

# Introducción al RADAR (Abril 2011)

Iván López Espejo

Documento que explica las bases de funcionamiento del sistema RADAR.

## I. INTRODUCCIÓN

EL RADAR es un sistema electromagnético para la detección y localización de objetos. Opera a partir de la transmisión de un tipo de onda particular, por ejemplo, un seno modulado pulsado, detectando la naturaleza del eco de la señal. Esta tecnología se usa para extender la capacidad del ser humano de percibir estímulos del ambiente a través de alguno de sus sentidos, especialmente el de la visión. El RADAR, sin embargo, no es ningún sustituto del ojo humano en el sentido de que no percibe la imagen de los objetos con tanta precisión, no detecta el “color”, etc. No obstante, esta tecnología se diseña para la percepción de objetos en condiciones en las que el ojo humano no es capaz de hacerlo; por ejemplo, en situaciones de oscuridad, de densa vegetación, de niebla, de lluvia, de nieve, etc. Y, sobre todo, la peculiaridad más importante de esta clase de dispositivos es que pueden medir la distancia o rango hasta el objeto en cuestión.

Una forma elemental de RADAR consiste en una antena transmisora que emite radiación electromagnética generada por algún tipo de oscilador, una antena receptora y un dispositivo detector de energía o receptor. Una porción de la señal transmitida es interceptada por un objeto reflectante y rerradiada por este en todas direcciones. La energía que se rerradia en la dirección de vuelta al RADAR es la de nuestro interés. La antena receptora recibe la energía devuelta y la envía al receptor, donde se procesa para detectar la presencia del objeto, extrayéndose su localización y velocidad relativas. La distancia al objeto se determina mediante la medición del tiempo empleado por el pulso desde que este es emitido hasta que se recibe de vuelta reflejado por el objeto. La dirección o posición angular del objeto se determina a partir de la dirección de llegada del frente de ondas reflejado. El método usual para la medida de la dirección de llegada es con una antena de haces estrechos. Si existe un movimiento relativo entre el objeto y el RADAR, la modulación en frecuencia de la portadora de la onda reflejada (causada por el efecto Doppler) es una medida de la velocidad relativa del objeto, pudiendo ser utilizado este efecto para la distinción entre objetos en movimiento y estáticos.

El nombre de RADAR es una contracción de *Radio Detection And Ranging*. En un primer momento fue desarrollado como un dispositivo de detección para advertir de la aproximación de aeronaves enemigas así como para saber en qué dirección lanzar las armas antiaéreas.

La forma de onda más común en el RADAR es un tren de pulsos rectangulares estrechos que modulan una portadora senoidal. La distancia o rango al objeto se determina, como hemos introducido, a partir de la medida del tiempo  $T_R$  que emplea el pulso en viajar al objeto y volver. Puesto que la

energía electromagnética se propaga a la velocidad de la luz,  $c = 3 \times 10^8 m/s$  en el vacío, el rango,  $R$ , es

$$R = \frac{cT_R}{2}.$$

El factor 2 aparece en el denominador a causa de que el pulso electromagnético realiza un recorrido de ida y vuelta al objeto. Así, en el vacío, cada milisegundo de ida y vuelta del pulso energético equivale a una distancia desde el RADAR al objeto de 150 metros.

Una vez que el pulso transmitido es emitido por el RADAR, debemos de dejar pasar un intervalo de tiempo suficiente para permitir que cualquier eco de la señal vuelva y sea detectado antes de que el siguiente pulso sea transmitido. De esta forma, el período al cual los pulsos deben ser enviados se determina a partir del máximo rango en el cual se espera detectar objetos.

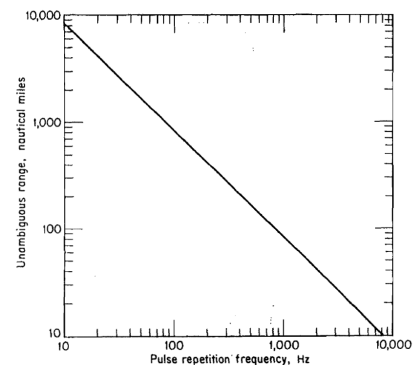


Fig. 1. Representación del máximo rango sin ambigüedad en función de la frecuencia del pulso de repetición.

