

HISTORIA Y TEORÍA DEL RADAR, Capítulo 1

RADAR HISTORY AND THEORY. Chapter I

Óscar Penny Cabrera¹

*El documento **Historia y Teoría del Radar, capítulo 1**, que se publica en esta oportunidad en memoria del Dr. Óscar Penny Cabrera —Past Director de la Escuela de Ingeniería Electrónica de la Universidad Ricardo Palma (URP)— fue escrito por él, como parte de un cuaderno de trabajo de tres capítulos. En el primer apartado, realiza una reseña histórica del radar; en el segundo, da cuenta de los principios que posee, y en el tercero, detalla la ecuación de este artefacto. Cabe destacar que el material restante se publicará en sucesivas ediciones de la revista **Perfiles de Ingeniería**.*

HÉCTOR ROSELLÓ MORENO, Secretario Académico Facultad de Ingeniería

1. RESEÑA HISTÓRICA

1.1. La batalla del Río de la Plata y la aparición del radar

En 1939, poco antes de la Segunda Guerra Mundial, los acorazados de bolsillo de origen alemán, Deutschland y Graf Spee, se encontraban dispuestos a iniciar la llamada Guerra de Corso en el Atlántico. Estos eran rápidos, de gran autonomía, con un excelente blindaje y con un armamento poderoso, que estaba constituido por 6 cañones de 280 mm. Además, por la potencia de fuego y por su limitado desplazamiento (alrededor de 10.000 toneladas), se les denominó de esa forma. Así, se había previsto designarlos para el papel de corsarios, que tanta fama había dado a otros buques alemanes durante la Primera Guerra Mundial, puesto que se encontraba en condiciones de enfrentarse eficazmente con cualquier buque de guerra que no tuviera las características de un verdadero acorazado de unas 35.000 toneladas de desplazamiento.

A estos, sin embargo, no les sonrió igual fortuna como la que tuvieron sus predecesores veinte años antes. El Deutschland, de hecho, solo encontró dos buques mercantes enemigos en toda el área del Atlántico que le había sido asignada y regresó a Alemania por el océano Glacial Ártico en cuanto comenzó a escaseársele el combustible. El otro, Graf Spee, asignado al Atlántico Meridional, hundió nueve buques mercantes ingleses. El último de ellos, asaltado el 3 de diciembre de 1939, logró comunicar por radio que había sido atacado por un buque alemán a medio camino entre el Cabo de Buena Esperanza y Sierra Leona.

Por otro lado, la misión de proteger el tráfico mercante aliado en aquella zona del Atlántico estaba asignada a una Fuerza Naval Británica compuesta por tres cruceros: Ajax, Achilles y Exeter, los cuales estaban al mando del comodoro Harwood. Este, apenas recibió el aviso del buque inglés atacado, consideró que el acorazado de Bolsillo Graf Spee cambió la zona de operaciones y que se podría dirigir

¹ Universidad Ricardo Palma, Av. Benavides 5440, Surco, Lima, Perú.

probablemente al estuario del Río de la Plata, zona caracterizada por su intenso tráfico de buques mercantes. También, el comodoro inglés calculó que podría alcanzar aquellas aguas en unos diez días, justo el tiempo estimado en que llegaría el navío alemán. Por eso, inmediatamente, señaló instrucciones necesarias a los tres buques a su mando.

Como lo había previsto Harwood, los tres cruceros avistaron al Graf Spee, probablemente ayudados por algunas transmisiones de radio efectuadas por el corsario, al alba del 13 de diciembre. El comandante alemán Langsdorff, confiando en la superioridad de su armamento, aceptó el combate y fue el primero que abrió fuego e infligió serios daños a los ingleses. No obstante, estos últimos lograron averiar al buque alemán, el cual tuvo que refugiarse para efectuar las reparaciones necesarias en el puerto de Montevideo —lugar que podía conceder un país neutral a un buque beligerante por 72 horas según el Convenio Internacional de la Haya—.

