que pueda transmitir las señales de microondas de alta potencia hacia la antena, aislando fuertemente al dispositivo receptor, y una vez finalizado el periodo de tiempo asignado a Tx, el duplexor cambia de estado y permite la pequeña potencia recibida por la antena alcance el equipo Rx, una vez tenemos los datos tanto de Tx como de Rx podemos obtener los resultados como velocidad, distancia del blanco, etc.

Existen multitud de radares dependiendo de varios factores como la elección del equipo transmisor que puede ser un magnetrón, un Klistrón o un TWT (tubo de ondas progresivas), también el tipo de radar puede depender de si se utiliza la señal de eco pura

(señal del reflejo del blanco) o si se utiliza una señal de radiofaro, es decir, que el radar emite una señal, y el blanco le transmite una señal de respuesta codificada con información de altitud, velocidad,..

Para este trabajo se ha decidido describir las características de un radar típico de respuesta de eco por reflexión de onda electromagnética utilizando como equipo transmisor un magnetrón.

A continuación se describirá el procedimiento y los dispositivos principales con los que se consigue la detección de objetos mediante el radar.

### **2.1.1. Reflexión de las ondas electromagnéticas.**

Las ondas electromagnéticas se reflejan sobre superficies conductoras, si las ondas reflejadas vuelven al punto de emisión en un tiempo determinado, se puede razonar que existe un objeto a una distancia que es determinada por el tiempo que ha tardado la onda transmitida en volver. Teniendo en cuenta que las ondas electromagnéticas viajan una velocidad aproximada a la de la luz  $C = 3 \cdot 10^8$  m/s.

Una onda electromagnética será reflejada por un cuerpo conductor, sí este es mayor o igual a la longitud de onda de la señal transmitida, y por lo tanto, el tamaño del objeto que se puede alcanzar dependerá de la frecuencia a la que la señal es transmitida, y a mayor frecuencia, menor longitud de onda, recordando que  $\lambda = C / f$ , y con ello se podrán detectar cuerpos más pequeños, con lo que se obtiene mayor resolución. Por este motivo se utilizan ondas de microondas que están en el rango de los GHz, porque por ejemplo una onda de 3 GHz, tendría una  $\lambda = 3 \cdot 10^8 / 3 \cdot 10^9 = 0.1$  metros, con lo cual podemos decir que un radar con frecuencia de transmisión de 3 GHz podemos detectar cuerpos conductores que tengan un tamaño de al menos 10 cm de tamaño, cuerpos más pequeños no serían detectados.

Otro de los motivos por los que se utilizan ondas electromagnéticas de alta frecuencia es porque se comportan como señales cuasi-ópticas, es decir casi rectilíneas, similares a las ondas de luz, y por ello pueden utilizarse las ecuaciones ópticas. Finalmente y como resultado del uso de altas frecuencias obtenemos que el tamaño de las antenas será menor.

### **2.1.2. Ecuación de radar.**

Como primera condición y para simplificar las ecuaciones se asumirá que las ondas se transmiten bajo condiciones ideales, sin dispersión.

Si la energía se transmite por un radiador isotrópico, la energía se transmite en todas direcciones donde sí medimos aéreas con la misma densidad de energía, éstas tomarán formas esféricas alrededor del transmisor, siendo la ecuación del área de la esfera como  $A = 4 \cdot \pi \cdot R^2$ . La misma cantidad de energía se alejará del transmisor aumentando el radio, es decir, que la densidad de energía en superficie de una esfera disminuye a medida

que el radio aumenta, con esta descripción se define la densidad de potencia omnidireccional  $S_u$  cómo:

$$S_u = \frac{P_s}{4 \cdot \pi \cdot R_1^2} \left( W/m^2 \right) \quad (1)$$

Donde  $P_s$  es la potencia transmitida y  $R_1^2$  es el rango de la antena (radio hasta blanco). Debido a que para obtener un blanco en una posición es necesario “apuntar” a éste con una antena en una dirección, no podemos utilizar una antena que emita por igual en todas direcciones y se utiliza una antena direccional, la cual concentra la energía en una dirección y como resultado aumenta la densidad de potencia en dicha dirección con un valor denominado ganancia, finalmente se define la densidad de potencia direccional  $S_g$  como:

$$S_g = S_u \cdot G \quad (2)$$

Donde  $G$  es la ganancia de la antena.

Por otra parte, poder detectar un objetivo mediante un radar no depende exclusivamente de la densidad de potencia en la posición del blanco, sino también de la capacidad que tenga el blanco para devolver la energía al emisor, es decir, la cantidad de potencia que el blanco puede devolver al emisor, este parámetro es denominado como la **sección transversal del radar  $\sigma$** , y que depende de muchos factores como los materiales empleados en la construcción o sus características físicas (aristas o bordes redondeados), pero para simplificar su comprensión se puede decir que un avión de 100 m de largo, 20 diámetro y (despreciando las alas), la sección transversal que se obtiene si la señal transmitida incide sobre el lateral (100m) será mucho mayor que si la señal incide de frente al avión (20 m diam.).

Podemos ahora describir que en la potencia reflejada  $P_r$  depende de la densidad de potencia, de la ganancia de la antena y de la sección transversal de radar.

$$P_r = S_u \cdot G \cdot \sigma \text{ (Wat)} \quad (3)$$

Por otra parte, los ecos tienen las mismas condiciones que la potencia transmitida, por ello sí la emisión de la onda reflejada se presenta como un equipo transmisor, la densidad de potencia que se encuentra el receptor  $S_e$  es:

$$S_e = \frac{P_s}{4 \cdot \pi \cdot R_2^2} \left( W/m^2 \right) \quad (4)$$

Donde en este caso  $R_2$  es la distancia entre el blanco y la antena, camino contrario a  $R_1$ .

Con este parámetro y con la apertura efectiva de la antena se puede obtener la ecuación de la potencia recibida como:

$$P_e = S_e \cdot A_w(W) \quad (5)$$

Donde la apertura efectiva de la antena  $A_w$  ( $m^2$ ) se deriva de que hay una diferencia entre la potencia recibida por la antena y la potencia de entrada al receptor debido a posibles pérdidas que existen en la antena y que se puede modelar como el valor de la eficiencia de la antena  $K_a$  :

$$A_w = A \cdot K_a \quad (6)$$

Donde  $A$  es el área efectiva de la antena y  $K_a$  es el valor de eficiencia de la antena que suele tener valores entre 0.6 y 0.7.

Aplicando una reordenación de las ecuaciones 4, 5 y 6 y teniendo en cuenta que se han visto por separado los caminos antena-blanco (R1), blanco-antena (R2) y asumiendo que  $R1 = R2 = R$ , se puede describir la potencia recibida como:

$$P_e = \frac{P_s \cdot G \cdot \sigma}{(4 \cdot \pi)^2 \cdot R^2} \cdot A \cdot K_a \quad (7)$$

Por otra parte, y conociendo ya el concepto de eficiencia de la antena se puede desarrollar la ganancia de la antena  $G$ , como:

$$G = \frac{4 \cdot \pi \cdot A \cdot K_a}{\lambda^2} \quad (8)$$

Ahora nuevamente podemos definir la potencia recibida como:

$$P_e = \frac{P_s \cdot G^2 \cdot \sigma \cdot \lambda^2}{(4 \cdot \pi)^3 \cdot R^4} \quad (9)$$

Una vez tenemos bien definida la potencia recibida y que ésta será conocida mediante el receptor al igual que conocemos la potencia transmitida, la ganancia de la antena, y la frecuencia a la que se transmite únicamente nos quedaría por conocer la sección transversal de radar y la distancia a la que se encuentra el blanco, el cual es nuestro

objetivo, por ello, y para simplificar más aun los cálculos vamos a suponer que la sección transversal es de  $1 \text{ m}^2$  y de este modo se obtiene la ecuación de radar como:

$$R = \sqrt[4]{\frac{P_s \cdot G^2 \cdot \sigma \cdot \lambda^2}{(4 \cdot \pi)^3 \cdot P_e}} \quad (10)$$

El valor de R por tanto quedara condicionado al valor de  $P_e$  y por ello se van a establecer los valores de  $R_{max}$  que vendrá determinado por  $P_{e\_min}$  donde este valor es determinado por la capacidad que tenga el receptor de discriminar las señales frente al ruido, la ecuación 10 queda definida para valores máximos de R como:

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_s \cdot G^2 \cdot \sigma \cdot \lambda^2}{(4 \cdot \pi)^3 \cdot P_{e\_min}}} \quad (11)$$

Para finalizar con la ecuación de radar, se puede incluir un nuevo parámetro el cual es un factor de perdidas,  $L_{ges}$ , el cual agrupa a  $L_D$  el cual es un factor de atenuación en la ruta de Tx y Rx en la unidad del radar;  $L_f$ , que es el factor de fluctuación durante el reflejo;  $L_{Atm}$ , perdidas atmosféricas durante la propagación de las ondas electromagnéticas hacia y desde objetivo.

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_s \cdot G^2 \cdot \sigma \cdot \lambda^2}{(4 \cdot \pi)^3 \cdot P_{e\_min} \cdot L_{ges}}} \quad (12)$$

Esta ecuación puede considerarse una muy buena aproximación de la ecuación de radar, aunque aun quedarían factores de atenuación que influyen en el resultado final como es la influencia de la superficie terrestre. Quedara como ejercicio de ampliación para un futuro trabajo el estudio de la influencia de la tierra en la transmisión/ recepción junto con otros factores que puedan influir en el cálculo de la ecuación de radar.

## 2.2. Magnetron

El dispositivo que hace posible que se transmitan ondas de microondas a alta potencia es el magnetron, que como se comentó en el capitulo anterior fue descubierto por Boot y Randall en Gran Bretaña, en el año 1940. A continuación se describen sus características físicas y el modo en el que consigue la alta frecuencia – alta potencia.

El margen de frecuencias que se pueden conseguir va desde los 600 a los 300.000 Mhz. Y aunque su construcción es simple, el magnetron solo puede funcionar a una frecuencia fija de manera constructiva.

### 2.2.1. Componentes del magnetrón

El magnetrón se puede clasificar como un diodo, ya que no tiene ninguna rejilla. El ánodo del magnetrón está formado por un bloque de cobre sólido cilíndrico. El cátodo y el filamento se encuentran en el centro del tubo, el filamento es lo suficientemente rígido para mantener al cátodo en una posición fija. Las cavidades resonantes se encuentran en el bloque del ánodo y son entre 8 y 20 huecos cilíndricos que se posicionan en circunferencia al cátodo. Estas cavidades controlarán la frecuencia de salida. Una ranura estrecha se extiende desde cada cavidad en la parte interior del ánodo, dividiendo la estructura en secciones, tantas como cavidades existan.

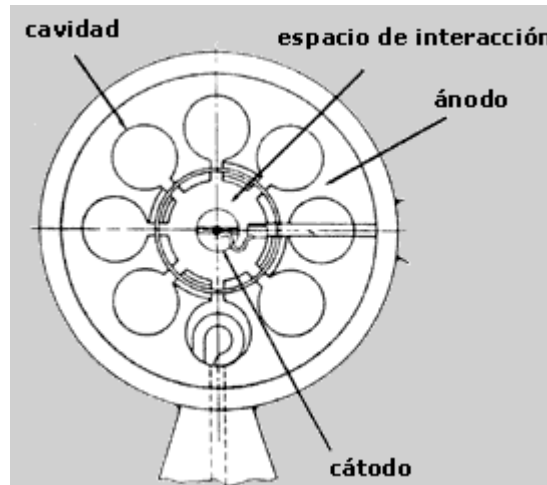


Figura 5. Esquema de magnetrón

El espacio libre que existe entre el ánodo y el cátodo se denomina espacio de interacción, y es aquí donde los campos eléctricos y magnéticos interactúan para ejercer fuerza sobre los electrones. El campo magnético es proporcionado por un potente imán montado de forma permanente alrededor del magnetrón para que el campo magnético esté en paralelo con el cátodo.

Existen diferentes tipos de cavidades, como se muestra en la figura 6:

- a- Tipo ranura.
- b- Tipo paleta.
- c- Tipo sol naciente.
- d- Tipo agujero y ranura.

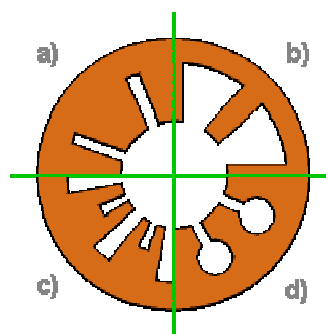


Figura 6. Tipos de cavidades.



### 2.2.2. Operación del magnetrón.

La generación de ondas de microondas a alta energía por parte del magnetrón se puede dividir en cuatro fases:

- 1- **Generación y aceleración de un haz de electrones.** Cuando no existe campo magnético se produce un movimiento uniforme y directo de los electrones desde el cátodo a la placa (camino azul en la figura 7), si la fuerza del campo magnético se incrementa, la trayectoria del electrón tendrá una curva más nítida (camino verde). Si se sigue aumentando el campo magnético, la velocidad de los de los electrones también aumenta, y puede generar un cambio brusco (camino amarillo). Sin embargo, cuando se alcanza el valor del campo crítico, como se muestra en la figura 7 como un camino rojo, los electrones son desviados lejos de la placa y la corriente en la placa cae rápidamente a un valor muy pequeño, cuando este valor cae a cero, es decir cuando los electrones no llegan a la placa en su movimiento circular, es cuando se producen las oscilaciones a las frecuencias de microondas.