Si la frecuencia del pulso de repetición es demasiado alta, los ecos de las señales desde alguno de los objetos pueden llegar después de la transmisión del siguiente pulso, resultando en ambigüedades en la medida del rango. Los ecos que llegan después de la transmisión del siguiente pulso se conocen con el nombre de ecos *de segunda vez*. Debido a que no podemos conocer con certeza si el eco es *de segunda vez*, determinaríamos, en caso de que así fuese, un rango mucho menor del real sobre el objeto en cuestión. El rango límite más allá del cual los objetos aparecen como ecos *de segunda vez* se denomina *máximo rango sin ambigüedad*, y es de la forma

$$R_{unamb} = \frac{c}{2f_p},$$

donde  $f_p$  es la frecuencia del pulso de repetición en Hz.

Aunque el RADAR típico transmite una onda modulada por un pulso, existen otras modulaciones que también pueden ser usadas. Por ejemplo, la portadora pulsada debe modularse en frecuencia o fase para permitir la compresión temporal de los ecos después de la recepción. También, existe la técnica conocida con el nombre de *compresión de pulso*, la cual consiste en la utilización de un pulso modulado largo en términos de tiempo que mantiene la misma resolución del pulso corto pero con la energía del pulso largo.

## II. FORMA SIMPLE DE LA ECUACIÓN DEL RADAR

La ecuación del RADAR relaciona el rango del RADAR con las características del transmisor, el receptor, la antena, el objeto y el ambiente. Esta ecuación es una importante herramienta para comprender la operación del RADAR y la teoría básica para su diseño.

Si denotamos  $P_t$  a la potencia transmitida por el RADAR, haciendo uso de una antena isotrópica (radiante de un modo uniforme en cualquier dirección), la densidad de potencia radiada (en wattios por unidad de superficie) a una distancia  $R$  del RADAR es igual a la potencia transmitida escalada respecto de una superficie esférica imaginaria de radio  $R$ :

$$\wp = \frac{P_t}{4\pi R^2}.$$

Los RADARs emplean antenas directivas hacia el canal, confluyendo la potencia emitida  $P_t$  en una dirección dada. La ganancia de la antena,  $G$ , es una medida del incremento de la densidad de potencia radiada a la distancia del objeto respecto de la producida en ese mismo punto por una antena isotrópica que transmite la misma potencia. En consecuencia, la densidad de potencia de radiación generada por una antena directiva de RADAR a la distancia del objeto con una ganancia  $G$  en dicha dirección es

$$\wp = \frac{P_t G}{4\pi R^2}.$$

El objeto intercepta una porción de la potencia incidente y la rerradia en múltiples direcciones. La cantidad de potencia incidente interceptada por el objeto y rerradiada por este en la dirección de vuelta al RADAR depende del valor de la sección cruzada de RADAR (RCS),  $\sigma$ , la cual participa en la siguiente relación:

$$\wp_{back} = \frac{P_t G}{4\pi R^2} \frac{\sigma}{4\pi R^2},$$

donde  $\wp_{back}$  representa la densidad de potencia de radiación en el RADAR asociada al eco producido por el objeto.

La sección cruzada de RADAR,  $\sigma$ , tiene unidades de área, de tal forma que al multiplicarse por la densidad de radiación, se obtiene la cantidad de potencia rerradiada por el objeto en la dirección de vuelta al RADAR. Este parámetro es una característica particular de cada objeto. La antena del RADAR capturará una porción de la potencia del eco en función de la

densidad de potencia en sus dominios y de su área efectiva,  $A_e$ . De esta forma, la potencia recibida por el RADAR es

$$P_r = \wp_{back} A_e = \frac{P_t G}{4\pi R^2} \frac{\sigma}{4\pi R^2} A_e = \frac{P_t G \sigma A_e}{(4\pi)^2 R^4}.$$

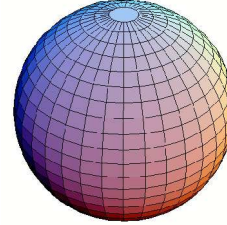


Fig. 2. Superficie de potencia constante de una antena isotrópica.