Durante esas horas, los buques británicos esperaron fuera del Estuario. Ello les permitió tomar fotografías del acorazado de bolsillo alemán, donde se podía observar todas sus características visibles desde el exterior, las cuales fueron remitidas inmediatamente al almirantazgo en Londres. Por su parte, el capitán de navío Langsdorff, al ver que no podía enfrentarse a la fuerza naval inglesa en aquellas condiciones y que era inevitable abandonar el puerto, llevó el buque fuera de las aguas territoriales y ordenó su hundimiento. Antes de ello, se aseguró de que la dotación a algunos remolcadores quedara bien atendida y se suicidó por la culpa.

Los técnicos del servicio de inteligencia británico palidecieron cuando examinaron aquellas fotografías. Por una negligencia comprensible en momentos dramáticos, la dotación del Graf Spee no había sido cubierta por la antena del radar instalada sobre el puente y esta aparecía claramente en las fotos tomadas por los ingleses. A juzgar por las dimensiones y por las características más destacadas en las fotos, debía de tratarse de un radar de concepción mucho más avanzada que la de los británicos.

Los ingleses supieron así que los alemanes también habían creado el radar y ¡qué radar! Inmediatamente, algunos expertos técnicos electrónicos fueron enviados a Montevideo para inspeccionar los restos del Graf Spee que emergían del agua, puesto que esta información permitiría conocer algo más sobre aquella antena que podía revelar mucho a un experto. En efecto, se trataba del famoso y perfeccionado Seetakt, un radar para dirección de tiro que operaba en una frecuencia de 375 Mc/s. correspondiente a una longitud de onda de solo 80 cm. En otras palabras, era uno de los primeros radares centimétricos, caracterizado por su notable precisión de un alcance útil de nueve millas. De esta forma, estaban preocupados porque la tecnología alemana del radar parecía muy avanzada a diferencia de la industria británica, la cual no había construido todavía un aparato con características análogas. Por suerte, hasta el momento, solo se habían construido tres ejemplares como aquel, aunque ellos lo desconocían.

Aún sin ser un radar de exploración, el Seetakt había confirmado la presencia de los tres cruceros ingleses antes del combate. Además, proporcionó los datos precisos sobre la distancia de los blancos hasta que un disparo enemigo rompió la guía de ondas entre la antena y el equipo, lo que lo inutilizó por completo. Estos motivos debieron inducir al comandante del Graf Spee a eludir el nuevo combate, poco conveniente para un buque corsario, fuera del puerto de Montevideo. La información adquirida demostró que, desde el punto de vista estratégico, Gran Bretaña tenía poco que temer a los corsarios en la guerra y también demostró la existencia de ciertas lagunas en los buques de su majestad británica en cuanto a la tecnología del radar.

Por consiguiente, los ingleses estudiaron de inmediato un radar naval de prestaciones semejante a la del Seetakt alemán y a pensar, entre tanto, en la posibilidad de neutralizar la eficacia de este mediante contramedidas apropiadas. Así, era la primera vez en la historia que, en el escenario de una batalla, hacía su aparición el radar: auténtica arma secreta de la Segunda Guerra Mundial.

1.2. Trabajos anteriores a la segunda guerra mundial

Es opinión bastante extendida que el radar fue una invención inglesa porque fueron los primeros en usarlo regularmente en su organización para la defensa aérea. Sin embargo, de forma simultánea, aquel prestigioso instrumento era objeto de estudio y de investigación llevada de forma aislada y con el mayor secreto en Alemania, Italia, Francia y los Estados Unidos. Por otra parte, los principios generales del radar habían sido ya enunciados hacia algún tiempo y eran conocidos por todos.

En efecto, en 1888, el físico alemán Heinrich Hertz había demostrado que las ondas electromagnéticas, llamadas después ondas hertzianas, se comportaban como las de la luz. Es decir, estas podían ser reunidas en haces reflejados por sencillas superficies metálicas, lo que originaba un eco de retorno que puede ser captado.

Años más tarde, específicamente en 1904, un ingeniero de Dusseldorf, llamado Christian Hulsmeyer, tramitó una petición de patente para un aparato de medida radiofónica consistente en radiotransmisor y receptor montados uno junto a otro. Los dos equipos estaban contruidos de modo que las ondas emitidas por el transmisor se reflejaban en cualquier objeto metálico para poner en funcionamiento el receptor. El aparato inventado por el ingeniero alemán, denominado telemoviloscopio, podía captar un sonido como de una campana cuando el receptor recibía el eco de la onda electrónica reflejada por objetos metálicos distantes a algunos centenares de metros.

