

Fundamentos

técnicos

del "radar"

EMILIO FERNANDEZ CASADO,

Ingeniero de Telecomunicación.

Tratándose de un elemento tan familiar en los Ejércitos modernos como pueda serlo un cañón antiaéreo, es preciso que en España vayamos asimismo familiarizándonos con el "radar", clasificado como el segundo invento más importante aparecido en la segunda guerra mundial, después de la bomba atómica, aunque con seguridad su papel haya sido el más importante, ya que a él deben los aliados la destrucción de la ofensiva aérea sobre Londres y, posteriormente, la de la guerra submarina (en 1942 poseían ya los barcos "radar"), como ha confesado el Almirante Doenitz en el proceso de Nuremberg. Merece citarse en particular el éxito de los primitivos aparatos de la "Chain Home", que evitaron el vuelo constante de la caza inglesa, avisando la proximidad de los *Dornier* y *Heinkel*—de velocidades del orden de 400 kms/hora volando a unos 8.000 metros de altura—con tiempo sobrado para que adquiriesen altura suficiente los *Spitfire* y *Hurricanes*—en lo que invertían unos veinte minutos—, lo que supone detectaban los aviones alemanes cuando éstos se encontraban a unos 140 kilómetros. El bombardeo mayor de Londres, ocurrido el 17 de enero de 1943 como represalia del 54 ataque a Berlín, proporcionó considerables pérdidas a los atacantes, por estar ya provistas las baterías antiaéreas de equipos "radar" de persecución; así como tantas y tantas acciones aisladas que podríamos citar.

Si su utilidad ha sido tan extraordinaria en la guerra, constituyendo el elemento más esencial de la defensa pasiva y hasta de la activa, pues, como sabemos, los *Black-Widow* poseían equipos seguidores automáticos, no lo serán menos sus aplicaciones pacíficas como ayuda valiosísima a la Navegación y a la Ciencia en general, como lo demuestran ya los "impactos" conseguidos en la Luna.

El objeto que persigo es, simplemente, divulgar algunos de sus fundamentos técnicos más esenciales, como indica el título del presente artículo.

Todos sabemos de sobra en qué consiste un equipo "radar". Un transmisor emite una onda, que, propagándose por el medio, alcanza el objetivo a detectar, en el que se refleja, y la onda "eco" recorre nuevamente la distancia, alcanzando el receptor su trayectoria de vuelta. Primeramente vamos a hacer caso omiso de los distintos elementos que intervienen en este sistema, y vamos a estudiar las características principales de este aparato.

La utilidad de un "radar" depende principalmente de tres características esenciales:

- a) Máxima distancia a que puede detectarse un objetivo.
- b) Exactitud en la determinación de un objetivo.

c) Continuidad de las observaciones para "seguir" un objetivo.

En el presente artículo nos referiremos simplemente a la característica a).

Sabido es que un foco puntual, radiando una potencia de W vatios por segundo, produce por igual en todas las direcciones del espacio, supuesto homogéneo e isotrópico, una potencia w por unidad de ángulo sólido $d\omega$ (fig 1):

$$w = \frac{W}{4\pi} \text{ vatios,} \quad [1]$$

ya que el ángulo sólido, subtendido por una esfera de radio unidad, son 4π radianes.

Un radiador en estas condiciones, para el objeto que nos ocupa, supone un despilfarro de energía, ya que de toda la enviada al espacio tan sólo una mínima parte se dirige en la dirección deseada hacia un objetivo determinado. Para evitar esto es necesario utilizar sistemas radiantes directivos.

Al llegar a este punto es conveniente que definamos la "directividad" de una antena y, aunque no existe actualmente una definición "standard", daremos la corrientemente utilizada, esto es: "la relación entre la energía por unidad de ángulo sólido transmitida bajo la dirección de su máxima radiación, y el valor promedio de la energía por unidad de ángulo sólido, si la energía fluyese en todas las direcciones del espacio" o, en otras palabras, "la relación entre el vector de Poynting, en la dirección de máxima radiación y el promedio de este vector".