El máximo rango o distancia a la que un objeto puede ser detectado,  $R_{max}$ , ocurre cuando la potencia recibida del eco de la señal,  $P_r$ , es igual a la mínima señal detectable,  $S_{min}$ , de la forma

$$R_{max} = \left[ \frac{P_t G \sigma A_e}{(4\pi)^2 S_{min}} \right]^{1/4}.$$

Esta es la forma fundamental de la ecuación del RADAR. Notar que los parámetros importantes de la antena son la ganancia de transmisión,  $G$ , y el área efectiva de recepción,  $A_e$ .

Esta versión simplificada de la ecuación del RADAR no describe adecuadamente el rendimiento práctico del mismo. Existe una multitud de factores importantes que afectan al rango y no se modelan en la ecuación de forma explícita. En la práctica, los rangos de RADAR máximos observados suelen ser mucho menores que los predichos por la anterior ecuación, llegando a ser incluso la mitad del teórico. Sin embargo, dado que este texto es de carácter introductorio, no se profundizará más en el asunto.

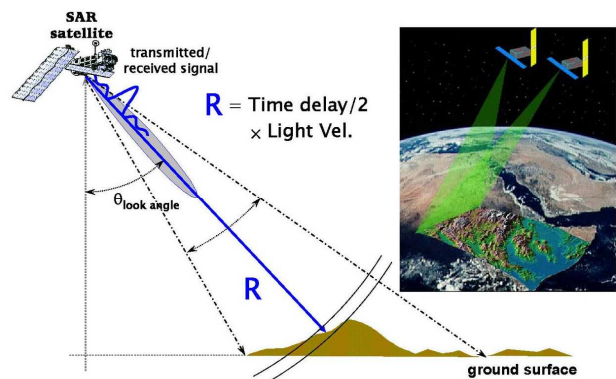


Fig. 3. Ejemplo de operación del RADAR.

## III. DIAGRAMA DE BLOQUES Y OPERACIÓN DEL RADAR

Con ayuda del diagrama de bloques de la figura 4 se va a describir la operación del RADAR más usual: el pulsado. El transmisor debe ser un oscilador, por ejemplo, un magnetrón,

el cual es pulsado (encendido y apagado) por el modulador para generar un tren de pulsos repetitivo. El magnetrón es un dispositivo que transforma la energía eléctrica en electromagnética en forma de microondas. De hecho, su origen, que data de los años 30, se debe a su necesidad para la construcción del RADAR. Un RADAR típico para la detección de aeronaves en el intervalo de los 5 a los 10 centímetros debe de emplear una potencia pico del orden del megawattio, una potencia media de varios kilowattios, un ancho de pulso de varios microsegundos y una frecuencia de repetición de pulso de varios cientos de pulsos por segundo. La forma de onda generada por el transmisor viaja a través de la línea de transmisión a la antena, siendo radiada por esta última al espacio. Normalmente sólo una antena es utilizada para cumplir tanto el cometido de transmisión como el de recepción. El receptor, por su parte, debe protegerse del daño causado por la alta potencia del transmisor. Esta es la función del duplexor, agregándose también la utilidad del envío de los ecos de la señal al receptor y no al transmisor.

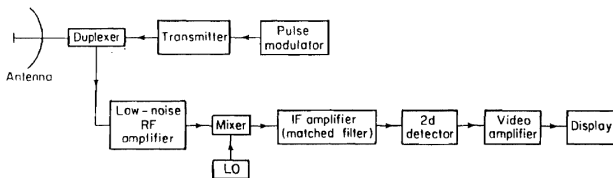


Fig. 4. Diagrama de bloques de un RADAR pulsado.