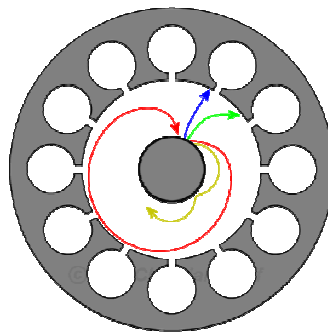


Figura 7. Diferentes caminos del electrón

- 2- **La velocidad de modulación del haz de electrones:** El campo eléctrico en el magnetrón es el producto de los campos de corriente alterna (CA) y corriente continua (CC). El campo de corriente continua se extiende radialmente desde los segmentos adyacentes del ánodo al cátodo. Los campos de corriente alterna, que se extienden entre los segmentos adyacentes, alcanzan la magnitud máxima con una alternancia determinada por las oscilaciones de RF que se producen en las cavidades. En la figura 8 se muestra únicamente la parte de la señal eléctrica de alta frecuencia de campo de corriente alterna. A medida que la corriente alterna aumenta o disminuye a su paso de los electrones por la cavidad, el valor de corriente continua aumenta o disminuye es proporción al paso de la corriente alterna. Finalmente podemos decir que los electrones que vuelan hacia los segmentos de ánodo cargado positivamente en un momento determinado se aceleraran, obteniendo una mayor velocidad tangencial y por otro lado los electrones que vuelan hacia el segmento del ánodo cargado negativamente en un momento determinado tendrá una velocidad tangencial menor.

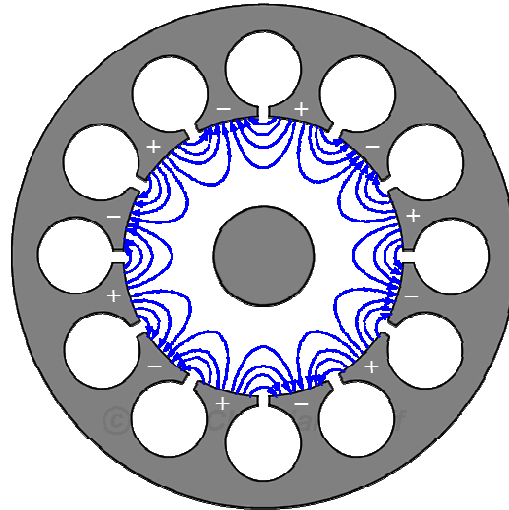


Figura 8. Señal eléctrica de corriente alterna en magnetrón.

- 3- **Formación de paquetes de electrones por la modulación de la velocidad (espacio de carga de la rueda).** La acción acumulativa de muchos electrones regresando al cátodo, mientras que otros se mueven hacia el ánodo forma un patrón parecido a los radios de una rueda en movimiento conocido como **el espacio de carga de la rueda**, como se indica en la figura 9. El espacio de la carga de rueda gira alrededor del cátodo a una velocidad angular de 2 polos (segmentos de ánodo) por ciclo del campo de corriente alterna. Esta relación de fase permite la concentración de electrones para proporcionar continuamente energía y mantener así las oscilaciones de RF. Cuando uno de los radios se acerca a un segmento de ánodo, este se carga más negativamente. Los electrones se retrasan y pasan su energía al campo de corriente alterna. Este estado no es estático, ya que tanto el campo de corriente alterna como el espacio de la carga de la rueda giran permanentemente de forma circular

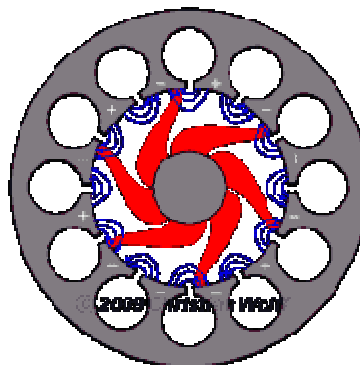


Figura 9. Giro de la rueda en magnetrón.

- 4- **Distribuir la energía para el campo de corriente alterna.**

Recordemos que un electrón que se mueve contra un campo  $E$  es acelerado por el campo y toma la energía del campo. Además, un electrón distribuye la energía a un campo y se ralentiza si se está moviendo en la misma dirección que el campo (positivo a negativo). El electrón pasa la energía a cada cavidad a medida que pasa el tiempo y llega al ánodo cuando su energía se acaba. Por lo tanto el electrón ha ayudado a mantener las oscilaciones porque se ha tomado la energía del campo de corriente continua y se ha dado al campo de corriente alterna. En la figura 10 se describe la ruta

del electrón en un período de tiempo más largo. Por la rotura múltiple del electrón la energía del electrón se utiliza de forma óptima. La eficacia alcanza valores de hasta 80%.

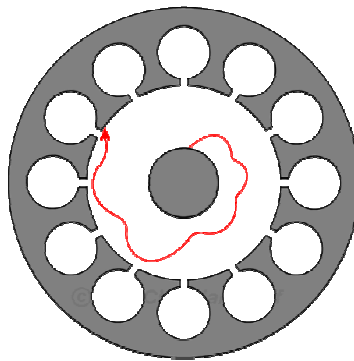


Figura 10. Ruta del electrón en magnetrón.

### 2.2.3. Oscilación transitoria.

Desafortunadamente, la oscilación transitoria no comienza con una fase predecible ya que cada oscilación transitoria se produce con una fase aleatoria y por lo tanto, los pulsos que son generados por un magnetrón para la transmisión no serán coherentes.

La frecuencia de operación depende de los tamaños de las cavidades y del espacio de interacción entre el ánodo y el cátodo. Pero las cavidades individuales se acoplan sobre el espacio de interacción con las demás cavidades. Por lo tanto existen varias frecuencias de resonancia para el sistema completo. Dos de los cuatro formas de onda posible de un magnetrón con 8 cavidades se representan en la figura 11. Los posibles modos de oscilación son:  $\pi$ ,  $3/4\pi$ ,  $1/2\pi$ ,  $1/4\pi$ . El modo de oscilación que alcanza una mayor potencia y rendimiento es el modelo de oscilación  $\pi$ , y es el que suele utilizarse.

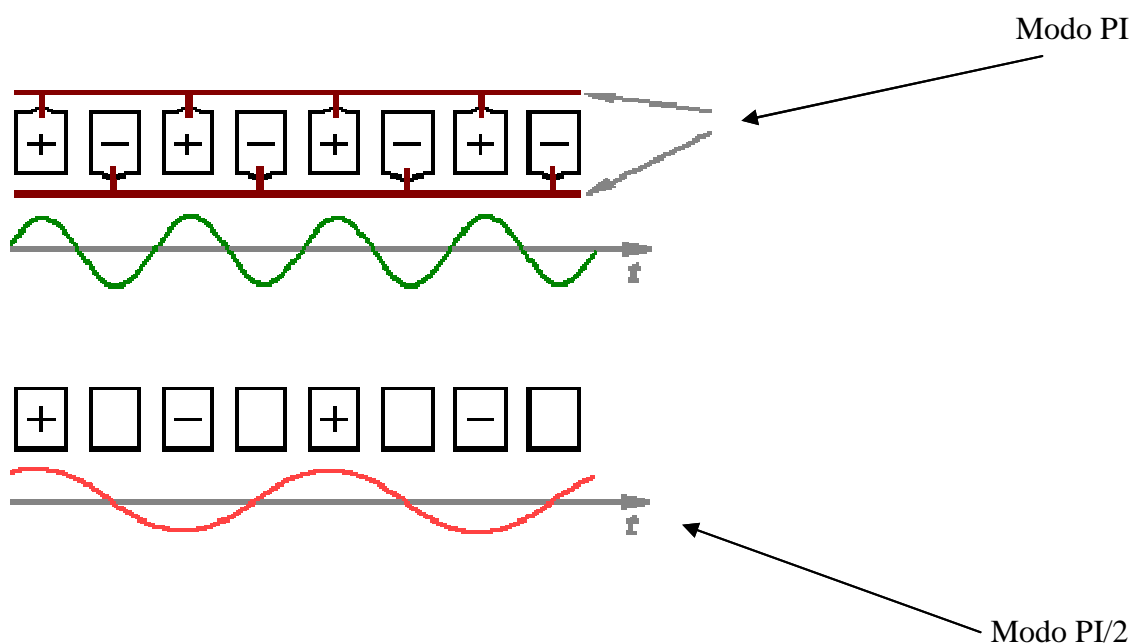


Figura 11. Formas de onda PI y PI/2 en salida de magnetrón.

### 2.3. Receptor superheterodino

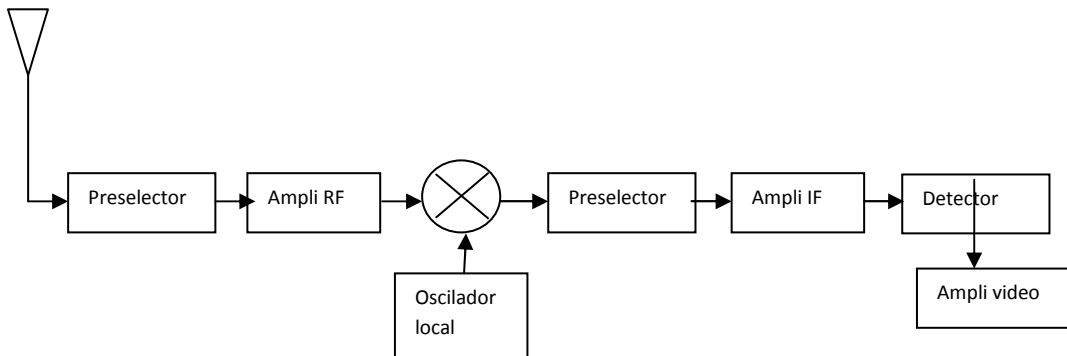


Figura 12. Receptor superheterodino

Este tipo de receptor es ampliamente utilizado por su gran eficiencia y sencillez, a continuación se describen cada uno de los elementos que componen el diagrama de bloques que se observa en la figura 12:

- **El preselector:** Es un filtro paso-banda ancho que cubre el rango de frecuencias que el receptor es capaz de detectar, se utiliza para canalizar la señal deseada eliminando así el resto de señal incluida la frecuencia imagen de la señal antes de que llegue el mezclador, además será eliminado gran parte del ruido de la señal no deseada.
- **El amplificador RF:** Amplifica la señal recibida para poder ser manipulada por el multiplicador.
- El **oscilador local** sintonizado aproximadamente a la frecuencia portadora y multiplicado por la señal de entrada genera dos señales una como  $f+f(\text{local})$  y otra en  $f-f(\text{local})$  de la que una de ellas quedara fuera del rango seleccionado por el preselector.
- **El preselector de IF** es un filtro paso banda de sintonía fija más estrecho ya que se ha conseguido delimitar la señal deseada en etapas anteriores.
- El **amplificador IF:** Da lugar a la mayor parte de la ganancia y selectividad, no debe de ser mayor al ancho de banda de la señal.
- **Detector:** Gracias a la frecuencia portadora es capaz de saber la frecuencia a la que ha sido transmitida la señal de entrada.
- El **amplificador de video** recibe impulsos del detector y amplifica estos pulsos para su aplicación en pantalla. Un amplificador de video es fundamentalmente un amplificador RC acoplado que utiliza transistores de alta ganancia. Sin embargo, un amplificador de vídeo debe ser capaz de ofrecer una respuesta de frecuencia relativamente amplia. La etapa de salida del receptor es normalmente un seguidor de emisor. La salida de baja impedancia del seguidor de emisor coincide con la impedancia del cable. Los pulsos de video están acoplados a través del cable para la visualización del vídeo.

## 2.4. Duplexor

El duplexor es un dispositivo capaz de alternar el paso de la energía transmitida o recibida en su camino entre el transmisor y receptor a la antena, debido a la alta potencia de transmisión y a la alta sensibilidad del receptor es necesario que ambos estén fuertemente aislados, para ello se utiliza este dispositivo.

Los duplexores pueden ser de diferentes formas como:

- Circulador de ferrita.
- Cavidades resonantes.
- Guías de onda.

A continuación se describirá el circulador de ferrita:

El funcionamiento de un circulador, figura 13, se puede comparar con una puerta giratoria con tres entradas y un sentido obligatorio rotativo. Esta rotación se basa en la interacción de la onda electromagnética con la magnetización de la ferrita. Una señal de microondas entra a través de una entrada específica, sigue el sentido de rotación establecido y tiene que salir de la bomba de circulación a través de la siguiente salida.

En un principio, en la entrada 1 del circulador de ferrita la energía se divide en dos partes iguales, pero estas partes obtienen una velocidad de propagación diferente por la influencia de la ferrita.

El circulador se construye mediante un disco de ferrita colocado debajo de las pistas conductoras. En la figura se muestra la forma de construcción y el principio de funcionamiento. El circulador se desarrolla sobre un efecto físico propio de los materiales ferromagnéticos. El fenómeno de resonancia giromagnética permite que la constante de fase de propagación de la onda difiera en  $\lambda/2$  entre los 2 sentidos de giro.

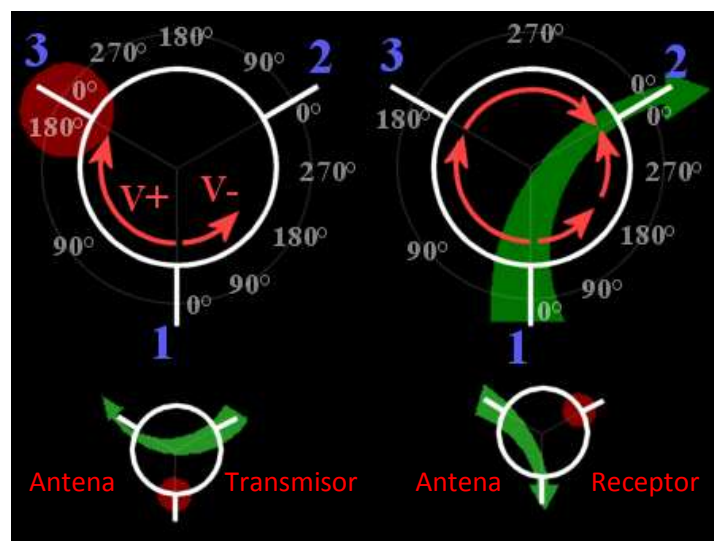


Figura 13. Esquema de duplexor.