Generalmente se utiliza con fines comparativos una "directividad relativa", o sea, la relación de la directividad absoluta definida de un sistema de antenas a la de una antena sencilla omnidireccional, acimutalmente tomada como unidad. En la técnica de las ondas métricas y decimétricas es corriente utilizar como unidad el dipolo en $\frac{\lambda}{2}$ o "antena Hertz", cuya directividad absoluta es 1,64. Nosotros tomaremos, como es usual en ondas centimétricas—en las que las longitudes geométricas del sistema emisor son siempre pequeñas—, el "doblete" o elemento de radiador de directividad 1,5 (fig. 2).

Estas directividades relativas suelen medirse en unidades logarítmicas, y el número de decibelios correspondiente es lo que se denomina "ganancia" de una antena.

No nos detendremos ahora en la forma física de conseguir esta concentración de la ener-

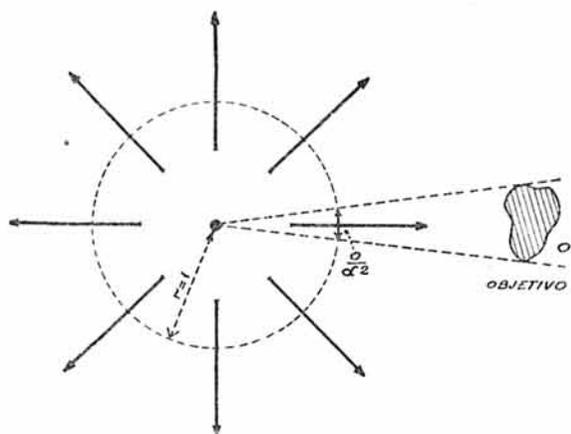


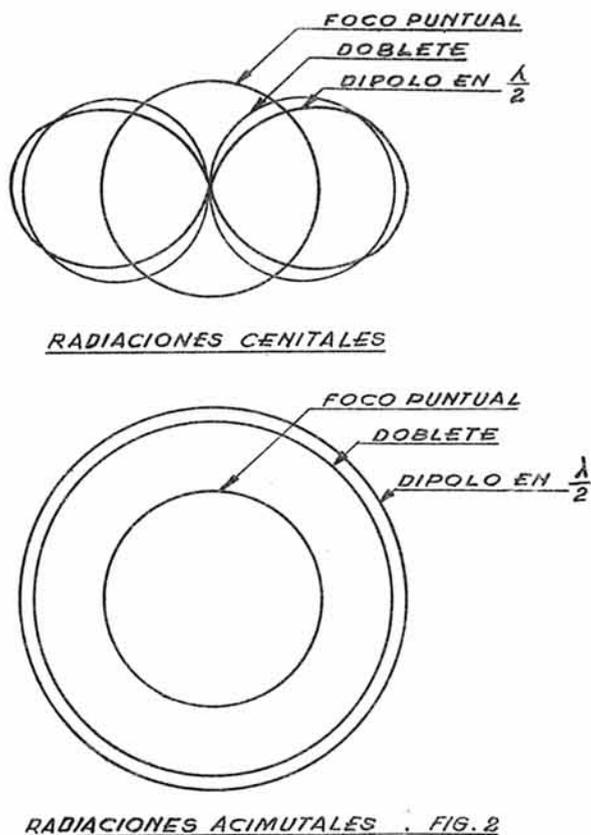
FIG. 1. RADIACION DE UN FOCO PUNTUAL.

gía, que se verá más adelante al estudiar los tipos de antenas más utilizados en los equipos de "radar"; sólo diremos, a título comparativo, que en la llamada técnica de las ondas cortas, empleada en comunicaciones a larga distancia, se consiguen a base de antenas V, rómbicas o redes de dipolos, directividades absolutas del orden de 54 a 256, que, comparadas con el "doblete" (no sobre el dipolo en $\frac{\lambda}{2}$, como suele hacerse en ondas métricas), resultan unas directividades relativas de 42 a 170, o sea, unas "ganancias" de 16 a 23 decibelios. De estas cifras, las más altas sólo se consiguen a base de instalaciones costosísimas (sobre todo a causa de los mástiles elevados necesarios), y aunque las antenas utilizadas en los primitivos "radar" de la "Chain Home", que defendía a Inglaterra de los ataques de la Luftwaffe, eran de estos tipos, pronto resultaron pobres estas directividades al lado de las conseguidas en los equipos actuales, donde son corrientes las directividades relativas de 325, 1.200 y hasta 12.000, como posee el equipo ANMPG/1.

