

Avance y Perspectiva

Revista de divulgación del CINVESTAV

Invisibilidad al radar: de la ficción a la realidad

Karina Galache · Tuesday, January 19th, 2021

Categorías: [Ciencias Exactas](#), [Zona Abierta](#)



La ciencia ha llegado al punto en que, sin recurrir a la magia, puede obtener la “capa de invisibilidad”, como la que aparece en muchas películas de fantasía y ciencia ficción.

Las capas de invisibilidad pueden ser una realidad y aunque sus efectos no necesariamente serán percibidos por el ojo humano como en las películas, permiten que los objetos sean invisibles ante sistemas de detección como los radares. Radar es el término derivado del acrónimo radio detection and ranging (“detección de radio y rango”) que se utiliza para un sistema de localización de blancos u objetivos en espacios aéreos, terrestres y marítimos; por ejemplo, las torres de control en los aeropuertos los utilizan para seguir aeronaves tanto en la tierra como en el aire; las agencias espaciales los requieren para rastrear satélites y desechos espaciales, y en el ámbito militar se usan para detectar vehículos enemigos, e incluso, como guía de armas.

Los sistemas de radar basan su funcionamiento en la generación y recepción de ondas electromagnéticas mediante antenas, como muestra la Figura 1, enviando dichas ondas hacia el área donde se espera encontrar algún objeto. Las ondas son reflejadas hacia el sistema de detección al chocar con el objeto, permitiendo obtener información como el tamaño, ubicación, distancia e incluso la velocidad del blanco u objetivo. A partir de su introducción en la Segunda Guerra Mundial, los sistemas de radar marcaron un antes y un después en la defensa y monitoreo territorial.



Figura 1. Principio de funcionamiento del radar y fotografía de una antena de radar.

Los radares se pueden clasificar en función de su aplicación, es decir, se utilizan para detección, monitoreo del clima, cartografía, entre otros; o bien, como identificación de las frecuencias con las que operan, como en la Figura 2, donde se muestran diferentes tipos de radar de acuerdo con su frecuencia de funcionamiento, la cual puede ir desde los 30 MHz hasta los 110 GHz o superiores.



Figura 2. Ejemplos de radares de acuerdo con sus frecuencias de trabajo [1].

A partir de la creación de los sistemas de radar y conforme a que su sofisticación e implementación

ha aumentado, surgió la necesidad del desarrollo de tecnología de baja detectabilidad, llamada en inglés tecnología Stealth, que permitiera que aviones, barcos, misiles o algún otro objeto no fueran detectado por los sistemas de radar. En otras palabras, hacerlos “invisibles” a un radar, como se esquematiza en la Figura 3.



Figura 3. Ejemplos de baja detectabilidad o invisibilidad ante radar.

Para lograr este objetivo existen diferentes mecanismos que pueden implementarse, entre los cuales destacan:

- Diseño y forma: el blanco u objetivo se diseña para que su forma no refleje las señales de radar de vuelta al sistema de detección.
- Materiales absorbentes de radiación: implica cubrir el objetivo con materiales que absorban las señales de radio y eviten que sean reflejadas hacia el sistema de detección.

Diseño y forma del objetivo



Figura 4. Mecanismo de diseño y forma del objetivo y avión F-117A en vuelo sobre base de la Fuerza Aérea Nellis, en Nevada, USA. [2]

En el ámbito de la aeronáutica, los vehículos convencionales suelen tener una forma redondeada que los hace más aerodinámicos, pero ocasiona que se formen superficies capaces de reflejar las ondas de radio hacia el sistema de detección sin importar de dónde provengan. Para desviar las ondas de radas incidentes y reflejarlas lejos del sistema de detección, se modifica la forma del blanco tratando de obtener superficies planas y con bordes afilados, como en el avión de ataque furtivo estadounidense F-117, que se muestra en la Figura 4. El diseño de este avión hace que las ondas incidentes reboten en cualquier dirección distinta a la de donde provienen, logrando así que el sistema de detección no reciba las ondas reflejadas y el avión sea prácticamente invisible al radar.

Ventajas y desventajas

La modificación del diseño y forma de un blanco u objeto como mecanismo de tecnología Stealth conlleva pros y contras al momento de su implementación. Entre las ventajas se encuentran:

1. Implementación sencilla en objetos que no han sido construidos y cuyo diseño puede modificarse.
2. Disminuye la necesidad de múltiples mecanismos de tecnología Stealth en objetos simples.