Ese mismo año, Hulsmeyer realizó un experimento para demostrar la eficacia de su aparato en Rotterdam; sin embargo, a pesar del éxito del experimento, los representantes de las grandes compañías navieras no mostraron el menor interés por aquel aparato, cuyo defecto principal fue el haber sido concebido demasiado pronto. En efecto, todavía se sabía poco sobre la naturaleza de las ondas de radio porque no existían medios para amplificar una señal, para protegerlas de las interferencias externas, para controlar las emisiones electromagnéticas producidas, etc.

Las posibilidades técnicas de construir un auténtico radar eran aún muy remotas cuando Guillermo Marconi —en una conferencia, aún hoy célebre, pronunciada en el Instituto de Energía de Radio en los Estados Unidos en 1922— formuló previsiones concretas sobre la posibilidad de utilizar las ondas de radio para realizar un sistema auxiliar de navegación marítima, basado en la propiedad de las ondas eléctricas de ser reflejadas por los cuerpos conductores. «En algunas de mis experiencias —decía él— he comprobado efectos de reflexión y revelado de estas ondas, por objetos metálicos a distancias de varias millas. Yo creo que sería posible proyectar aparatos por medio de los cuales un barco podría radiar un haz de estas ondas en la dirección deseada, cuyas ondas, al encontrar un objeto metálico, tal como otro barco, se reflejarían hacia un reflector, apuntado respecto al transmisor del buque emisor, y podría indicar inmediatamente la presencia y la demora del otro buque con niebla o cerrazón».

Posteriormente, Marconi realizó, en presencia de autoridades italianas, experiencias sobre las fluctuaciones que ocurrían en la recepción de señales por efecto del paso de vehículos en la proximidad del haz de un enlace de radio que emitía ondas a 90 centímetros instalado entre Roma y Castel Gandolfo en 1933.

Por aquellos años, además de Marconi, el profesor Hugo Tiberio se dedicó al estudio y a la investigación del radar o R.D.T. (Radio Detector Telémetro) en Italia. Tras los estudios realizados y tras la posibilidad de adaptar aparatos para el sondeo ionosférico para la localización de buques y aeronaves a gran distancia, había iniciado una serie de investigaciones para la realización de un radar de exploración con potencia de transmisión y sensibilidad de recepción de alto nivel.

Su iniciativa se concretó en 1935 a través de una propuesta formal aprobada por una comisión de guerra italiana. El problema se consideraba de competencia de la marina, ya que era la fuerza armada que demostraba mayor interés en la realización del Radio-Detector-Telémetro y era la mejor

organizada desde el punto de vista técnico para la investigación y el desarrollo en el campo de la electrónica. Por ello, se constituyó un grupo de trabajo, dirigido por él, en el Instituto Mariteleradar asociado a la Academia Naval de Livorno con la misión precisa de llevar a término el problema del radar en 1936.

1.3. La tragedia de gaudo matapán y el radar italiano

Los medios financieros y el personal puesto a su disposición para tan ardua tarea fueron limitados, por lo que el profesor Tiberio, que entre tanto había sido nombrado oficial de Armas Navales, debió realizar casi solo el desarrollo y la experimentación de los prototipos de radar proyectados hasta 1941. Después del combate de Cabo Matapán, el cual costó a la Marina Italiana la pérdida de tres cruceros, dos destructores y 2300 hombres, no se tuvo información concreta sobre la existencia de medios electrónicos para localización nocturna en los buques ingleses. Pese a ello, el almirantazgo italiano tuvo la impresión de que el enemigo empleó un sistema para dirigir sus evoluciones y su tiro de un modo decisivo, como quedó confirmado por un mensaje cifrado del Almirante Cunningham, Jefe de la escuadra Británica. Inmediatamente, el gobierno de entonces concedió los fondos necesarios para realizar el programa de la construcción del radar Gufo, ya preparado en Livorno en el Instituto de Comunicaciones de la Marina, aunque en forma experimental. Naturalmente, fue demasiado tarde.

1.4. Las investigaciones en Estados Unidos de Norteamérica

La contribución más importante a la realización del radar residió en los resultados de las experiencias del radio sondeo ionosférico, llevados a cabo en Estados Unidos por los físicos Gregory Breit y Merle Tuve a partir de 1924.