Para tener una idea de cómo se consiguen estas directividades, podemos escribir la fórmula de la directividad relativa respecto al "doblete":

$$D = \frac{S}{3\lambda^2} = \frac{8\pi}{3} \cdot \frac{S}{\lambda^2}, \quad [2]$$

en la que λ es la longitud de onda utilizada, S la "superficie radiante" (o "absorbente", en virtud del teorema de reciprocidad) del sistema de antenas, y $\frac{3\lambda^2}{8\pi}$ la "superficie radiante" equivalente del "doblete", estando λ y S medidos en las mismas unidades. S es, aproximadamente,



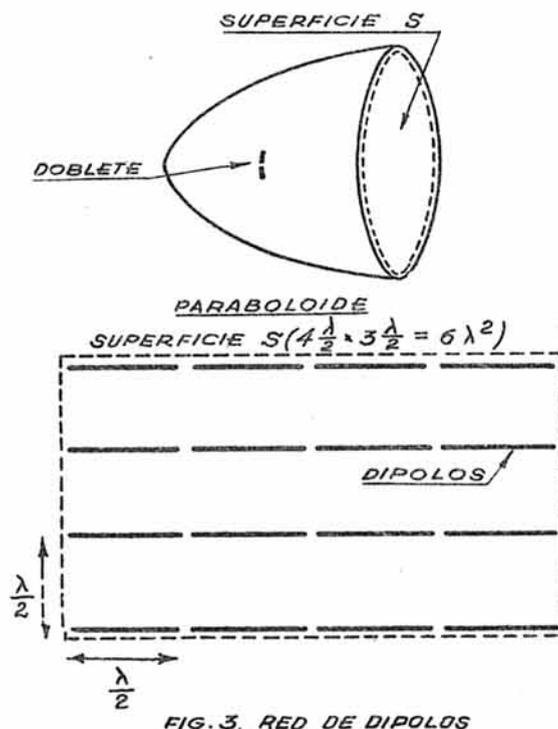
el área superficial ocupada por la red de dipolos, si es así la antena, o la abertura del paraboloide reflector, si se utiliza este sistema (figura 3). Y decimos aproximadamente porque, al igual que ocurre con las aberraciones en óptica, estas superficies difieren ligeramente de las áreas físicas dichas, por no estar igualmente iluminada por la radiación toda su superficie.

Si, por ejemplo, se utilizan redes de dipolos separados sus centros—como generalmente se montan—una distancia de $\frac{\lambda}{2}$, tanto vertical como horizontalmente, como la concentración de energía cenitalmente depende del número de radiadores superpuestos de que dispongamos y, similarmente, la concentración acimutal depende de los dipolos laterales que coloquemos, ya se ve a primera vista que en cuanto pretendamos cierta concentración, la superficie ocupada por los radiadores adquirirá valores exagerados.

Por otra parte, en la fórmula [2] observamos que cuanto más directividad deseemos, mayor ha de ser S , o menor λ a igualdad de S ; y en efecto, esta ha sido la trayectoria seguida en la evolución del "radar", y así, de las ondas mé-

tricas ($\lambda = 1$ a 10 m.) utilizadas al principio de la contienda, pronto se descendió a las decimétricas, y luego a las centimétricas, en cuanto lo permitió la técnica de estas ondas pequeñísimas, en cuya carrera descendente de λ alcanzaron enorme ventaja los anglosajones sobre sus enemigos. Asimismo los equipos pudieron entonces reducirse de tamaño y aplicar de una manera efectiva la técnica de las "guías de ondas", líneas de transmisión óptimas para las ondas centimétricas. En el equipo utilizado para comunicar con la Luna se ha utilizado la elevada frecuencia de 111,5 Mc/s. (por otra parte, necesaria para poder traspasar bajo incidencia vertical las capas ionizadas de Appleton y Heaviside).