## 2.5. Antenas.

Se pueden utilizar diferentes tipos de antenas para el dispositivo radar dependiendo de los diferentes blancos que se desea alcanzar, como por ejemplo las antenas parabólicas, modelo cuadrado cosecante, cassegrain,... con un punto en común, que sean muy directivas. A continuación se describe el modelo común de una antena parabólica.

### 2.5.1. Antena Parabólica.

La utilización de una antena parabólica es la opción más común en los sistemas de radar. Se compone de un plato parabólico reflector y la antena de tipo bocina.

El reflector está construido de metal, generalmente un bastidor cubierto por una malla metálica en el lado interior. La anchura de las ranuras de la malla metálica tiene que ser menor que  $\lambda/10$ . Esta forma metálica que cubre el reflector actúa como un espejo para la energía del radar.

De acuerdo con las leyes de la óptica y la geometría, y considerando el reflector ideal, para este tipo de reflector todos los rayos reflejados serán paralelos al eje del paraboloide que nos da idealmente un solo rayo reflejado paralelo al eje principal sin lóbulos laterales. El campo radiado por la bocina con un frente de onda esférica llega al plato reflector donde se realiza una inversión de fase y a partir de aquí señal viaja con trayectorias paralelas. Si el espejo tiene una forma elíptica, entonces se producirá un haz de abanico.

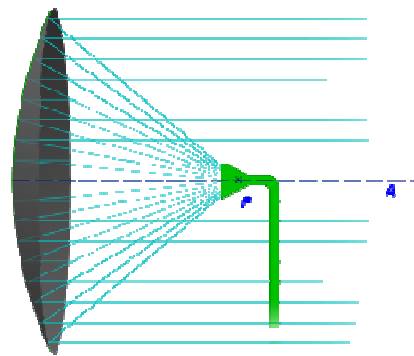


Figura 14. Reflector parabólico 1.

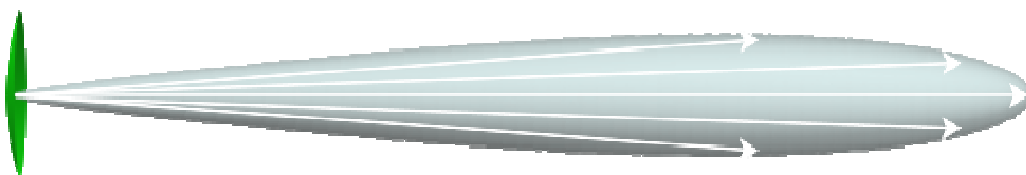
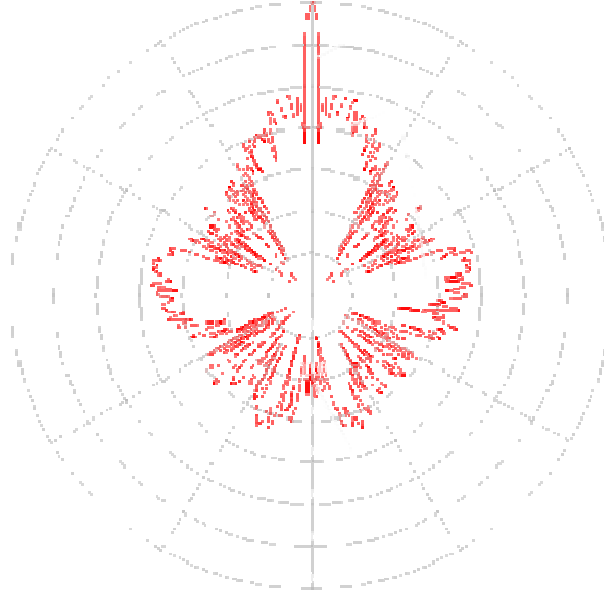


Figura 15. Reflector parabólico 2.

Este caso ideal se muestra en la figura 15 no sucede en la práctica. El verdadero patrón de antenas parabólica tiene una forma cónica, debido a irregularidades en la producción donde se puede observar en la figura 15. El lóbulo principal puede variar en amplitud angular de uno o dos grados en algunos radares de 15 a 20 grados en otros radares.



**Figura16.** Diagrama de radiación de antena parabólica

El patrón de radiación de una antena parabólica contiene un lóbulo mayor, que está dirigida a lo largo del eje de propagación, y varios lóbulos menores pequeños. En la figura 16 se puede observar la sección transversal horizontal de un patrón de radiación real medida de una antena parabólica en escala logarítmica.





### **3. Sistemas militares de localización por satélite.**

#### **3.1. Antecedentes históricos de localización terrestre y marítima.**

##### **3.1.1. Anterior a la II Guerra Mundial**

El ser humano desde tiempos remotos ha buscado la manera de orientarse debidamente por tierra o mar para llegar a su destino, probablemente la forma más primitiva fue colocar piedras o hacer marcas en los arboles para identificar el camino realizado y con ello poder regresar.

En los inicios de la navegación los marinos seguían la línea de costa para no perderse en la inmensidad del océano. La civilización fenicia fue la primera que se alejaron de las costas adentrándose en mar abierto por el Mediterráneo, los fenicios utilizaban como forma de orientación durante el día, el Sol, y durante la noche, la estrella polar en sus viajes a Egipto y la isla de Creta.

A partir del siglo XII se comenzó a utilizar la brújula, la cual informa del polo norte y sur magnético terrestre y permite observar la desviación con respecto a estos. Por otra parte, en 1492, Cristóbal Colón utilizaba otro dispositivo, el astrolabio, formado por un disco metálico y un brazo móvil, que le ayudo en el descubrimiento de América. Años después el dispositivo empleado pasaría a ser el sextante por ser más preciso que el astrolabio. En 1761 se comenzó a utilizar otro elemento para mejorar la navegación, el cronometro náutico, que se sincronizaba con la hora GMT, y que fue complemento de sextante durante dos siglos. Y con la combinación de ambos se podía determinar la longitud y latitud de cualquier parte de la tierra o el mar, tomando como única referencia la hora y la posición del sol durante el día y la posición de las estrellas por la noche.

Durante las primeras décadas del siglo XX, el descubrimiento de las ondas de radio y su aplicación como ayuda a la navegación aumentó la fiabilidad de los cronómetros. Gracias a la radiodifusión de señales horarias los relojes de los barcos se ajustaban periódicamente a una hora exacta tomando como referencia la hora GMT.

Antes de existir el sistema GPS se utilizaron otros sistemas de navegación y posicionamiento basados en la recepción de señales de radio, que aplicaban el principio matemático de la triangulación. Estos sistemas podían determinar la posición de un barco o un avión sin necesidad de conocer la distancia que los separaba de otros puntos de referencia.

##### **3.1.2. Segunda Guerra Mundial.**

Durante la Segunda Guerra Mundial se desarrollaron el radiogoniómetro, el radiofaro direccional, las radio balizas y el loran, todos ellos basados en la transmisión o recepción de ondas de radio. El radiogoniómetro fue el primero que se utilizó de forma generalizada como ayuda a la navegación.

El radiogoniómetro más elemental consiste en un receptor convencional de ondas de radio, dotado con una antena orientable, que permite no sólo captar las señales de radio, sino también determinar la dirección del lugar de donde proceden. La antena se encuentra montada en un eje vertical y a una determinada altura en el exterior. La colocación de la antena en el eje permite hacerla rotar hacia un lado o hacia el otro para poder captar lo mejor posible las señales provenientes de las estaciones terrestres.

### **3.1.3. Posterior a la II Guerra Mundial**

Tras los grandes avances tecnológicos en la II Guerra Mundial, y con el lanzamiento de los primeros satélites en la segunda mitad del siglo XX con lo que se podían lograr grandes áreas de cobertura radioeléctrica, se desarrollaron las bases de lo que posteriormente sería el Sistema de Posicionamiento Global (GPS, *Global Positioning System*).

## **3.2. Coordenadas y triangulación.**

### **3.2.1. Latitud y longitud.**

Para poder localizar un punto sobre la superficie terrestre es necesario conocer sus coordenadas de latitud y longitud.

Las líneas de latitud o paralelos son unas líneas imaginarias concéntricas a la tierra que comienzan en el Ecuador (0°) y se expanden hacia los polos, la línea del Ecuador (recibe su nombre por que atraviesa la ciudad de Quito, capital de la Republica Ecuador) divide a la Tierra en dos hemisferios, hemisferio Norte y hemisferio Sur. Dichas líneas concéntricas van disminuyendo su diámetro a medida que se acercan a los polos hasta que se convierten en un único punto donde éste tendrá un valor de 90°, cada círculo a su vez se puede dividir en 360°, las líneas imaginarias perpendiculares a los paralelos se denominan meridianos y determinaran la segunda coordenada, la longitud, y se extienden desde el polo Norte al polo Sur. Se tomo como punto de referencia de longitud 0 el meridiano que atraviesa el Real Observatorio Astronómico de Greenwich, este meridiano también divide la Tierra en dos mitades, tomando como referencia el eje de rotación de la Tierra el hemisferio occidental hacia el oeste y el hemisferio oriental hacia el este.

La hora GMT (*Greenwich Mean Time*) se define por la posición del Sol y las estrellas, pero con la aparición de los relojes atómicos, como los que emplean los satélites GPS, se ha establecido la hora UTC o Tiempo Universal Coordinado en sustitución de la hora GMT. Este cambio se debe a que la rotación de la Tierra sufre variaciones retrasándose la hora con respecto al tiempo atómico. Por otra parte, la hora UTC es de una alta precisión, tal como la requieren los navegadores GPS para poder localizar con exactitud un punto cualquiera de la Tierra.

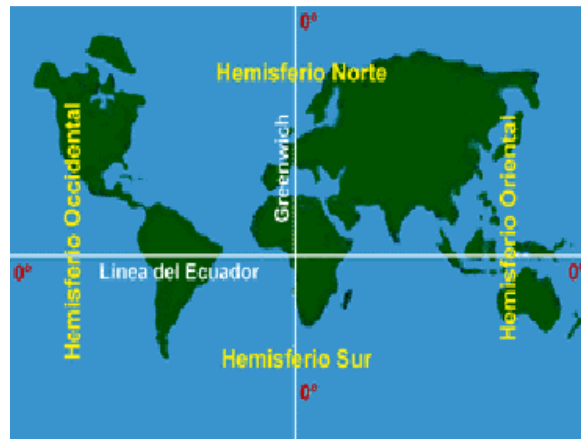


Figura 17. Localización de líneas Greenwich y Ecuador.

### 3.2.2. Localización de un punto por triangulación

El principio matemático de la triangulación permite establecer el punto de la Tierra sobre el cual estamos situados. Para ello será necesario conocer la distancia que nos separa de tres puntos de ubicación conocida y trazar tres círculos, cuyos radios ( $r$ ) se corresponden con esas distancias.

Supongamos que nos encontramos situados en un punto desconocido, cerca de otro al que llamaremos “A”, cuyo radio es ( $r$ ); al doble de esa distancia ( $2r$ ) está situado el punto “B” y al triple de la distancia ( $3r$ ) el punto “C”.

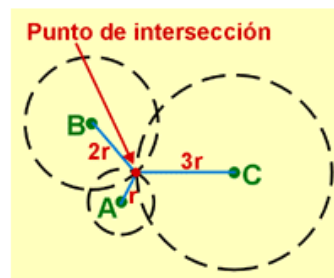


Figura 18. Punto de intersección

Si trazamos sobre un mapa de la zona tres circunferencias, tomando como centro los puntos A, B y C y como valor de sus radios las distancias a escala reducida que nos separa del centro de cada círculo, el punto donde se cortan las circunferencias será el lugar donde nos encontramos situados.

Por supuesto, esta explicación sólo constituye una demostración matemática del principio de la triangulación, porque no sería lógico conocer dónde están situados esos tres puntos de referencia e incluso la distancia que nos separa de ellos y no conocer realmente el punto donde nos encontramos situados.

Sin embargo, si contáramos con un dispositivo capaz de calcular por sí mismo la distancia que nos separa de A, B y C, entonces sí sería posible ubicar nuestra posición. Es en ese principio en el que se basa, precisamente, el funcionamiento de los receptores GPS.

### 3.3. El GPS

El sistema GPS consta de tres partes principales: los satélites, los receptores y el control terrestre. El sistema se compone de 24 satélites distribuidos en seis órbitas polares diferentes, situadas a 20.200 km de distancia de la Tierra. Cada satélite gira alrededor de la tierra dos veces al día. Por encima del horizonte siempre están **visibles** para los receptores GPS por lo menos 4 satélites, de forma tal que puedan operar correctamente desde cualquier punto de la Tierra donde se encuentren situados.

Por norma general y para mayor exactitud del sistema, dentro del campo visual de cualquier receptor GPS siempre hay por lo menos 8 satélites presentes. Cada uno de esos satélites mide 5 metros de largo y pesa 860 kg. La energía eléctrica que requieren para su funcionamiento la obtienen a partir de dos paneles formados por celdas solares adosadas a sus costados. Están equipados con un transmisor de señales codificadas de alta frecuencia, un sistema de computación y un reloj atómico de cesio, tan exacto que solamente se atrasa un segundo cada 30 mil años.

La posición que ocupan los satélites en sus respectivas órbitas facilita que el receptor GPS reciba, de forma constante y simultánea, las señales de por lo menos 6 u 8 de ellos, independientemente del sitio donde nos encontremos situado. Mientras más señales capte el receptor GPS, más precisión tendrá para determinar las coordenadas donde se encuentra situado.



Figura 19. Satélite GPS 1.

El sistema se compone de tres segmentos:

- 1- **Segmento espacial:** Satélites que orbitan alrededor de la tierra.
- 2- **Segmento de control:** Formado por estaciones ubicadas alrededor del ecuador terrestre para controlar los satélites.
- 3- **Segmento de usuarios:** Cualquiera que reciba y utilice las señales de GPS.

### 3.3.1. Segmento espacial.

El segmento Espacial consiste de 24 satélites que giran alrededor de la tierra en órbitas ubicadas aproximadamente a 20,200 km cada 12 horas.