Estos experimentos pretendían determinar la altura de la capa de gas ionizado que rodea la Tierra. Los diversos intentos tuvieron éxito cuando los dos físicos hicieron uso de las radio transmisiones por impulsos. Estos consistieron en medir el tiempo empleado por los impulsos en alcanzar la capa de gas y regresar a la tierra. Además, descubrieron que las capas reflejaban perfectamente las ondas de radio y la distancia en que se encontraba la capa de la Tierra (unos 110 Km.).

1.5. Los trabajos en Alemania

En Alemania, el Dr. Rudolph Kunhold, jefe de la División de Investigación de la Marina Alemana, trató de construir un aparato capaz de descubrir objetos bajo la superficie del mar a principios de los años 30. No obstante, uno de los efectos del aparato, conocido hoy como sonar, fue que reflejaba en ellos las ondas sonoras. En el transcurso de los experimentos, el investigador se dio cuenta de que lo que obtenía por debajo del agua podía obtenerse también por encima si se utilizaba ondas de radio. A partir del efecto conseguido, realizó muchas experiencias también en este campo y cuando la empresa holandesa Philips construyó una válvula capaz de generar una potencia de 70 watts en la frecuencia de 600 Mhz. –cosa realmente excepcional para aquellos tiempos– Kunhold la adaptó a su aparato.

En 1934, llevó a feliz término la construcción de un Radar en los laboratorios de investigación de la Marina Alemana en Pelsershaken. La presentación del nuevo aparato a los altos mandos de la marina alemana tuvo un gran éxito porque, además de poder descubrir un buque a una distancia de siete millas, reveló también un pequeño hidroavión que pasaba por allí en aquel momento.

1.6. La *Army Signal Corps* y el *Naval Research Laboratory* de los Estados Unidos de Norteamérica

En los Estados Unidos, los estudios y la investigación sobre el radar se realizaron de forma independiente por el *Signal Corps* del Ejército y por el *Naval Research Laboratory*. Concretamente, este último llegó a construir un prototipo de Radar de impulsos de 200 Mc/s. en 1936 y, una primera serie de aparatos de este tipo registrados con las siglas CXAM se instaló en los buques mayores de la marina norteamericana en 1941.

Por otro lado, el *Signal Corps* desarrolló, a su vez, un aparato a impulsos que al principio (1938) se empleó para guiar los proyectiles iluminantes para el tiro antiaéreo, mientras que, entre 1939 y 1940, realizó también otro aparato de gran alcance denominado SCR-270. Uno de estos estaba en funcionamiento en Pearl Harbour, en la mañana del 7 de diciembre de 1941, pero nadie dio la alarma cuando en su pantalla vio aparecer un gran número de ecos de aviones que se aproximaban.

1.7. El legendario radar de Watson Watt, artífice de la victoria de la batalla aérea por los cielos de Inglaterra

En Inglaterra, los estudios de las ondas de radio muy cortas se orientaron inicialmente hacia fines científicos como la determinación de la altura de ciertas capas conductoras de la ionosfera —conocidas como las capas de Appleton—, descubiertas por el físico inglés E. V. Appleton en 1926. Sin embargo, cuando comenzó a dibujarse la amenaza de una segunda guerra mundial en el horizonte, los ingleses se dieron cuenta de que estaban demasiado expuestos al peligro de futuras incursiones aéreas, por lo que hicieron un gran esfuerzo de hombres y medios para recuperar el tiempo perdido.

El primer resultado se obtuvo cuando el físico Robert A. Watson Watt (del que toma su nombre la unidad de medida de potencia) logró hacer visibles las señales de radio mediante el tubo de rayos catódicos de Braun y logró determinar por medio un método electro-óptico la duración de su tiempo de propagación. Algunos años después, en 1935, el propio Watson Watt realizó el primer equipo práctico para descubrir la presencia de aeroplanos.