Al conseguirse directividades tan enormes como las citadas, que hacían del haz principal de radiación verdaderos "pinceles radiantes", fué posible aplicar al "radar" los principios utilizados en televisión, consiguiéndose verdaderas exploraciones del espacio que permitían conocer tanto el número de aviones atacantes como los bombardeos nocturnos, visibles aquéllos o el terreno situado debajo del avión en una pantalla del tubo de rayos catódicos. La anchura del haz se estudiará posteriormente, al referirnos a la característica b), o sea a la "Exactitud en la determinación del objetivo".



El mejor aprovechamiento de la energía adquiere una importancia capital en estos sistemas radiolocalizadores, ya que una mayor potencia en el equipo transmisor obliga a unas mayores dimensiones en válvulas y demás elementos, así como el empleo de mejores aislantes (estos últimos, en las líneas coaxiales de transmisión, ha habido que sustituirlos por aislantes metálicos, fundados en la alta impedancia de las líneas en $\frac{\lambda}{4}$), y tratándose además de equipos que por su aplicación generalmente deben ser fácilmente transportables, deben evitarse en lo posible sistemas de alimentación voluminosos. Este último punto es de vital importancia; para darnos una idea de cifras, consideremos un transmisor de ondas métricas corriente, de los utilizados en comunicaciones fijas, radiando 1 Kw. Esto supone un consumo de 6 a 8 Kw. tomados de las fuentes de alimentación; y tengamos presente que este kilovatio radiado produciría unos campos, en un receptor situado en un avión, del orden de:

A 10 kms.	2.000 $\mu\text{V/m}$.
A 50 kms.	20 $\mu\text{V/m}$.

Para otras distancias el campo disminuye proporcionalmente al aumento de la distancia al transmisor d , y para aumentar los campos es necesario, o utilizar sistemas más directivos, siempre más económicos a pesar de un mayor coste inicial de la instalación, o aumentar la potencia W . Esto puede verse en la fórmula del "campo" E , escrita bajo la forma:

$$E = K \cdot \frac{\sqrt{W}}{d} \quad [3]$$

Si consideramos que en el caso del "radar" las ondas han de alcanzar el objetivo, reflejarse en éste y regresar hasta el transmisor, esto es, recorrer dos veces la distancia d y al mismo tiempo sufrir, por tanto, una atenuación doble en su propagación por el medio (no explícita en la fórmula [3]) y en su reflexión en el objetivo (que en los casos prácticos del "radar" suele ser pequeña), se aprecia que los campos que alcanzan nuevamente el sistema de antenas del "radar", o, lo que es lo mismo, la energía (proporcional al cuadrado del campo), es pequeñísima, del orden de 10^{-20} de la energía radiada. En el "impacto" conseguido en la Luna se radió una potencia de 3 Kw., y la señal que se recibió de nuestro satélite fué tan sólo de 10^{-18}

kilovatios. El autor supone que se procuraría una incidencia perpendicular, para evitar en lo posible las atenuaciones sufridas al atravesar las capas ionizadas de Appleton (a unos 100 kilómetros de altura) y de Kenelly-Heaviside (a unos 350 kms.) y recorrer el menor camino posible a través de la atmósfera, ya que la frecuencia utilizada de 111,5 Mc/s. permitía esta perpendicularidad.

Como vemos, para conseguir grandes alcances se han de manejar potencias elevadas, por lo que resulta de sumo interés cuidar de los rendimientos de todos los elementos del sistema, desde las antenas hasta el dispositivo de alimentación, sobre todo si el equipo ha de ser transportable.

Aunque sin entrar ahora en detalles, diremos que con este objeto se utilizan reactancias constituidas aprovechando las propiedades de las líneas, generalmente trozos de líneas coaxiales o guías de ondas de elevadísimo Q .