Usualmente el receptor es de tipo superheterodino. La primera etapa podría ser un amplificador de radiofrecuencia de bajo ruido, por ejemplo, un amplificador paramétrico o un transistor de bajo ruido. Sin embargo, no siempre es deseable emplear una primera etapa de bajo ruido en el RADAR. La entrada del receptor puede ser simplemente una etapa mezcladora, especialmente en RADARs militares que deben de operar en un ambiente ruidoso. Aunque un receptor con un *front-end* de bajo ruido será más sensible, la entrada del mezclador puede tener un rango dinámico mayor, menos susceptibilidad a la carga y menos vulnerabilidad a la interferencia electrónica.

El mezclador y el oscilador local (LO) convierten la señal RF a una frecuencia intermedia (IF). Un amplificador de frecuencia intermedia típico en un RADAR cuya aplicación es la vigilancia aérea puede tener una frecuencia central de 30 o 60MHz y un ancho de banda del orden de 1MHz. El amplificador IF debe ser diseñado como un filtro adaptativo; por ejemplo, su respuesta en frecuencia,  $H(f)$ , debe maximizar el ratio *pico de señal a potencia media de ruido* a la salida. Esto ocurre cuando la magnitud de la respuesta en frecuencia del filtro,  $|H(f)|$ , es igual a la magnitud del espectro del eco de la señal,  $|S(f)|$ , y la fase del espectro del filtro adaptativo es la fase negativa del espectro del eco de la señal. En un RADAR cuya forma de onda aproxima un pulso rectangular, la característica convencional del filtrado paso-banda de frecuencia intermedia aproxima un filtro adaptativo cuando el producto del ancho de banda IF,  $B$ , con el ancho de

pulso,  $\tau$ , es del orden de la unidad, esto es,  $B\tau \approx 1$ .

Después de maximizar la SNR en el amplificador de IF, el pulso de modulación es extraído por el segundo detector y amplificado por el amplificador de vídeo hasta un nivel tal que pueda ser apropiadamente mostrado, usualmente en un tubo de rayos catódicos (CRT). La forma más típica de pantalla de tubo de rayos catódicos es el PPI (Indicador de Posición en el Plano), el cual mapea en coordenadas polares la localización del objeto según la coordenada azimutal y la radial (correspondiente esta última al rango). PPI es una pantalla de intensidad modulada en la cual la amplitud de la salida del receptor modula la intensidad de un haz de electrones (eje  $z$ ). Este haz rota angularmente en respuesta a la posición de la antena. Una pantalla *B-scope* es similar al PPI con la diferencia de que la primera usa coordenadas rectangulares, en lugar de polares, para la representación del rango en función del ángulo. Otra forma de representación es el *A-scope*, recogido en la figura 5b, donde se dibuja la amplitud en el eje  $y$  y frente al rango en el eje  $x$  para una determinada dirección prefijada.

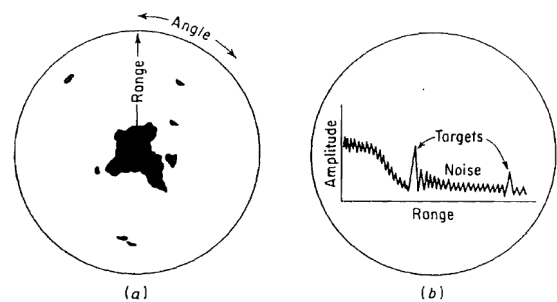


Fig. 5. (a) Representación PPI; (b) Representación en *A-scope* de la amplitud frente al rango.

El diagrama de bloques de la figura 4 es una versión simplificada que omite numerosos detalles. No obstante, es un buen punto de partida ilustrativo que sienta las bases del funcionamiento del RADAR, cumpliendo el carácter introductorio de este trabajo. Algunos elementos no incluidos que son interesantes e imprescindibles en determinados contextos pueden ser, por ejemplo, sensores para la localización angular de un objeto móvil en situaciones de seguimiento. Con la información proporcionada por estos la antena ha de ser capaz de orientarse en todo momento hacia el objeto para monitorizar su desplazamiento.