El radar no se considera un equipo de guerra electrónica, pero es el objetivo principal de esta y el enemigo contra el que hay que combatir, ya que ha sido el foco que ha iluminado todo el escenario de la guerra electrónica hasta hoy, porque ha planteado un reto incesante por el dominio del espectro electromagnético. También, se debe considerar que se le ha proporcionado un ojo electrónico que le permite ver en la oscuridad, en la niebla, o a través de cortinas de humo. Además, puede descubrir la aproximación del enemigo a distancias mucho mayores que la que puede hacer el ojo humano, puede dirigir el tiro artillero cuando la visibilidad escasa no permite disparar y puede, finalmente, revelar la topografía de zonas que no son familiares para los que navegan por el mar o el aire.

Un radar está constituido básicamente por un transmisor, un receptor, una antena y una pantalla o indicador (su principio de funcionamiento se describirá en artículos posteriores de una manera sencilla y práctica). El funcionamiento básico es que el transmisor emite un impulso de energía electromagnética a través de la antena altamente direccional, la cual se dirige solamente en la dirección hacia la que esta apuntando la antena. Si a lo largo de su recorrido el impulso encuentra algún obstáculo, por ejemplo un avión, vuelve hacia atrás, o, mejor dicho, se refleja y vuelve hacia el receptor. El tiempo que transcurre entre la emisión del impulso y la recepción del eco se mide con un dispositivo del propio aparato y puesto que se sabe que las ondas electromagnéticas viajan a la velocidad de 300 000 km. por segundo, es fácil deducir a qué distancia se encuentra el avión. Así, el operador puede leer sobre la pantalla del radar tanto la distancia del obstáculo como la dirección en que se encuentra (demora).

1.8. Definición del radar

La palabra radar la introdujo la Marina de los Estados Unidos en 1940. Este acrónimo es la abreviación de *Radio Detection and Ranging*, el cual es un método para detectar blancos y determinar su distancia por medio de ondas de radio. En esos tiempos, estas ondas eran utilizadas para describir lo que ahora se conoce como ondas electromagnéticas. A partir de ello, se debe mencionar que la principal meta de muchos radares modernos sigue siendo la misma: detección y distancia. Sin embargo, también puede ser utilizado para medir la altura de los blancos, la velocidad, para seguir la trayectoria de un blanco o para guiar misiles.

1.9. Tipos de radar

Los radares se dividen en dos grupos:

- Radares primarios
- Radares secundarios

1.9.1 Radares primarios

Este grupo es llamado primario, ya que su función sigue siendo la misma que la de los primeros radares, o sea, detección y distancia.

Además, este se puede subdividir en dos tipos:

- Radares de Pulsos,
- Radares de Onda Continua (cw).

1.9.2 Radares de pulso

Un radar de pulso transmite energía electromagnética durante un lapso de tiempo corto y luego, por un periodo de tiempo más largo, donde no existe transmisión de energía. El segundo periodo se da por la posible recepción de algún eco. Después de ello, el ciclo se repite.

Este tipo de radares se utiliza para navegación, búsqueda de blancos y en radares de seguimiento.

1.9.3 Radares de onda continua (CW)

En este tipo de radar, el transmisor emite una señal más o menos continua. Si dentro del camino de la serie no interrumpida de ondas transmitidas se encuentra una superficie inmóvil, la frecuencia de la señal reflejada será igual a la de la señal transmitida. Por el contrario, la frecuencia del eco reflejado será distinta de la señal transmitida si la superficie está en movimiento, y la diferencia de frecuencias puede utilizarse como indicación del movimiento del blanco. En la transmisión del CW, es necesario que se produzca un movimiento que puede ser del radar o del blanco para indicar la presencia de un blanco. En algunos casos, la frecuencia de energía electromagnética es constante y, en otros, la frecuencia es modulada. Un radar de onda continua que opera a la frecuencia fija es utilizado para medir la velocidad de un blanco, mientras que los radares de frecuencia modulada son utilizados para medir alturas o en el guiado de misiles.

1.9.4 Radares secundarios

En los radares secundarios no se utilizan las reflexiones. La energía transmitida es recibida por un receptor en el blanco; en respuesta a esta, el transmisor en el blanco transmite energía que a su vez es recibida por el radar. Esta acción de pregunta y respuesta es utilizada en sistemas de IFF (*Identification Friend or Foe*), que en español significa identificación amigo o enemigo, y también por los radares de control de tráfico aéreo para identificar los aviones de línea y su correspondiente altura de vuelo.