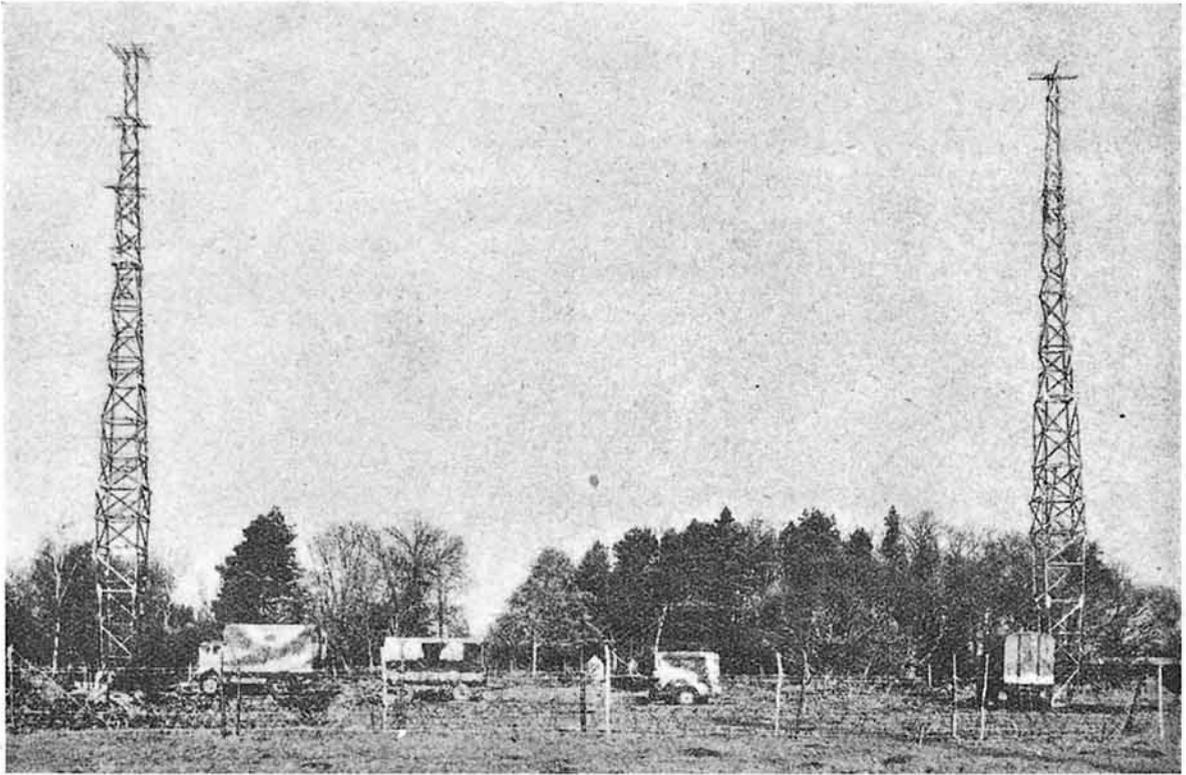
La transmisión a base de "impulsos" ha facilitado también enormemente el mejor aprovechamiento de la energía, ya que si expresamos la potencia bajo la forma

$$W = Wp \cdot t, \quad [4]$$

donde Wp es la potencia radiada en el "pico" del impulso y t la duración de éste, ya se aprecia que para una misma potencia W , cuanto menor sea t mayor ha de ser Wp , que en definitiva es la que interesa. También una misma válvula o "magnetron", capaz de disipar una cierta potencia, puede producir potencias más elevadas en cuanto trabaje menos tiempo. Posteriormente volveremos a tratar sobre este punto.

Afortunadamente, las potencias necesarias en transmisión no alcanzan valores desmesurados, gracias a la extraordinaria "sensibilidad" de los receptores modernos, a la que casi se puede atribuir el hacer posible la realización práctica de este invento.