Previo a la representación en un CRT, la información recogida en el receptor debe ser preprocesada por un elemento ADT (Automatic Detection and Tracking); este dispositivo cuantiza la cobertura del RADAR en celdas determinadas por su coordenada radial (rango) y azimutal (dirección), integra todos los pulsos de eco recibidos en cada una de las celdas, establece un umbral que permite únicamente el paso de salidas de más alta potencia debidas a los ecos de los objetos eliminando el ruido, establece y mantiene las trayectorias de cada objeto y muestra la información procesada al operador.



Fig. 6. Antena de RADAR en Chilbolton (UK) con aplicaciones meteorológicas.

Es usual emplear antenas en RADARs con reflectores de tipo parabólico. Este reflector focaliza la energía procedente de la antena en un haz estrecho. Este haz escanea el espacio a partir del movimiento mecánico de la antena.

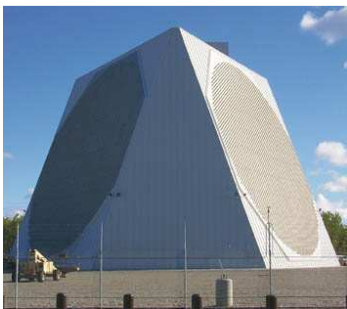


Fig. 7. Phased array de un sistema de RADAR en Alaska.

Otra opción es la utilización de *phased arrays*. Estos consisten en un array de elementos radiantes de tal forma que su radiación es muy directiva y se controla a partir de las fases de las señales de alimentación de cada uno de los elementos. Jugando con ellas es posible conseguir interferencias constructivas en las direcciones de interés y destructivas en las demás, pudiendo realizar así un barrido sin necesidad de un movimiento mecánico de la antena, como ocurre en el anterior caso.

IV. FRECUENCIAS DE RADAR

Los RADARs convencionales han operado tradicionalmente en el rango de frecuencias que va desde los 220MHz hasta los 35GHz. De todos modos, estos no son necesariamente los límites pues, por ejemplo, los RADARs de tierra de alta frecuencia operan en torno a los 2MHz o, incluso, los RADARs milimétricos han llegado a operar a 94GHz, pudiendo los RADARs láser operar incluso a frecuencias más altas.

La figura 8 muestra dónde se encuadra el rango de frecuencias del RADAR a lo largo del espectro electromagnético.

Pronto se comenzó a utilizar un conjunto de letras para designar las distintas bandas de frecuencia en las que el RADAR podía operar de forma standard. Aunque su propósito original era guardar el secretismo militar, las designaciones han sido mantenidas por conveniencia. La figura 9 lista la nomenclatura adoptada por los ingenieros de RADAR y standarizada por el IEEE.

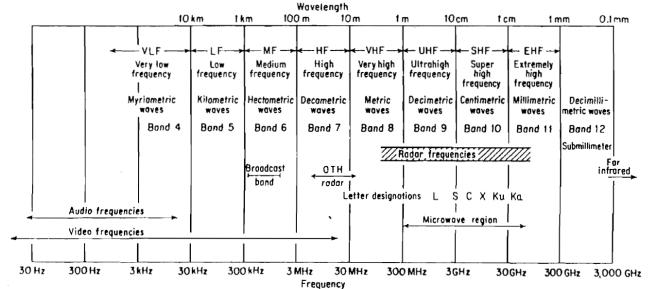


Fig. 8. Frecuencias de RADAR en el espectro electromagnético.

Band designation	Nominal frequency range	Specific radiolocation (radar) bands based on ITU assignments for region 2
HF	3-30 MHz	
VHF	30-300 MHz	138-144 MHz 216-225
UHF	300-1000 MHz	420-450 MHz 890-942
L	1000-2000 MHz	1215-1400 MHz
S	2000-4000 MHz	2300-2500 MHz 2700-3700
C	4000-8000 MHz	5250-5925 MHz
X	8000-12,000 MHz	8500-10,680 MHz
K <sub>u</sub>	12.0-18 GHz	13.4-14.0 GHz 15.7-17.7
K	18-27 GHz	24.05-24.25 GHz
K <sub>a</sub>	27-40 GHz	33.4-36.0 GHz
mm	40-300 GHz	

Fig. 9. Nomenclatura para las bandas de frecuencia del RADAR.