El segmento espacial está diseñado de tal forma que se pueda contar con un mínimo de 4 satélites visibles por encima de un ángulo de elevación de  $15^\circ$  en cualquier punto de la superficie terrestre, durante las 24 horas del día. Para la mayoría de las aplicaciones, el número mínimo de satélites visibles deberá ser de cuatro. La experiencia ha demostrado que la mayor parte del tiempo hay por lo menos 5 satélites visibles por encima de los  $15^\circ$ , y muy a menudo hay 6 o 7 satélites visibles.

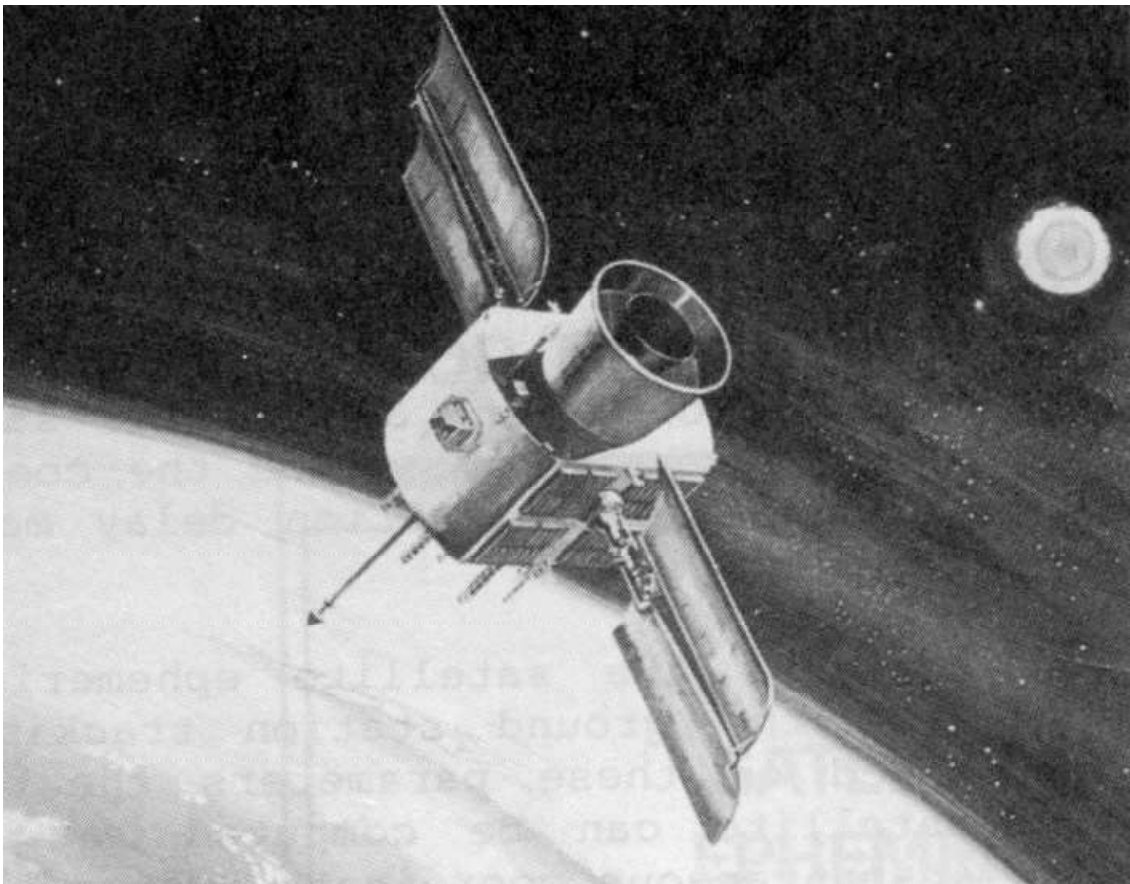


Figura 20. Satélite GPS 2.

Cada satélite GPS lleva a bordo varios relojes atómicos muy precisos. Estos relojes operan en una frecuencia de fundamental de 10.23MHz, la cual se emplea para generar las señales transmitidas por el satélite.

Los satélites transmiten constantemente en dos ondas portadoras. Estas ondas portadoras se encuentran en la banda L (utilizada para transmisiones de radio) y viajan a la Tierra a la velocidad de la luz. Dichas ondas portadoras se derivan de la frecuencia fundamental, generada por un reloj atómico muy preciso:

- La portadora L1 es transmitida a 1575.42 MHz ( $10.23 \times 154$ ).
- La portadora L2 es transmitida a 1227.60 MHz ( $10.23 \times 120$ ).

La portadora L1 es modulada por dos códigos. El Código C/A o Código de Adquisición Gruesa modula a 1.023MHz (10.23/10) y el código P o Código de Precisión modula a 10.23MHz. L2 es modulada por un código solamente. El código P en L2 modula a 10.23 MHz. Los receptores GPS utilizan los diferentes códigos para distinguir los satélites. Los códigos también pueden ser empleados como base para realizar las mediciones de pseudodistancia y a partir de ahí, calcular una posición.

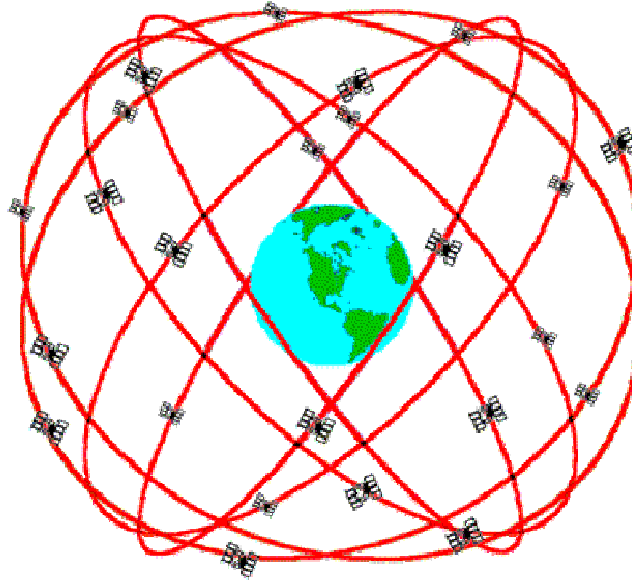


Figura 21. Constelación de satélites GPS.

### 3.3.2. Segmento de control

La estación maestra de control es la central de procesamiento del GPS y está funcionando 24 horas al día los 7 días de la semana. Sus funciones son seguimiento, monitorización y manejo de la constelación de satélites GPS además de actualizar el mensaje de navegación.

Las estaciones monitoras son unos receptores radio muy precisos localizadas en posiciones determinadas con mucha precisión. Su función es el seguimiento pasivo de los satélites GPS que tienen a la vista, más de 11 simultáneamente, y obtiene la información necesaria para calcular con gran precisión las órbitas de los satélites.

Las estaciones monitoras hacen un pequeño procesamiento de datos, o mejor dicho, envían a la estación maestra de control sus medidas y observaciones de mensajes de navegación. La información la procesa la MCS para estimar y predecir las efemérides y parámetros de reloj de los satélites. **Efemérides** se refiere a los parámetros de localización y órbita exactos de un satélite, es decir, sus datos de seguimiento. Con esto se puede calcular la posición de un satélite con un error menor de 1 m. en sentido radial, 7 m. en el sentido de la trayectoria y 3 m. en la dirección perpendicular a la misma. Utilizando esta información la estación maestra envía periódicamente a cada satélite, efemérides y datos de reloj actualizados en los mensajes de navegación.

La información actualizada se envía a los satélites vía **antenas de Tierra (GAs)**, que también se utilizan para enviar y recibir información de control del satélite. Todas las estaciones monitoras excepto Hawaii y Colorado Spring están equipadas con antenas de Tierra. Las otras tres también se llaman estaciones **Up-link**.

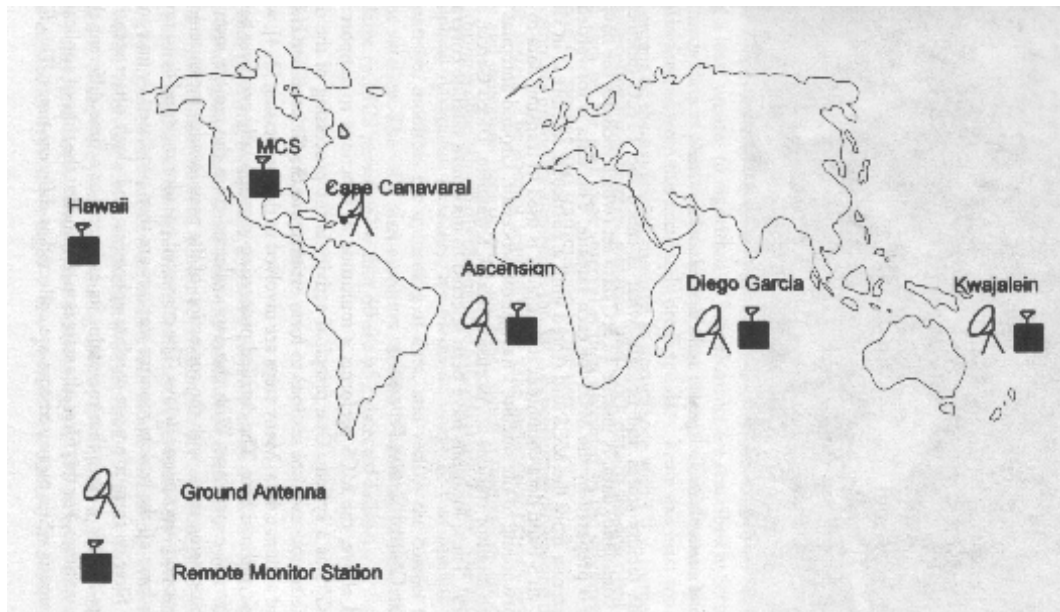


Figura 22. Estaciones en tierra GA y estaciones monitoras.

### 3.3.3. Segmento de usuario

El segmento de usuario es el consumidor final del GPS y consiste en una variedad de receptores/procesadores civiles y militares específicamente diseñados para recibir o sintonizar la señal emitida por los satélites, decodificar el mensaje de navegación, medir los tiempos de retardo y procesar los códigos y mensajes de navegación que envía el satélite GPS.

El GPS fue diseñado para dos niveles de usuarios, los que usan el Servicio de Posicionamiento Estándar, **Standard Positioning Service (SPS)** y los que utilizan el Servicio de Posicionamiento Preciso, **Precise Positioning Service (PPS)**. Su utilización se dedica a:

- El PPS está reservado para uso militar.
- El SPS para otros usos.

Las diferencias actuales entre el servicio de posicionamiento estándar y el preciso es la precisión conseguida.

Algunas aplicaciones generales del GPS son:

- Navegación.
- Posicionamiento.
- Transferencia de tiempo.

- Geodesia.

Debido al gran potencial para aplicaciones especializadas y variadas, el equipamiento de usuario puede variar significativamente en su diseño y función. La estructura general de un equipo de usuario consta de los siguientes bloques funcionales:

- **Una antena en banda L**, para recibir la señal transmitida por el satélite. Tiene cobertura semiesférica y suele incluir un amplificador de bajo ruido para permitir un cable de recepción largo sin degradar la sensibilidad del sistema.
- **Un radio receptor PM (fase modulada)**. Traslada la señal a FI y realiza el procesamiento de la señal que fundamentalmente consiste en filtrado de la señal, demodulación del mensaje de navegación en dos lazos de enganche a la portadora y el código recibido.
- **La unidad de control o interfaz de usuario**. Permite la comunicación entre el usuario y el microprocesador. A través de ella se le suministran datos tales como: posición y velocidad aproximada, tipo de presentación deseada, etc. En algunos casos a través de este interfaz se puede integrar el equipo con otros sistemas de navegación.
- **El microprocesador** controla toda la operación del receptor y realiza el procesamiento de software requerido.

### 3.3.4. Métodos de trabajo de GPS.

Existen diferentes métodos para obtener una posición empleando el GPS. El método a utilizar depende de la precisión requerida por el usuario y el tipo de receptor disponible. Generalmente, estas técnicas pueden ser clasificadas básicamente en tres clases:

- **Navegación Autónoma** empleando sólo un receptor simple. Utilizado por excursionistas, barcos en alta mar y las fuerzas armadas. La Precisión de la Posición es mejor que 100m para usuarios civiles y alrededor de 20m para usuarios militares.
- **Posicionamiento Diferencial de Fase**. Ofrece una precisión de 0.5-20mm. Utilizado para diversos trabajos de topografía, control de maquinaria, etc.
- **Posicionamiento Diferencial Corregido**. Más comúnmente conocido como DGPS, el cual proporciona precisiones del orden de 0.5-5m. Utilizado para navegación costera, adquisición de datos para SIG (Sistemas de Información Geográfica GIS), agricultura automatizada, etc.

#### 3.3.4.1. Navegación autónoma

Esta es la técnica más sencilla empleada por los receptores GPS para proporcionar instantáneamente al usuario, la posición y altura y/o tiempo. La precisión obtenida es mejor que 100m (por lo general entre 30 y 40m) para usuarios civiles y 5-15m para usuarios militares. Las diferencias entre las precisiones civiles y militares serán explicadas más adelante. Los receptores utilizados para este tipo de aplicación, son por lo general unidades pequeñas, portátiles y de bajo costo.

Todas las posiciones GPS están basadas en la medición de la distancia desde los satélites hasta el receptor GPS en Tierra. Esta distancia hacia cada satélite puede ser



determinada por el receptor GPS. La idea básica es la de una intersección inversa, la cual es utilizada por los topógrafos en su trabajo diario. Si se conoce la distancia hacia tres puntos en relación a una posición, entonces se puede determinar la posición relativa a esos tres puntos. A partir de la distancia hacia un satélite, sabemos que la posición del receptor debe estar en algún punto sobre la superficie de una esfera imaginaria cuyo origen es el satélite mismo. La posición del receptor se podrá determinar al intersectar tres esferas imaginarias.