1.10. Aplicaciones del radar

Un factor muy importante del radar es que sus unidades de aparato son completamente auto-contenidas y proporcionan un flujo de información casi instantánea acerca de los objetos situados dentro de su área de búsqueda. En pocos segundos, un radar es capaz de producir una representación múltiple de aeronaves, submarinos de superficie y objetos fijos situados a cientos de millas de distancia en pantalla. El examen completo puede hacerse con tal rapidez que un aeroplano que vuele a la velocidad del sonido y que esté ubicado a cien millas del aparato de radar solo recorrerá tres pies (0,90 cm.) desde el instante de la detección inicial hasta aquel en que se inicie el nuevo intervalo de vigilancia. De este modo, el radar puede determinar la verdadera posición del blanco en todo instante, cualquiera sea la posición del mismo. Es por esta razón que su empleo es irremplazable en la vigilancia y control del tráfico aéreo.

Un sistema de armas no solo debe localizar un objeto, sino además identificarlo, determinar su trayectoria y predecir su objetivo final con alto grado de precisión. La detección, identificación, seguimiento, computación e intercepción deben producirse antes que se desarrolle la liberación de la energía destructora del enemigo. Los aparatos de detección por radar a larga distancia se utilizan generalmente en sistemas de primer aviso, que usualmente están ubicados a cientos y hasta a miles de millas de distancia de las áreas de blanco de primera prioridad. De este modo, se da al sistema de armas tiempo para determinar la trayectoria de los proyectiles enemigos y para poner en marcha los aparatos para interceptar y aumentar la probabilidad de destrucción. Entonces, se emplean equipos de radares más sensibles a corta distancia, que permiten la más exacta determinación de las coordenadas del blanco. Hoy en día, esta tecnología ha sido completamente aplicada para usos civiles como el control y la supervisión del tráfico aéreo de aeropuertos, los radares meteorológicos de los aviones de línea y para la navegación marítima en los radares de navegación y control de tráfico marítimo.

Esta clase de radar está muchas veces ubicada a bordo de aeronaves, y se usa para guiar a los aparatos interceptores hasta las áreas de blanco, actividad de gran importancia en la lucha contra el narcotráfico. No importa si este último tipo de radar está ubicado a bordo de aeronaves o controlados desde tierra, lo que constituye un aspecto importante de la posición defensiva de una nación es que emplee en forma integrada todos los tipos de sistemas de radar que posea y esto se logra con un buen sistema integrado en base a sistemas digitales de comunicación.

RECONOCIMIENTOS

Oscar Penny Cabrera, el autor de este documento, fue alumno del Profesor Hugo Tiberio, científico italiano y sucesor de Guillermo Marconi, a quien se le cita en el presente trabajo. La RAI italiana ha hecho muchos documentales sobre los científicos italianos Marconi y Tiberio; además, hoy en día, es muy fácil afirmar que fue un error el no haberles hecho caso con su invento: el Radio Telémetro (RADAR). Luego de escuchar muchas conferencias del profesor Tiberio, como alumno del curso de Radares de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Pisa, puedo afirmar que fue un científico brillante y muy humilde; consecuentemente, poco entendido en su época. No puedo olvidar sus enseñanzas, la promesa que le hiciera de ser profesor en el Perú y de hacer conocer la figura de Guillermo Marconi. Fue por sus consejos que quedé convencido que cualquier iniciativa o hallazgo tecnológico de un alumno o docente debe ser atendido y estudiado pues podríamos tener muchos profesores Marconi o Tiberio en nuestro medio, que deben ser siempre escuchados, apoyados y alentados en la tarea científica, pues basta que uno de cien tenga un resultado válido y concreto para

que la inversión en investigación científica y tecnológica sea altamente rentable. Recibí el diploma de *Laurea* de doctor en Ingeniería Electrónica luego de discutir la tesis de *Laurea* sobre filtros digitales para radares de control automático de seguimiento de blancos aéreos con la comisión que el mismo profesor Hugo Tiberio presidió el 24 de Julio de 1976. Un alumno siempre debe estar agradecido a sus profesores y es por ello que le dedico el presente trabajo al Presidente de la Facultad de Ingeniería Electrónica de la Universidad de Pisa de aquellos años.

Al profesor ingeniero Hugo Tiberio, padre del radar italiano.