V. HISTORIA

El RADAR se fundamenta en las leyes de la reflexión de las ondas de radio, implícitas en las ecuaciones que controlan el comportamiento de las ondas electromagnéticas, planteadas por el físico británico James Clerk Maxwell en 1864. Estas leyes quedaron demostradas por primera vez en 1886 a la vista de los experimentos del físico alemán Heinrich Hertz. El ingeniero alemán Christian Hülsmeyer fue el primero en sugerir el aprovechamiento de este tipo de eco mediante su aplicación a un dispositivo de detección diseñado para evitar colisiones en la navegación marítima. En 1922 el inventor italiano Guglielmo Marconi desarrolló un aparato similar.

El primer experimento satisfactorio de detección a distancia tuvo lugar en 1924, cuando el físico británico Edward Victor Appleton utilizó el eco de las ondas de radio para averiguar la altura de la ionosfera. Al año siguiente los físicos norteamericanos Gregory Breit y Merle Antony Tuve llegaron de forma independiente a los mismos valores para la ionosfera al usar la técnica de radioimpulsos que más tarde se incorporó a todos los sistemas de RADAR. Su desarrollo no fue posible hasta que no se perfeccionaron las técnicas y equipos electrónicos en los años treinta.

El primer sistema útil de RADAR lo construyó en 1935 el físico británico Robert Watson-Watt. Sus investigaciones proporcionaron a Inglaterra una ventaja de partida en la aplicación de esta tecnología estratégica; en 1939 ya disponía de una cadena de estaciones de RADAR en las costas meridionales y orientales capaces de detectar agresiones tanto por aire como por mar. Ese mismo año dos científicos británicos lograron el avance más importante para la

tecnología del RADAR durante la II Guerra Mundial. El físico Henry Boot y el biofísico John T. Randall inventaron un tubo de electrones denominado magnetrón de cavidad resonante. Este tipo de tubo es capaz de generar impulsos de radio de alta frecuencia con mucha energía, lo que permitió el desarrollo del RADAR de microondas, que trabaja en la banda de longitudes de onda muy pequeñas, inferiores a 1 centímetro, usando el láser. El RADAR de microondas, conocido también como LIDAR (Light Detection And Ranging), se utiliza hoy en el sector de las comunicaciones y para medir la contaminación atmosférica.

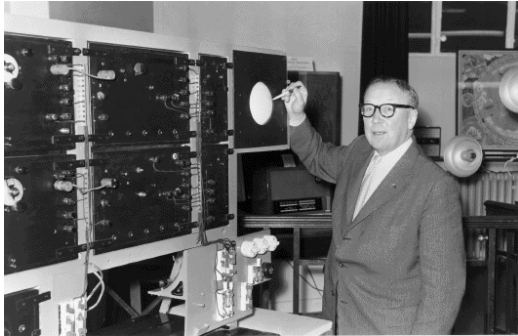


Fig. 10. Robert Watson-Watt con el RADAR original fabricado en Ditton Park en 1935. El aparato ahora se encuentra en el Museo de Ciencias de Londres.

Los sistemas de RADAR más evolucionados que se construyeron en los años treinta jugaron un papel decisivo en la batalla de Inglaterra, que se libró de agosto a octubre del año 1940, y en la que la Luftwaffe de Adolf Hitler fracasó en su intento de adueñarse del espacio aéreo inglés. Aunque los alemanes disponían de sistemas propios de RADAR, los ejércitos británico y estadounidense supieron preservar su superioridad técnica hasta el final de la guerra.