El problema con el GPS es que sólo se pueden determinar las distancias y el tiempo al momento que llegan las señales al receptor. De este modo existen cuatro incógnitas a determinar: posición (X, Y, Z) y el tiempo que tarda en viajar la señal. Observando a cuatro satélites se generan las cuatro ecuaciones. Para calcular la distancia a cada satélite, se utiliza una de las leyes del movimiento ( $\text{Distancia} = \text{Velocidad} \cdot \text{Tiempo}$ ).

El GPS requiere que el receptor calcule la distancia del receptor al satélite. La Velocidad es la velocidad de las señales de radio. Las señales de radio viajan aproximadamente a la velocidad de la luz, a 290.000 Km por segundo. El tiempo es aquel que necesita una señal de radio en viajar desde el satélite al receptor GPS. Esto es un poco difícil de calcular, ya que se necesita conocer el momento en que la señal de radio salió del satélite y el momento en que llegó al receptor.

Como se ha descrito anteriormente, la señal del satélite es modulada por dos códigos, el Código C/A y el Código P. El código C/A está basado en el tiempo marcado por un reloj atómico de alta precisión.

El receptor cuenta también con un reloj que se utiliza para generar un código C/A coincidente con el del satélite. De esta forma, el receptor GPS puede correlacionar el código que recibe del satélite con el generado por el receptor. El código C/A es un código digital que es 'seudo-aleatorio', o que aparenta ser aleatorio. En realidad no lo es, sino que se repite mil veces por segundo. De esta forma es como se calcula el tiempo que tarda en viajar la señal de radio desde el satélite hasta el receptor GPS.

Por otra parte, se ha asumido que la posición obtenida del GPS es muy precisa y libre de errores, pero existen diferentes fuentes de error que degradan la posición GPS desde algunos metros, en teoría, hasta algunas decenas de metros. Estas fuentes de error son:

1. Retrasos ionosféricos y atmosféricos.
2. Errores en el reloj del Satélite y del Receptor.
3. Efecto Multitrayectoria.
4. Dilución de la Precisión.
5. Disponibilidad Selectiva (S/A).
6. Anti Spoofing (A-S).

- **Retrasos ionosféricos y atmosféricos**

Al pasar la señal del satélite a través de la ionosfera, su velocidad puede disminuir, este efecto es similar a la refracción producida al atravesar la luz un bloque de vidrio. Estos retrasos atmosféricos pueden introducir un error en el cálculo de la distancia, ya que la velocidad de la señal se ve afectada. (La luz sólo tiene una velocidad constante en el vacío).

La ionosfera no introduce un retraso constante en la señal. Existen diversos factores que influyen en el retraso producido por la ionosfera.

- a. **Elevación del satélite.** Las señales de satélites que se encuentran en un ángulo de elevación bajo se verán más afectadas que las señales de satélites que se encuentran en un ángulo de elevación mayor. Esto es debido a la mayor distancia que la señal tiene que viajar a través de la atmósfera.
  - b. **La densidad de la ionosfera está afectada por el Sol.** Durante la noche, la influencia ionosférica es mínima. Durante el día, el efecto de la ionosfera se incrementa y disminuye la velocidad de la señal. La densidad de la ionosfera varía con los ciclos solares (actividad de las manchas solares). La actividad de las manchas solares llega a su máximo cada 11 años, en la actualidad estamos en un periodo de máxima actividad solar por lo que a lo largo de la década de 2010-2020 ocurrirán fenómenos de este tipo. Además de esto, las llamaradas solares pueden ocurrir de manera aleatoria, lo cual también tiene un efecto sobre la ionosfera. Los errores debidos a la ionosfera pueden ser mitigados empleando uno de dos métodos:
    - El **primer método** supone la toma de un promedio del efecto de la reducción de la velocidad de la luz causada por la ionosfera. Este factor de corrección puede ser entonces aplicado a una serie de cálculos. Sin embargo, esto depende de un promedio y obviamente esta condición promedio no ocurre todo el tiempo. Por lo tanto, este método no es la solución óptima para la Mitigación del Error Ionosférico.
    - El **segundo método** supone el empleo de los receptores de doble frecuencia. Tales receptores miden las frecuencias L1 y L2 de la señal GPS. Es sabido que cuando una señal de radio viaja a través de la ionosfera, ésta reduce su velocidad en una relación inversamente proporcional a su frecuencia. Por lo tanto, si se comparan los tiempos de llegada de las dos señales, se puede estimar el retraso con precisión. Nótese que esto es posible únicamente con receptores GPS de doble frecuencia. La mayoría de receptores fabricados para la navegación son de una frecuencia.
  - c. **El Vapor de agua también afecta la señal GPS.** El vapor de agua contenido en la atmósfera también puede afectar las señales GPS. Este efecto, el cual puede resultar en una degradación de la posición, puede ser reducido utilizando modelos atmosféricos.
- **Errores en los relojes de los satélites y del receptor.**

Aunque los relojes en los satélites son muy precisos (cerca de 3 nanosegundos), algunas veces presentan una pequeña variación en la velocidad de marcha y producen pequeños errores, afectando la exactitud de la posición. El Departamento de Defensa de los Estados Unidos, observa permanentemente los relojes de los satélites mediante el segmento de control y puede corregir cualquier deriva que pueda encontrar.

- **Errores de Multitrayectoria.**

El error de multitrayectoria se presenta cuando el receptor está ubicado cerca de una gran superficie reflectora, tal como un lago o un edificio. La señal del satélite no viaja directamente a la antena, sino que llega primero al objeto cercano y luego es reflejada a la antena, provocando una medición falsa.

Este tipo de errores se pueden reducir utilizando antenas GPS especiales que incorporan un plano de tierra (un disco circular metálico de aproximadamente 50cm de diámetro), el cual evita que las señales con poca elevación lleguen a la antena. Para obtener la más alta exactitud, la solución preferida es la antena de bobina anular (choke ring antenna) como se puede observar en la figura 23. Una antena de bobina anular tiene 4 o cinco anillos concéntricos alrededor de la antena que atrapan cualquier señal indirecta.

El efecto multitrayectoria afecta únicamente a las mediciones topográficas de alta precisión. Los receptores de navegación manuales no utilizan estas técnicas.



Figura 23. Antena choke ring.

- **Dilución de la Precisión.**

La Dilución de la Precisión (DOP) es una medida de la fortaleza de la geometría de los satélites y está relacionada con la distancia y su posición en el cielo. El DOP puede incrementar el efecto del error en la medición de distancia a los satélites. Este principio se puede observar en las siguientes figuras 24 y 25:

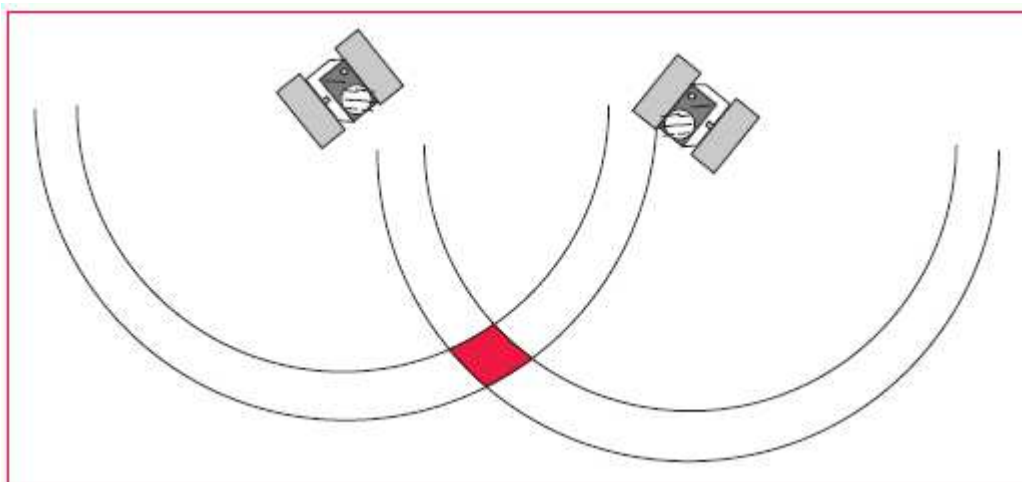
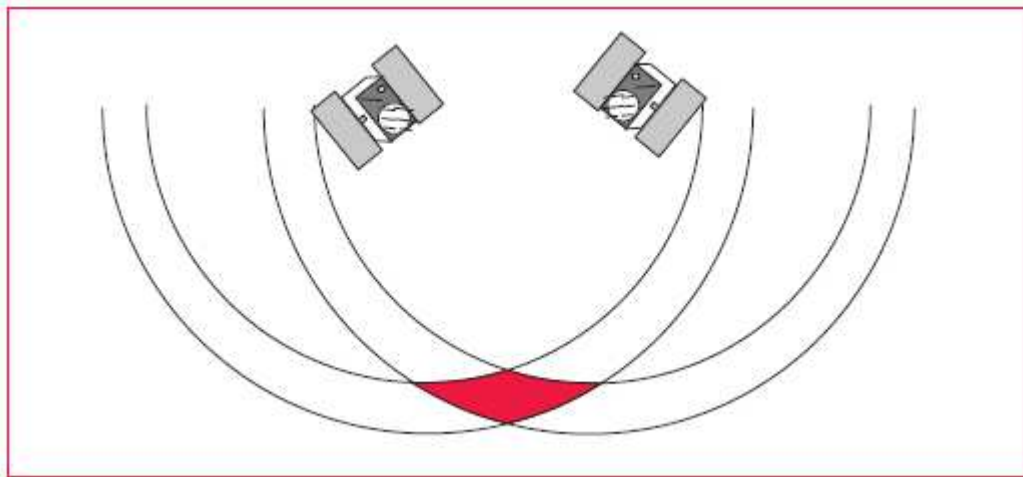


Figura 24. Satélites con buena distribución – poca incertidumbre en su posición



**Figura 25.** Satélites con mala distribución – alta incertidumbre en su posición.

La distancia hacia los satélites se ve afectada por los errores en la distancia previamente descritos. Cuando los satélites están bien distribuidos, la posición se puede determinar dentro del área sombreada del diagrama y el margen de error posible es mínimo. Cuando los satélites están muy cerca unos de otros, el área sombreada aumenta su tamaño, incrementando también la incertidumbre en la posición.

Dependiendo de la dimensión, se pueden calcular diferentes tipos de Dilución de la Precisión.

- **VDOP** – Dilución Vertical de la Precisión. Proporciona la degradación de la exactitud en la dirección vertical.
- **HDOP** – Dilución Horizontal de la Precisión. Proporciona la degradación de la exactitud en la dirección horizontal.
- **PDOP** – Dilución de la Precisión en Posición. Proporciona la degradación de la exactitud en posición 3D.
- **GDOP** – Dilución de la Precisión Geométrica. Proporciona la degradación de la exactitud en posición 3D y en tiempo.

El valor DOP más útil a conocer es el GDOP, ya que es una combinación de todos los factores. Sin embargo, algunos receptores calculan el PDOP o HDOP, valores que no toman en consideración la componente de tiempo. La mejor manera de minimizar el efecto del GDOP es observar tantos satélites como sean posibles. Sin embargo, las señales de satélites con poca elevación generalmente tienen una gran influencia de las fuentes de error.

- **Disponibilidad Selectiva (S/A)**

La Disponibilidad Selectiva es un proceso aplicado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos a la señal GPS. Y tiene la finalidad de denegar, tanto a usuarios civiles como a las potencias hostiles, el acceso a toda la precisión que brinda el GPS, sometiendo a los relojes del satélite a un proceso conocido como **dithering** (dispersión), el cual altera ligeramente el tiempo. Además, las efemérides (o la trayectoria que el satélite seguirá), son transmitidas ligeramente alteradas respecto a las verdaderas. El resultado final es una degradación en la precisión de la posición.

Vale la pena hacer notar que el S/A afecta a los usuarios civiles que utilizan un solo receptor GPS para obtener una posición autónoma. Los usuarios de sistemas diferenciales no se ven afectados de manera significativa por este efecto.

- **Anti-Spoofing (A-S)**

El efecto Anti-Spoofing es similar al efecto S/A, ya que ha sido concebido con la idea de no permitir que los usuarios civiles y las fuerzas hostiles tengan acceso al código P de la señal GPS, obligándolos a emplear el código C/A, al cual se aplica el efecto S/A. El efecto Anti-spoofing encripta el código P en una señal conocida como código Y. Sólo los usuarios con receptores GPS militares (EEUU y sus aliados) pueden descifrar el código Y.

- **¿Por qué son más precisos los receptores militares?**

Los receptores militares son más precisos porque no utilizan el código C/A para calcular el tiempo que tarda en llegar la señal desde el satélite al receptor GPS. Únicamente emplean el código P. El código P modula la portadora con una frecuencia de 10.23 MHz., mientras que el código C/A lo hace a 1.023 MHz. Las distancias se pueden calcular con mayor precisión empleando el código P, ya que este se transmite 10 veces más por segundo que el código C/A.

Sin embargo, como se describió en la sección anterior, muy a menudo el código P se ve afectado por el Anti-Spoofing (A/S). Esto significa que, únicamente las fuerzas militares (equipadas con receptores GPS especiales), pueden descifrar el código P encriptado, también conocido como código Y.

Por todas estas razones, los usuarios de receptores GPS militares generalmente obtendrán precisiones del orden de 5 metros, mientras que los usuarios de equipos GPS civiles equivalentes únicamente alcanzarán precisiones de 15 a 100 metros.

### **3.3.4.2. Posicionamiento Diferencial (DGPS)**

Muchos de los errores que afectan la medición de distancia a los satélites, pueden ser completamente eliminados o reducidos significativamente utilizando técnicas de medición diferenciales.

La técnica DGPS permite a los usuarios civiles incrementar la precisión de la posición de 100m a 2-3m o menos, haciéndolo más útil para muchas aplicaciones civiles.