Y en efecto, lo que actualmente limita esta sensibilidad es el llamado "ruido de fondo", debido a los movimientos caóticos de los electrones libres, tanto en los circuitos de entrada como en las válvulas mismas, sobre todo en tetrodos y pentodos, en los que al ruido producido por irregularidades en la emisión catódica, se añaden los debidos al paso de los electrones por la pantalla. (Sobre la teoría de ruidos en los receptores, puede consultarse la obra de A. Colino *Estudio del receptor superheterodino*.)



Un ejemplo de instalación "radar" en el año 1939.

de utilización del "radar"), el área O del objetivo se constituye ahora en radiador de potencia P_2 , y repitiendo lo dicho, la potencia recibida en la antena transmisor-receptor del equipo será ahora:

$$P_3 = \frac{S \cdot W \cdot O}{4\pi \cdot d^2 \cdot \lambda^2} \cdot \frac{S}{d^2} = \frac{S^2 \cdot W \cdot O}{d^4 \cdot \lambda^2} \text{ vatios; [10]}$$

e igualando [7] a [10], teniendo en cuenta la [4] y despejando d , resulta:

$$d = \sqrt[4]{\frac{S^2 \cdot W \cdot \rho \cdot t \cdot O}{N \cdot K \cdot T \cdot \Delta f \cdot \lambda^2}} \quad [11]$$

que es la ecuación del "radar", y que de una manera clara nos expresa las relaciones que ligan a los diversos elementos que intervienen.

Tengamos en cuenta que el valor calculado para d como consecuencia de igualar las expresiones [7] a [10] y no las [6] a la [10], es la máxima distancia a que puede detectarse un objetivo de las características supuestas.

Esta distancia es mayor, como se ve en la

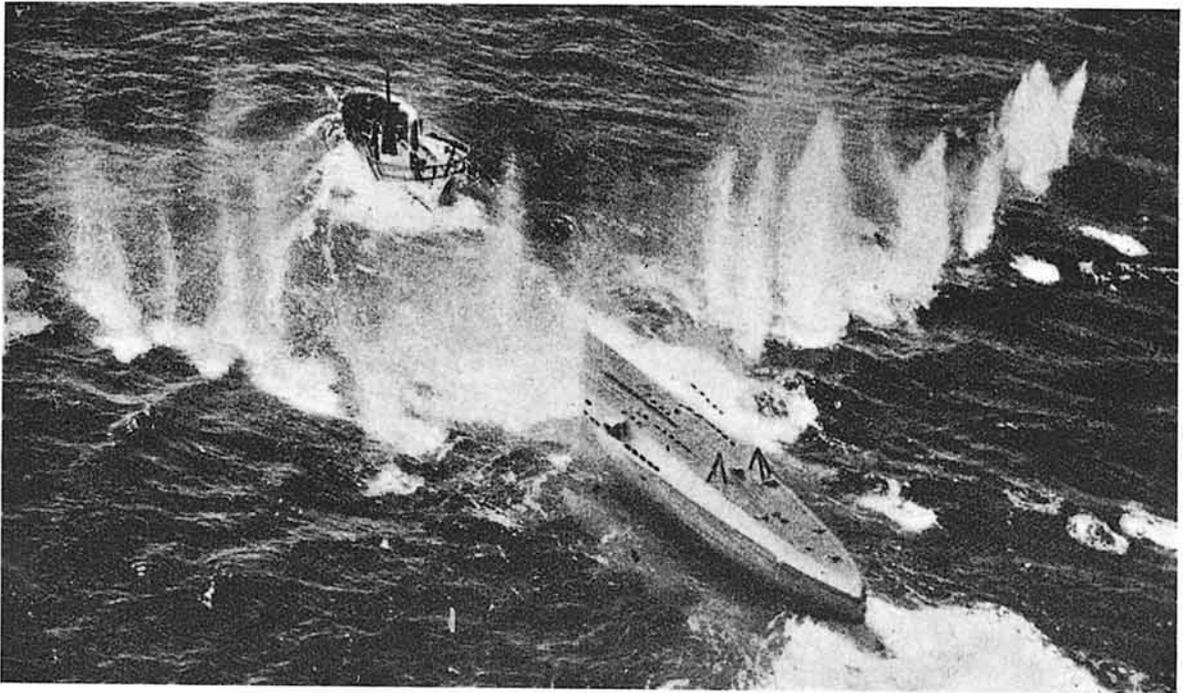
ecuación, cuanto mayor es la potencia radiada, mayor la superficie eficaz del objetivo, y aumenta según el cuadrado de la "superficie radiante" de la antena transmisor-receptora.