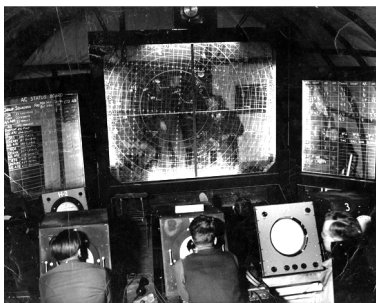


Fig. 11. Hombres de la Marina trabajando con el RADAR durante la Segunda Guerra Mundial.

## VI. APLICACIONES

El RADAR ha sido empleado en tierra, mar, aire y espacio. Los RADARs de tierra han sido aplicados usualmente a la detección, localización y seguimiento de aeronaves u objetos espaciales. Los RADARs situados en los barcos son usados para ayuda a la navegación, para la localización de boyas, orillas u otros barcos y así como para observar aeronaves. Los RADARs en vuelo pueden usarse para la detección de otras aeronaves, barcos o vehículos de tierra, e, incluso, para el mapeo de la superficie terrestre (construcción de mapas en

relieve, etc). También en esta coyuntura se emplean para la previsión de tormentas y para la navegación. En el espacio el RADAR tiene utilidad en el guiado de aeronaves así como en aplicaciones de *remote sensing* sobre la tierra y el mar.

Sin embargo, el mayor usuario del RADAR, y máximo contribuidor a la mayor parte de su desarrollo, ha sido el colectivo militar; aunque ha habido un importante incremento en el número de aplicaciones civiles (especialmente en los ámbitos de la navegación marítima y aérea). Las mayores áreas de aplicación se esbozan a continuación:

- *Control del tráfico aéreo:* El RADAR es empleado con el propósito de llevar a cabo un control seguro del tráfico aéreo, tanto en ruta como en la vecindad de los aeropuertos. Tanto los vehículos de tierra como las aeronaves son controlados en los grandes aeropuertos mediante el empleo de RADARs de alta resolución. El RADAR ha sido usado en los sistemas de aproximación a tierra con el fin de guiar la aeronave hacia un aterrizaje seguro en malas condiciones meteorológicas. Además, el sistema de aterrizaje de microondas está en gran medida basado en la tecnología del RADAR.
- *Navegación aérea:* El RADAR de prevención meteorológica usado en aeronaves para indicarle al piloto regiones con precipitaciones es una forma clásica de RADAR. Incluso el altímetro empleado, basado en tecnología radio, así como el navegador Doppler, son también RADARs. A veces, los RADARs utilizados en la caracterización del relieve terrestre con una resolución moderada son empleados con propósitos de navegación aérea.
- *Navegación marítima:* El RADAR es usado para la mejora de la seguridad en los viajes en barco en el sentido de poder recibir avisos por parte de este en caso de potenciales colisiones con otros barcos. También se emplea para la detección de boyas en situaciones de baja visibilidad por mal tiempo.
- *Espacio:* Los vehículos espaciales han usado el RADAR para reuniones o encuentros espaciales, acoplamiento e incluso para el alunizaje. Muchos de los RADARs de tierra más grandes están dedicados a la detección y seguimiento de los satélites en el espacio. También se destinan RADARs en los satélites para aplicaciones de *remote sensing* sobre la Tierra.
- *Remote sensing:* Concerniente a la detección remota de recursos terrestres, la cual incluye la medida y el mapeo de las condiciones del mar, recursos de agua, agricultura, condiciones forestales, formaciones geológicas y contaminación ambiental. Las plataformas de estos RADARs imbrican tanto satélites como aeronaves.
- *Fuerzas de la ley:* El RADAR es empleado por la policía de tráfico para la detección de la velocidad de los vehículos, siendo también usado en la detección de intrusos.
- *Uso militar:* Muchas de las aplicaciones civiles del RADAR son también adoptadas por los militares. El rol tradicional del RADAR en el mundo militar ha

sido la vigilancia, navegación y el control y guiado de armas.

#### REFERENCIAS

- [1] M. I. Skolnik, "Introduction to RADAR Systems" McGraw-Hill, 1981.