En este caso, la antena del receptor de referencia es montada en un punto medido previamente con coordenadas conocidas. Al receptor que se coloca en este punto se le conoce como Receptor de Referencia o Estación Base. Debido a que el receptor se encuentra en un punto conocido, el receptor de la referencia puede estimar en forma muy precisa la distancia a cada uno de los satélites. De esta forma, este receptor puede calcular muy fácilmente cual es la diferencia entre la posición calculada y la posición medida. Estas diferencias son conocidas como correcciones. Generalmente, el receptor de la referencia está conectado a un radio enlace de datos, el cual se utiliza para transmitir las correcciones.

Y por otro lado el receptor móvil está al otro lado de estas correcciones. El receptor móvil cuenta con un radio enlace de datos conectado para recibir las correcciones transmitidas por el receptor de referencia. El receptor móvil también calcula las distancias y luego aplica las correcciones de distancia recibidas de la Referencia, esto le permite calcular una posición mucho más precisa de lo que sería posible si se utilizaran las distancias no corregidas.

Utilizando esta técnica, todas las fuentes de error descritas para la navegación autónoma son minimizadas, obteniendo una posición más precisa. Cabe mencionar que múltiples receptores móviles pueden recibir correcciones de una sola Referencia.

Hasta el momento se ha explicado la técnica DGPS en forma muy general. Sin embargo, en la práctica resulta un poco más compleja. Hay que tener en consideración el radio enlace. Existen muchos tipos de radio enlaces que pueden transmitir en diferentes rangos de frecuencias y distancias. El desempeño del radio enlace dependerá de varios factores, incluyendo:

- La frecuencia del radio.
- La potencia del radio.
- El tipo y la ganancia de la antena de radio.
- La posición de la antena.

Se han establecido redes de receptores GPS y poderosos transmisores de radio, para transmitir en una frecuencia de seguridad marítima solamente. Estos son conocidos como **radio faros (Beacon Transmitters)**. Los usuarios de este servicio solo necesitan adquirir un receptor móvil que pueda recibir la señal del Radio Faro.

Tales sistemas han sido instalados a lo largo de las costas de muchos países. Otros dispositivos, tales como teléfonos móviles, pueden ser utilizados para la transmisión de datos.

Además de los sistemas de Radio Faros, también existen otros sistemas que proveen cobertura sobre extensas áreas y que son operados por compañías comerciales privadas. Existen también propuestas para sistemas de propiedad del gobierno, tales como el sistema basado en satélites de la Autoridad Federal de Aviación (FAA) de los Estados Unidos, se trata del WAAS (Wide Area Augmentation System), el Sistema de la Agencia Espacial Europea (ESA) y el sistema propuesto por el gobierno japonés.

Existe un formato estándar para la transmisión de datos GPS. Se denomina el formato **RTCM (Radio Technical Commission Maritime Services)**, este formato se usa en forma común alrededor de todo el mundo.

### ***3.3.4.3. GPS Diferencial de Fase y resolución de ambigüedades.***

El GPS Diferencial de Fase es utilizado principalmente en la topografía y trabajos relacionados para alcanzar precisiones en posición del orden de 5-50mm. La técnica utilizada difiere de todas las descritas previamente e involucra un intenso análisis estadístico. Como técnica diferencial significa que un mínimo de dos receptores GPS

deben ser siempre utilizados en forma simultánea. El receptor de Referencia está siempre ubicado en un punto fijo o de coordenadas conocidas. El otro o los otros receptores están libres para moverse alrededor. Estos son conocidos como receptores móviles. Se calcula, entonces, las líneas base entre la Referencia y los móviles. La técnica básica es igual a las descritas previamente, es decir, la medición de distancias a cuatro satélites y la determinación de la posición a partir de esas distancias. La diferencia radica en la forma en que se calculan esas distancias.

En este punto, es importante definir los diversos componentes de la señal GPS.

- **Fase Portadora.** Es la onda sinusoidal de la señal de L1 o L2 creada por el satélite. La portadora L1 es generada a 1575.42 MHz, la portadora de L2 a 1227.6 MHz.
- **Código C/A.** Es el Código de Adquisición Gruesa. Modula la portadora L1 a 1.023 MHz..
- **Código P.** El código preciso. Modula a las portadoras L1 y L2 a 10.23 MHz.

Se utilizará la fase portadora porque esta puede proporcionar una medida hacia el satélite mucho más precisa que la que se consigue utilizando el código C/A o el código P. La onda portadora de L1 tiene una longitud de 19.4cm. Si se pudiera medir el número de longitudes de onda (completas y fraccionarias) que existen entre el satélite y el receptor, se obtendría una distancia muy precisa al satélite.

La gran parte del error en el que se incurre cuando se realiza una medición autónoma, es producido por las imperfecciones en los relojes del satélite y el receptor. Una manera de evitar este error es utilizar una técnica conocida como Diferencia Doble. Si dos receptores GPS realizan mediciones a dos satélites diferentes, las diferencias de tiempo entre los receptores y los satélites se cancelan, eliminando cualquier fuente de error que pudieran introducir a la ecuación.

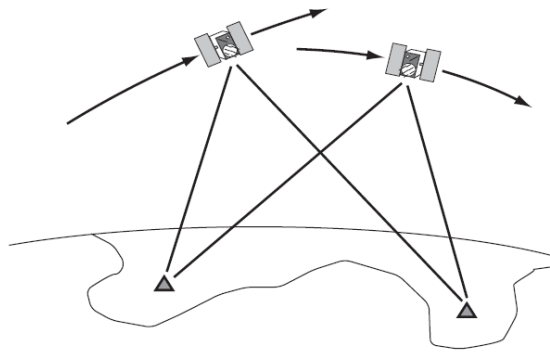


Figura 26. Diferencias dobles.





## 4. Sistemas de seguimiento y guiado de misiles.

Para que un misil consiga alcanzar su objetivo, y más aun si éste se encuentra en movimiento, el cohete deberá de contener un sistema que identifique al blanco. Este dispositivo será el sistema de seguimiento y guiado del misil, que generalmente se encuentra en la cabeza del mismo. Existen diferentes tipos de sistemas de seguimiento dependiendo de cómo interactúa el sistema con su entorno, se pueden clasificar los sistemas de seguimiento de guiado de misiles como:

- **Programables.** En este caso, se le programa una ruta a seguir antes de ser lanzado y no podrá modificar su rumbo.
- **Pasivos.** Solo poseen un detector que se limita a buscar un determinado tipo de radiación del espectro electromagnético que el objetivo emita. Con él busca las emisiones de gases calientes de los motores de los aviones dirigiéndolo hacia las mismas. Solo hay que indicarle hacia donde buscar y una vez disparado el piloto puede olvidarse de éste ya que el misil lo hará todo. Otras posibilidades de detección serían el radar y la luz. Estos misiles pertenecen al conjunto **Fire & Forget (Dispara y olvida).**

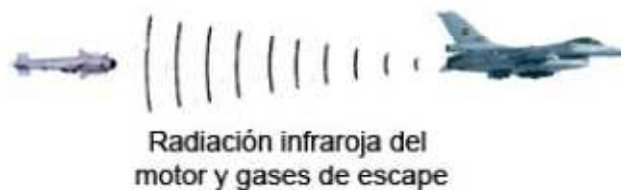


Figura 27. Señal de radiación infrarroja

- **Semi-activos.** Al igual que los anteriores sólo poseen un detector, pero éste busca en una zona del espectro en la que los objetivos no suelen emitir, como: radar y láser. Por ello necesitan alguna fuente emisora de esa radiación que **ilumine** (éste es el término técnico y correcto aunque no se refiera a luz visible) al objetivo, para que al reflejarse sobre el mismo, el detector pueda captarla y guiarse hasta él. Por lo general la fuente emisora suele ser la propia plataforma de lanzamiento, pero también suelen darse casos de ser otras las fuentes emisoras, como cuando un comando infiltrado ilumina con un láser un puente para guiar al misil hasta éste con mayor precisión que el avión. En el caso de los semi-activos el principal inconveniente que presentan es que el objetivo ha de estar constantemente iluminado, ya que de no ser así, el misil se perderá.
- **Activos.** En este caso los misiles también poseen un sensor que no busca la radiación que los objetivos suelen emitir, pero llevan incorporado en el conjunto una fuente emisora para iluminarlos. De esta forma, a pesar de utilizar el mismo sistema que los semi-activos, la plataforma de lanzamiento puede olvidarse de

ellos, por lo que éstos también pertenecen a la categoría **Fire & Forget**. En este grupo, la radiación utilizada está limitada al radar.

- **Teledirigidos.** En esta última variante, la plataforma de lanzamiento controla mediante un radar, u otro sistema, la posición constante del objetivo guiando además al misil hasta el blanco. En esta variante el misil carece de sensor. En caso de transmitir las órdenes mediante radio, el misil se conoce con el nombre de **radiodirigido**. Si la plataforma corta el seguimiento del objetivo, el misil se perderá.

A pesar de todo, hoy día muchos misiles incorporan la combinación de varios de estos métodos con el fin de aumentar las posibilidades de éxito.

#### 4.1. Sistema de control.

El misil puede ser dividido en 4 sistemas principales. Esquema general de un misil:

- Motor.
- Cabeza de guerra.
- Sistema de guía.
- Sistema de control.

Este último será en el que nos centraremos ahora. El sistema de guía es quien dicta hacia dónde debe dirigirse el misil, pero es el sistema de control el que interpreta y ejecuta esas órdenes. Se debe de tener en cuenta que al igual que en el caso de los aviones, es la sustentación lo que mantiene al misil en el aire, y por ello en su desplazamiento a través del mismo rigen las mismas normas y se aplican los mismos principios.

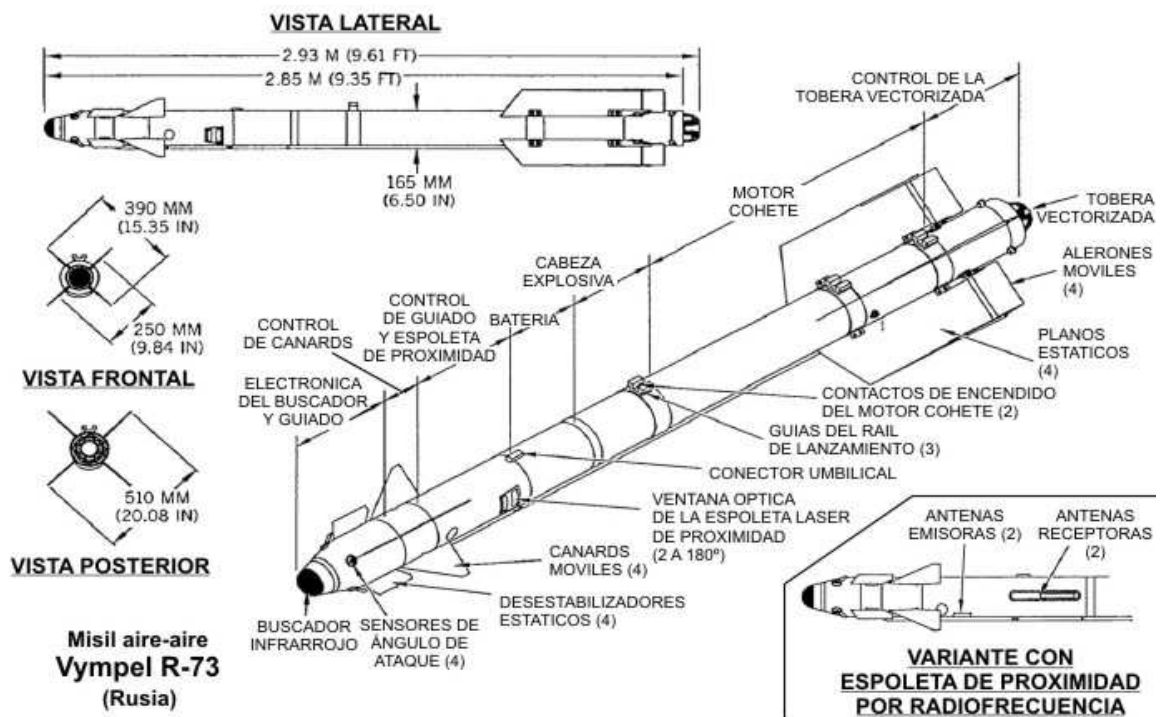


Figura 28. Esquema de misil aire-aire Vypel R-73

Recordemos que la principal virtud del misil es que puede variar su rumbo al margen de las trayectorias balísticas, y para ello se sirve de unas superficies de control como los aviones. Estas superficies son las aletas que podemos apreciar en su fuselaje y que son accionadas mediante servomecanismos conectados al sistema de control. Es éste el que decide qué inclinación darles con el fin de lograr el rumbo deseado.

Estos planos reciben diferente nombre según su ubicación en el cuerpo del misil:

- **Aletas de cola:** En este caso las superficies de control se colocan en la zona trasera. Esta es la opción más habitual ya que ofrece una gran maniobrabilidad cuando opera con fuertes ángulos de ataque. En cualquier caso, fijas o móviles, las aletas de cola se incluyen en todos los misiles.
- **Alas:** Aquí las superficies de control se encuentran en la zona media, y con ello se logran unos tiempos de respuesta bastante rápidos y una mayor estabilidad del misil, facilitando la tarea de la cabeza buscadora. No obstante, el efecto que producen es menor al de las aletas de cola y para lograr los mismos resultados han de ser considerablemente más grandes.
- **Planos canard:** Ocupan la posición delantera, cerca de la cabeza buscadora. Los planos canard, gracias a su ubicación permiten al misil omitir las alas ya que ofrecen la elevación necesaria sin tener que recurrir a la sustentación adicional de éstas. Su principal ventaja radica en lograr una buena respuesta en ángulos de ataque poco pronunciados, por otro lado, el estar adelantados al centro de gravedad provoca una falta de estabilidad que requiere de grandes aletas de cola fijas para poder equilibrar.