Asimismo se aprecia la conveniencia de un receptor de poco ruido, de utilizar ondas lo más cortas posible y la pequeña ventaja obtenida durante las temperaturas bajas.

t es el tiempo durante el cual el receptor no puede recibir "ecos" por estar la antena transmitiendo y el receptor bloqueado, y por ello las ondas reflejadas de objetivos demasiado próximos no podrán recibirse, dependiendo, por tanto, la distancia mínima de la duración de t .

La velocidad de los impulsos determina el límite superior a la distancia máxima, ya que como durante el intervalo entre éstos es sólo cuando pueden recibirse los ecos, y este intervalo vale la inversa de la velocidad de aquéllos, cuanto más pequeño sea t , mayor será el intervalo entre impulsos y mayor la distancia permisible para la detección del objetivo.

Y con ello damos por terminada la primera parte de este artículo.



Ataque en vuelo rasante a un submarino alemán, que fué descubierto por medio del aparato A. S. V.

Se define como "número de ruido" de un receptor a la expresión

$$N = \frac{S_e}{K \cdot T \cdot \Delta f} \cdot \frac{S_s}{R_s} \quad [5]$$

en la que S_e es la potencia de la señal útil a la entrada del receptor; S_s , la potencia de la señal útil a la salida del mismo; R_s , la potencia del ruido, también a la salida del receptor; K , la constante de Boltzman, o sea $1,38 \cdot 10^{-23}$ julios por grado Kelvin de temperatura (generalmente, para promedio del producto $K \cdot T$ puede tomarse unos $4 \cdot 10^{-21}$ vatios por ciclo de ancho de banda), y Δf es la "anchura de banda efectiva" del receptor, en ciclos por segundo.

Luego la potencia de entrada necesaria de la señal puede calcularse por:

$$S_e = \frac{R_s}{S_s} \cdot N \cdot K \cdot T \cdot \Delta f \text{ vatios,} \quad [6]$$

y la límite menor necesaria será, haciendo $\frac{R_s}{S_s} = 1$:

$$S_e = N \cdot K \cdot T \cdot \Delta f \text{ vatios} \quad [7]$$

en la entrada de antena del receptor.

Con las fórmulas explicadas hasta aquí es ya fácil obtener la llamada *ecuación del "radar"*.

En efecto. Supongamos un tipo corriente de "radar" que utilice la misma antena para transmisión y para recepción, bloqueando el receptor (o su "Klystron") durante el tiempo que se transmiten los impulsos, y que esta antena está constituida por un "doblete" situado en el foco de un paraboloide reflector de "superficie radiante" S .

La potencia radiada por ángulo sólido unidad por el "doblete" será la [1] multiplicada por su directividad $\frac{3}{2}$.

La potencia radiada por ángulo sólido unidad, incluyendo el paraboloide reflector, será:

$$P_1 = \frac{W}{4 \pi} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{8 \pi S}{3 \lambda^2}, \quad [8]$$

y la recibida por un objetivo de superficie O (para un bombardero medio o $\approx 50 \text{ m}^2$) a la distancia d será (expresando esta superficie en ángulo sólido):

$$P_2 = P_1 \cdot \frac{O}{d^2} = \frac{S \cdot W \cdot O}{d^2 \cdot \lambda^2}. \quad [9]$$

Suponiendo que en la reflexión en el objetivo no se absorbe energía (lo que, desde luego, puede suponerse en ondas centimétricas y objetivos metálicos, como suele ocurrir en los casos