Otra posibilidad de control del misil muy efectiva y poco común es la de flujo vectorial. En ella el control de la dirección se produce gracias a la emisión de los gases en un determinado ángulo. Esto se puede conseguir de diferentes métodos:

- Inyectando gases calientes o combustible desde una determinada zona dentro de la tobera.
- Colocando unas superficies deflectoras en la salida que desvíen el flujo.
- Mecanizando al tobera y haciéndola completamente vectorial.

Esto dota a los misiles de una enorme capacidad de maniobra. Pero nunca se delega totalmente el control del mismo en este sistema, ya que los misiles no mantienen el motor encendido en todo momento. Tras unos segundos en los que son acelerados a su máxima velocidad, el misil continúa gracias a su energía mecánica (principalmente cinética) con el motor apagado por haber consumido todo su combustible, y sin los gases de éste, el sistema es inútil. En cualquier caso, lo más habitual es encontrar una combinación de varios tipos.

## 4.2. Contramedidas

Conviene señalar que junto a la línea de investigación de los misiles, existe otra paralela dedicada a restarles efectividad a éstos. Los medios con los que se intenta neutralizar a un misil se conocen como **contramedidas**, y su variedad es tan amplia como la de los misiles. Las hay de todo tipo, desde las más agresivas que consisten en la

destrucción del misil a las más discretas, que simplemente intentan evitar que se dirijan al blanco. Las primeras son comunes para todo tipo de misil, y a la hora de destruirlos, poco importa cuál sea su guía. En cambio, las que solo buscan evadirlos, intentan engañar o entorpecer a su sistema de guiado con el fin de hacerles errar.

### **4.3. Sistemas de guía**

La diferencia entre el misil y su antecesor el cohete la marca el hecho de que los primeros son guiados. Tras quedar patente la versatilidad y eficacia de los misiles, los ejércitos se dedicaron a diseñar multitud de sistemas de guiado con el fin de mejorarlas.

Por su sencillez, el primer sistema fue el de filoguiado, pero en paralelo también se desarrolló el radiodirigido, de lo que se deduce que los primeros misiles fueron todos teledirigidos. Por otra parte, los alemanes también realizaron algunas pruebas con sistemas más avanzados pero sin demasiado éxito.

Y la aparición del transistor a finales de 1.947 se realizaron grandes avances gracias a la revolución que supuso este componente en el campo de la electrónica sustituyendo a las tediosas válvulas de vacío y permitiendo sistemas más complejos. Esto permitió el uso de sensores más o menos simples que dieron lugar a los primeros misiles pasivos y semiactivos, pero también dio pie a desarrollar y perfeccionar los misiles teledirigidos y programables que hoy día se siguen utilizando por ser los más sencillos.

#### **4.3.1. Programables**

El principal sistema de guía en los misiles programables es la inercial. En ella, al misil se le programa previamente una ruta con el fin de que la siga en su viaje. Esto se consigue mediante giroscopios, los cuales sirven para detectar con suma precisión cambios de posición y rumbo. De este modo, basándose en la información de los giroscopios y la que le fue programada, el misil conoce en todo momento su posición y a donde debe dirigirse. Este sistema es útil para objetivos estáticos y cuya ubicación se conozca con exactitud. Por ello suele usarse contra grandes superficies donde la precisión no es necesaria.

Otra posibilidad muy usual hoy día es la combinación de este método con otro sistema de guía cuando la distancia al objetivo impide el correcto funcionamiento del sistema normal. Al misil se le programa la posible ubicación del objetivo, y una vez cerca de éste, el control del arma pasa al otro sistema de guía que le otorgará una mayor precisión.

#### **4.3.2. Pasivos**

En estos misiles serán totalmente automáticos. Aquí el misil se limita a recibir algún tipo de radiación que el objetivo emita para poder guiarse hasta el mismo. Para ello

dispone de diferentes tipos de detectores sensibles a una determinada longitud de onda del espectro electromagnético.

El tipo de radiación más común es la **infrarroja**, debido a que la emiten todos los cuerpos cuya temperatura sea superior a los  $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Cuanto mayor sea la temperatura, mayor será la radiación emitida. Por lo general la mayoría de objetivos militares (Vehículos terrestres, aviones, helicópteros y barcos) son metálicos y poseen un motor térmico. Estas dos características les dota de mayor emisión IR que el entorno que les rodea haciendo que resalten en los sensores. En el misil, la radiación entra a través de unas lentes especialmente acondicionadas para trabajar en esa longitud de onda y que la focalizarán optimizando el rendimiento del sensor.

Existen tres tipos de buscadores IR cuyo funcionamiento es aplicable a los que funcionan con longitud de onda ultravioleta y que en este caso, en vez de buscar esa longitud de onda, buscan la ausencia de la misma, es decir, la sombra que en ella provoca el objeto.

- El primer tipo es el más básico y se conoce como **Spin-scan (Escaneo por giro)**. En esta variante, la radiación ya focalizada va a parar a un disco perforado que gira a una determinada velocidad. El misil, conociendo la forma en la que la radiación llega al disco, la posición de las perforaciones, y cuando incide ésta en el sensor, estimará la ubicación del objetivo, enviando las pertinentes ordenes al sistema de control.
- Una variación de este sistema sustituye el disco por un sistema de espejos y es conocido como **Conical-scan (Escaneo cónico)**. Una vez focalizada la radiación, es enviada a un espejo oblicuo giratorio. En una sola vuelta, a medida que gira, el espejo irá enfocándola dentro de la carcasa del misil, hasta que en cierto punto de la vuelta, ésta incida en el sensor. En ese momento se produce un pulso enviado al sistema de control. El espejo continuará girando y la radiación volverá a enfocarse en cualquier otro lugar hasta que de nuevo vuelva a incidir en el sensor. En esta ocasión la posición del espejo cuando se produce el impulso habrá variado con respecto a la anterior en caso de que el objetivo se mueva. Ese cambio es procesado por el sistema de control y basándose en el cambio de posición, podrá estimar en tiempo real tanto la posición del objetivo como su rumbo más inmediato. Obviamente, el espejo gira a bastante velocidad con el fin de precisar todo lo posible la posición.

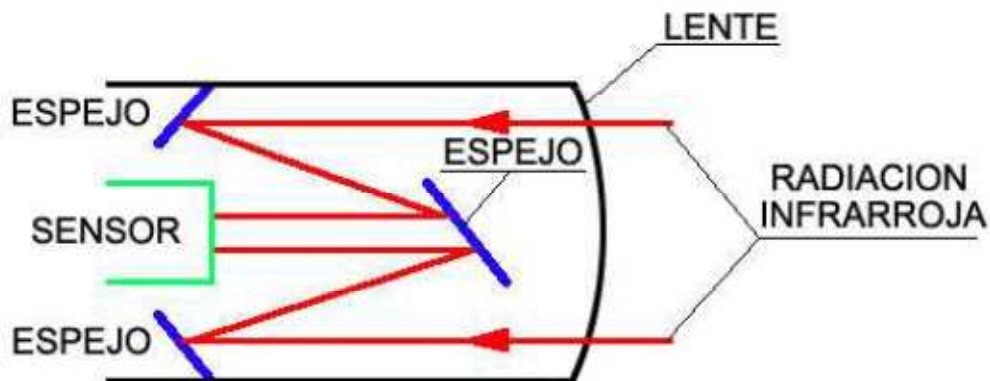


Figura 29. Sistema conical-scan

- El último sistema es el más avanzado y eficaz. En el **Image Seeker (Buscador por imagen)**, también conocido como I2R, el sensor es el que hace todo el trabajo. Este consiste en varios sensores pequeños. Tras ser focalizada, la radiación incide en diferentes puntos de la superficie de la placa de sensores, activando sobre los que incida y quedando inertes los que no reciban energía alguna. De esta manera, se forma un mapa de puntos, y a medida que el objetivo se mueva, éstos también lo harán. En base a como se muevan (unos envíen pulsos y otros dejen de enviarlos) el sistema de control podrá estimar posición y dirección del objetivo. Otra ventaja de este sistema es que con un software avanzado, se pueden detectar otros parámetros como la forma del objetivo y con ello identificar sus puntos débiles previamente programados. Finalmente, señalar que en los misiles de última generación, al ser muy simple el Image Seeker mecánicamente hablando, se opta por hacerlo móvil con el fin de aumentar el ángulo de detección del misil y así evitar que todo el conjunto tenga que moverse para poder detectar las emisiones.

Vistos los buscadores IR, el resto de guías de misiles pasivos se explica más fácilmente. En los misiles denominados **Anti-radiación**, el buscador lo conforman unas antenas sensibles a una determinada longitud de onda dentro del espectro del radar. El misil es lanzado contra una fuente de radar, y el sistema de control, basándose en cuál de las antenas recibe energía de forma más intensa (son varias, y cada una solo recibirá en un determinado ángulo), estimará la posición. Cuando todas las antenas reciban ondas de radar con igual intensidad, significará que el misil va directo hacia su objetivo.

La última posibilidad de guía en misiles pasivos es la de **televisión**. En este caso, esta es idéntica al buscador IR **Image Seeker**, solo que en este caso, los sensores serán sensibles a la luz visible. Básicamente es una cámara de TV.

En el campo de las contramedidas aplicables a este tipo de misiles encontramos gran variedad. Conviene distinguir entre contramedidas activas y pasivas. Las primeras actúan directamente contra el misil, mientras que las segundas intentan desviarlo por otros medios.

En el caso de misiles con guías IR o TV, sus detectores suelen ser muy sensibles con el fin de captar el máximo de radiación, por lo cual una un incremento significativo de señal podría neutralizarlos. Para este fin sin duda lo idóneo es el **láser**, ya que es sumamente preciso y eficaz contra este tipo de sensores. Un pulso de láser que incida directamente contra la cabeza buscadora la cegará permanentemente o al menos el tiempo suficiente para que el misil pierda irremediamente su objetivo.

Otras posibilidades que ya entrarían en el campo de las pasivas es la de ofrecer falsos blancos que emitan en la longitud de onda que el misil busca. El ejemplo más habitual son las bengalas. Éstas están especialmente diseñadas para emitir una fuerte radiación IR. Son lanzadas a una distancia prudencial del objetivo de forma que al misil se le presentarán de golpe un gran número de nuevos blancos posibles. Si casualmente una de ellas logra engañarlo éste la perseguirá olvidando al blanco. Obviamente el blanco realizará maniobras evasivas a medida que las suelta con el fin de facilitar esta posibilidad.

Una variante de las bengalas y que suele usarse en blancos pequeños y poco ágiles como los carros de combate, frente a misiles IR es la de crear una nube a su alrededor de aerosol caliente que difumine la radiación infrarroja del mismo.

Por su parte, los misiles también incorporan contra-contra medidas con el fin de hacerlos inmunes a éstas. Frente a las pasivas, suelen usarse discriminadores con el fin de diferenciar entre objetivo real y contra medidas. Por ejemplo, algunos incorporan detectores capaces de identificar los compuestos químicos de las bengalas, otros detectan su aceleración ya que una vez lanzadas, las bengalas reducen su velocidad al carecer de propulsión propia.

Por su parte, los objetivos de los misiles anti-radiación, la defensa más eficaz que pueden poner en práctica es apagar su radar y si son móviles, alterar a su vez la posición. Con respecto a la defensa ante misiles de guía TV, lo mejor es crear una cortina de humo.

Comentado esto me gustaría puntualizar un hecho en el que mucha gente suele estar mal informada. Una vez que un misil pierde a su blanco, ya sea por acción de las contra medidas o cualquier otra cosa, éste ya no vuelve a engancharlo a no ser que el blanco vuelva a pasar por su campo de detección, cosa que por supuesto este último evitará. Es decir, el misil siempre se aproxima a su blanco a una velocidad muy superior, a no ser que ya esté próximo al máximo de su rango. Si éste se desvía o le pasa de largo, no da media vuelta para buscarle. Simplemente intentará buscar uno nuevo en su trayectoria. Esta característica sí la poseen los torpedos, que tras ejecutar la ruta programada, si no encuentran nada o si su blanco les evade, estarán dando vueltas sobre la zona hasta agotar su energía. No obstante, sí existe un misil capaz de girar en busca de su blanco si ha herrado la primera pasada, pero no deja de ser la única excepción. Es el israelí Pitón 4 que en caso de fallar y conservar suficiente energía, intentará un segundo acercamiento.

#### 4.3.3. Semi-activos

El uso de misiles semi-activos ofrece una alternativa para seguir al objetivo usando otro tipo de radiación que no emitiese. Aunque el método pasivo puede parecer el idóneo presenta algunas carencias. Las longitudes de onda en las que emiten los blancos (Luz visible e infrarrojo) no son muy energéticas lo que provoca que éstas viajen poco recorrido con suficiente intensidad como para ser detectadas y además, los ingenieros suelen incluir en sus diseños supresores IR con el fin de reducir al mínimo la radiación infrarroja.

En cambio, las plataformas lanzadoras podían equipar potentes equipos de radar con los que iluminar al objetivo y que éste reflejase esas ondas llegando de nuevo al misil con suficiente intensidad. No obstante una cabeza buscadora de radar pasivo es más cara que una IR, por eso, el sistema de guía radar/semiactivo ha sido relegado a misiles de mayor rango, ya que aún siendo un coste mayor, siempre prevalecerá el hecho de poder atacar a alguien a la máxima distancia posible, básicamente para poder hacerlo antes de que tu oponente lo haga contigo.

Por parte de las contra medidas activas, tenemos las **ECM (Electronic Counter Measures, contra medidas electrónicas)**. Están formadas por antenas que emiten en las mismas longitudes de onda que el radar de la plataforma del misil pero con pequeñas variaciones. Por ejemplo, emitirán más intensamente con el fin de que el misil se guíe por ellas, pero variando la frecuencia de los pulsos, así el misil pensará que está más lejos o más cerca calculando mal la posición del objetivo y fallando. Otra opción es la de

saturación que consiste en emitir a máxima potencia inutilizando el receptor y cegándolo. Al igual que los IR, los misiles más modernos incorporan resistencia frente a las ECM.

Respecto a las contramedidas pasivas, tenemos el **chaff y las cintas metálicas**. El primero consiste en unas minúsculas fibras de plástico recubiertas de aluminio, material reflectante al radar. Estas se compactan en unos pequeños paquetes que son lanzados por el avión y que se expanden formando una gran nube. Desde el punto de vista del misil, éste detecta la aparición de nuevos objetivos, ya que a pesar de ser un conjunto de fibras, su separación es inferior a la amplitud del radar y lo detecta como un objeto sólido. Las cintas metálicas funcionan igual salvo que en este caso son unas largas cintas de aluminio.

Otra opción de misiles semiactivos son los guiados por láser. La plataforma equipa un láser que enfoca sobre el objetivo, mientras que el misil incorpora una cabeza buscadora sensible al mismo. Es muy utilizado en armas anti-tanque y en general para ataques que requieran mucha precisión. La contramedida más efectiva contra este tipo de arma es la de ocultarse tras el humo y hacer maniobras evasivas.

#### 4.3.4. Activos

Finalmente en el campo de los activos solo tenemos un tipo de guía que es el radar. Aquí el misil dispone tanto del emisor como del receptor. Este conjunto, a pesar de constituir un radar muy simple, es suficiente para iluminar y así poder seguir su objetivo, e incluso buscarlos por sí mismo.

Sin embargo no hay que olvidar que este radar va a ser de un solo uso y por lo tanto se procura hacerlo lo más económico posible. Esto implica que su alcance sea reducido, por lo que en misiles convencionales (generalmente Aire-Aire), la mayoría del trayecto se haga mediante guía inercial o en modo semi-activo, para una vez llegado a una distancia cercana al objetivo, ya se active su radar. Este tipo de guía fue creada porque aún siendo un sistema notablemente más caro que cualquier otro, permite a la plataforma de lanzamiento buscar nuevos objetivos en lugar de mantener iluminado al actual.

Otra ventaja es la de permitir alcances muy superiores, por ejemplo a la hora de lanzar un misil a ciegas sin conocer la posición del objetivo y encontrarse a éste tras el horizonte. Se le programa en el sistema inercial la ruta hacia la ubicación aproximada y una vez allí enciende su sistema que ya engancha al objetivo. Esta táctica suele usarse en guerra naval, al darse en grandes rangos y estar los objetivos a ras de suelo. En cuanto a las contramedidas para enfrentarse a este tipo de misiles, comentar que son las mismas que para los misiles semi-activos guiados por radar.

#### 4.3.5. Teledirigidos

Una de las formas de guiar un misil es manualmente y obviamente ha de hacerse a distancia. El método más sencillo es el filoguiado ya que requiere pocos circuitos y es barato. Mediante un panel de mandos sencillo en el que existe un dispositivo de control de 2 ejes, generalmente una palanca, se controla el lanzamiento del misil y su dirección. Éste



está conectado mediante hilos conductores a la plataforma de lanzamiento y a los controles y a su vez, los hilos están enrollados en unos contenedores que facilitan su rápida liberación. Estos contenedores, que por lo general estarán alojados en el misil y contendrán hilo suficiente como para cubrir el alcance máximo del mismo. Una vez que el misil abandona la plataforma el operador lo controla para que se dirija al blanco, y al poder realizar correcciones a lo largo de todo el recorrido, da igual que el objetivo se encuentre en movimiento. Con el fin de facilitar su guía, al no ser fácilmente visible un misil a distancias de un kilómetro o más, suele incorporársele en la zona trasera una bengala que identifique de forma clara su posición constante.

Hay ocasiones en las que no se puede recurrir al filoguiado por lo que el cableado se sustituye por ondas de radio. Basta con colocar en la plataforma un emisor y en el misil un receptor. Esto da lugar a los misiles radiodirigidos.

Por otra parte, además de estas opciones para los misiles teledirigidos, existen otras en la que se automatiza totalmente el control del misil. En este caso, el principal sensor que eran los ojos del operador ha sido sustituido por otro sistema electrónico. El más habitual es el radar por su eficacia y precisión. En esta variante un radar detecta y mide en tiempo real los parámetros del objetivo como son su velocidad posición y dirección. Dichos datos son transmitidos al procesador central de la plataforma de lanzamiento que a su vez envía a través de radio las órdenes para ajustar el rumbo del misil hacia el objetivo. Este conjunto radar-radiodirigido suele dar buenos resultados y ostenta una gran precisión.

#### 4.3.6. Otros sistemas de guía

Por su singularidad veremos aparte el sistema de **beam rider** que viene a significar guiado a través de rayo. Este es uno de los sistemas más primigenios pero a la vez complicados, comparado por ejemplo con el sistema pasivo. En este caso, la plataforma equipaba un radar de seguimiento para obtener parámetros precisos sobre el objetivo y su trayectoria. Estos datos son procesados y enviados a una estación que enviaba un rayo en una longitud de onda determinada (radar, radio) con la trayectoria que debía seguir el misil.

Por su parte, este último incorporaba unos sensores que detectaban el rayo. Una vez lanzado, se metía en la trayectoria del rayo que tenía diferentes secciones longitudinales que el misil podía interpretar para saber si se estaba desviando y por qué lado.

Lo habitual es que haya varios sistemas de guía combinados en un misil. En los de corto alcance, lo normal es uno, pero ya en medio y sobre todo en largo, se usan diferentes sistemas para cada etapa del viaje. En misiles de rango medio y largo, por lo general se monta un sistema principal que será el que defina el tipo de misil y que actuará en su etapa final. En caso de ser un misil semi-activo, estos sistemas adicionales se omiten, pero en pasivos y activos suele incluirse el binomio inercial más el radiodirigido. Estos lo guiaran hasta que se encuentre lo suficientemente cerca como para enganchar al blanco con sus propios sensores. Se implantan estos dos ya que el inercial, a pesar de ser menos efectivo permite a la plataforma olvidarse del misil. En caso de no existir problema para efectuar un seguimiento con el radar durante la primera etapa, se usará el sistema radiodirigido que es mucho más eficiente.



## 5. TRANSFERENCIA DEL SECTOR MILITAR AL CIVIL

En este capítulo se tratará de describir como los avances y descubrimientos que tuvieron lugar bajo el mando del sector militar llegaron, pasado un tiempo, al sector civil y como estos descubrimientos han ayudado al desarrollo de la sociedad. A continuación se describirán algunas de las aplicaciones que mayor impacto han tenido en la sociedad civil y que tienen su origen en el ámbito militar.

### 5.1. Horno de microondas.

Sin lugar a dudas, uno de los mayores avances tecnológicos en el sector civil y más concretamente en el ámbito familiar, fue el horno de microondas. El cual es un claro ejemplo de la transferencia de tecnología del sector militar al civil, ya que el elemento principal del horno de microondas es el magnetrón, que como ya se comentó en este trabajo fue determinante para el sistema de radar en la II Guerra Mundial.

En 1946, el doctor Percy Spencer, ingeniero de la Raytheon Corporation, notó algo muy peculiar. Se encontraba investigando con el magnetrón cuando descubrió que un dulce que tenía en su bolsa se había derretido. Intrigado y pensando que quizá la barra de chocolate había sido afectada casualmente por esas ondas, el doctor Spencer hizo un experimento. Esta vez colocó algunas semillas de maíz para hacer palomitas, cerca del magnetrón y, permaneciendo algo alejado, vio cómo el maíz se movía, se cocía e hinchaba y brincaba esparciéndose por todo el laboratorio.

El doctor Spencer diseñó una caja metálica con una abertura en la que introdujo energía de microondas. Esta energía, dentro de la caja, no podía escapar y por lo tanto creaba un campo electromagnético de mayor densidad. Cuando se le colocaba alimento se producía energía de microondas y la temperatura del alimento aumentaba rápidamente. El doctor Spencer había inventado lo que iba a revolucionar la forma de cocinar y sentaba las bases de una industria multimillonaria: **el horno de microondas**.

### 5.2. GPS civil

El sistema de posicionamiento global o GPS fue desarrollado inicialmente por el departamento de defensa de EEUU para poder tener el control a nivel global mediante el despliegue de satélites de sus sistemas de defensa y de ataque en inminente guerra con la URSS.

Pero, posteriormente y para beneficio del sector civil, se delimitaron dos niveles en el segmento de usuario, un nivel para el sector militar muy preciso **Precise Positioning Service (PPS)**, y otro menos preciso con menor utilización de recursos para el sector civil, el **Standard Positioning Service (SPS)**.

Y que como ya se comentó en el capítulo referente al GPS, la diferencia radica en ambos niveles es la precisión. Debido a la disponibilidad selectiva (S/A) que tiene la finalidad de denegar, tanto a usuarios civiles como a las potencias hostiles, el acceso a toda la precisión que puede alcanzar el sistema GPS. Y se consigue sometiendo a los relojes del satélite a un proceso de dispersión que altera ligeramente el tiempo y transmisión distorsionada de las efemerides por lo tanto la precisión en el cálculo de la posición final. Además y aunque el sector utiliza el código P y no el S/A, éste también es dispersado, pero con el equipo adecuado esta dispersión del tiempo es corregido.

Gracias a esta separación entre el sector militar y el civil, se ha conseguido que el ciudadano de a pie, tenga acceso a una tecnología capaz de poder alcanzar un destino por ejemplo con su coche, sin necesidad de conocer el camino, o poder encontrar a personas desaparecidas en mitad de una montaña donde sin duda, de no ser por el GPS podrían morir.

### **5.3. Sistemas de guiado.**

La gran investigación en el ámbito del control sobre los sistemas de guiado y seguimiento de misiles, descrito en este trabajo ha llevado a la aplicación de esta tecnología al sector civil por ejemplo en los nuevos sistemas de control de aparcamiento de los automóviles o frenada automática que no habrían llegado de no ser por la amplia investigación en sensores de todo tipo (térmicos, laser, de movimiento, radares,...) y en los sistemas de control que son capaces de determinar la información útil ofrecida por los sensores y ejecutar en función de estos las labores programadas por el sistema de control. Por ello y aunque esta transferencia de tecnología no ha sido tan directa sin duda gracias a la gran investigación en este campo ha tenido un gran impacto en el sector civil.

## 6. CONCLUSIONES

A lo largo de este trabajo se han ido describiendo los descubrimientos en el campo de la comunicaciones durante los últimos dos siglos y cómo han evolucionado dichos descubrimientos que van desde el diseño de la primera batería en 1800 por Alejandro Volta hasta la tecnología actual que tenemos hoy en día como son el horno microondas, el GPS o el conocimiento del espacio entre otros.

En esta carrera de descubrimientos también se ha podido comprobar cómo la tecnología está muy ligada al sector militar o viceversa y que desgraciadamente para la sociedad el acontecimiento de la II guerra mundial supuso una época negra en nuestra historia pero en la que la tecnología de la comunicaciones jugó un papel de gran importancia con los descubrimientos del RADAR, el magnetrón, y la investigación en el campo de las microondas donde a partir de esta época se podía ver más allá de lo que nuestros ojos son capaces de observar, como por ejemplo las ondas infrarrojas emitidas por cualquier elemento que se encuentre a una temperatura superior al cero absoluto, la aplicación de esta tecnología tubo gran impacto en el sector balístico.

Posteriormente, una vez finalizada la guerra y desligados en gran medida de la necesidad militar se pudieron transformar las tecnologías empleadas en la guerra en tecnologías que facilitan la vida a la sociedad.

Entre estas tecnologías podríamos colocar en primera posición en un ranking de importancia al RADAR y que va ligado al magnetrón, ya que gracias a él tenemos un control muy elevado sobre objetos como aviones, barcos, meteoritos, galaxias,... que se pueden detectar aun sin una visión directa gracias al conocimiento de las microondas; junto con él y con unos servicios similares podríamos situar al GPS en segundo lugar, no hay ninguna duda que la sociedad no sería la misma sin estos descubrimientos.

Como conclusión personal me produce una enorme tristeza que los grandes avances tecnológicos que se han producido ya no solo en este último siglo sino a lo largo de la historia de la humanidad y que tanto ayudan a construir y mejorar a la sociedad actual tengan un pasado tan negro como es la guerra, pero la vida sigue y sin olvidar nunca su pasado, en el futuro, el campo de las telecomunicaciones y concretamente el campo de las microondas tiene aun mucho que descubrir.



## 7. Referencias

- Balanis, Constantine A., "Antenna theory analysis and design", New York [etc.] John Wiley and Sons 1997
- Cardama Aznar, Ángel., "Antenas", Barcelona UPC 2001.
- Hernando Rábanos, José M., "Transmisión por radio", Madrid Centro de Estudios Ramón Areces 1998
  
- Collin, Robert E., "Antennas and radiowave propagation", New York McGraw-Hill cop. 1985.
- Arrufat Molina, Enrique : Introducción al estudio del Sistema de Posicionamiento Global (GPS). Universidad Politécnica de Valencia, SPUPV-95.010.
- Leick, Alfred : Satellite Surveying. John Wiley&Sons, inc.

### WWW:

- <http://www.resumendehistoria.com/2011/02/la-segunda-guerra-mundial-resumen.html>
- <http://www.uv.es/~hertz/hertz/Docencia/teoria/Historia.pdf>
- <http://www.radartutorial.eu>
- [http://es.scribd.com/consuelo\\_bastidas\\_3/d/94975046-Magnet-Ron](http://es.scribd.com/consuelo_bastidas_3/d/94975046-Magnet-Ron)
- <http://html.rincondelvago.com/sistema-gps.html>
- <http://eia.unex.es/EIIAA>
- [http://es.wikipedia.org/wiki/Sistema\\_de\\_posicionamiento\\_global](http://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_posicionamiento_global)
- <http://www.asifunciona.com/electronica>
- <http://www.com.uvigo.es>