Por otro lado, su mayor desventaja es que su aplicación en objetos construidos previamente o que se encuentran en proceso de producción es una tarea complicada y sumamente costosa, ya que los objetos fueron diseñados y están optimizados con características específicas que les permiten cumplir con su misión, además de estar limitados a ser efectivo solo con radares de baja frecuencia.



Materiales absorbentes de radiación

La modificación de diseño y forma del blanco u objeto, proporciona una reducción de la detectabilidad por parte de un radar, sin embargo, dependiendo de la complejidad de la forma del elemento puede ser necesario utilizar otro mecanismo para reducirla aún más. Con este fin, desde la década de 1930, poco después del uso del radar en el ámbito militar, se han estudiado y desarrollado materiales para absorber las ondas de radar y, por lo tanto, reducir o eliminar por completo las ondas reflejadas al sistema de detección. A estos materiales se les conoce como materiales absorbentes de radar (Radar Absorbing Materials, RAMs en inglés). Se trata de materiales utilizados en aviones considerados como furtivos, es decir, imperceptibles para los radares, como el F-117 y el B-2 Spirit de la Fuerza Aérea de Estados Unidos, así como navíos semejantes a la fragata Surcouf de la Armada de Francia, que se muestran en la figura de arriba. Estos materiales pueden presentarse como paneles, pinturas, resinas, entre otros.

Como se dijo, la función principal de los RAMs es disminuir o eliminar las ondas que son reflejadas hacia el sistema de detección. Esto se logra mediante la absorción de la energía de las ondas incidentes y su conversión en otro tipo de energía, en específico, en calor.

Los fenómenos mediante los cuales los materiales absorbentes de radar disminuyen o eliminan la energía de las ondas son:

1. Efecto Joule. Es un fenómeno en el cual la energía de una señal eléctrica se transforma en calor debido a las colisiones entre los electrones en movimiento y los átomos del material, como se representa en la figura de abajo. Para el caso de los RAMs, las ondas de radar, que son un conjunto de ondas eléctricas y magnéticas perpendiculares entre sí que oscilan y se propagan en el espacio, la pérdida de energía debida por el efecto Joule reduce la magnitud de las ondas reflejadas que viajan de regreso al sistema de detección. En este aspecto los RAMs tienen un comportamiento similar al de una resistencia que se calienta cuando una corriente circula a través de ella.



2. Rotación magnética. Muchos RAMs presentan en su estructura secciones alineadas en múltiples direcciones denominadas como “dominios magnéticos”, los cuales pueden ser afectados por la energía de las ondas de radar, ya que al incidir sobre el material ocasionan que los dominios se alineen en la misma dirección de las ondas incidentes, como se muestra en la Figura 7. La energía requerida para rotar y alinear los dominios magnéticos es proporcionada por las ondas de radar y, por lo tanto, su magnitud disminuye y en conjunto con el efecto Joule logran que las ondas se atenúen lo suficiente como para no llegar al sistema de detección.



Figura 7. a) Dominios magnéticos desalineados, b) dominios magnéticos alineados.

Ventajas y desventajas de los RAMs

A diferencia del mecanismo de diseño y forma, los RAMs pueden aplicarse sobre objetos diseñados y construidos anteriormente, además sobre objetos con formas complejas con múltiples bordes y ángulos. Por otro lado, utilizar este mecanismo de tecnología de baja detectabilidad presenta las siguientes desventajas: 1) requiere una aplicación precisa y uniforme sobre la

superficie del objeto, lo cual puede ser una tarea complicada y costosa, 2) se añade peso no deseado al objeto, ocasionando que su desempeño se vea comprometido, 3) al requerir materiales que puedan conducir electricidad y presenten propiedades magnéticas (generalmente metales y aleaciones), es posible que presenten problemas por corrosión.

Las investigaciones basadas en materiales absorbentes de radar se centran en desarrollar RAMs con la capacidad de absorber y eliminar las ondas en cuestión, pero sin las desventajas antes mencionadas, es decir, se busca obtener materiales ligeros, que puedan conducir la electricidad, presenten propiedades magnéticas y sean menos susceptibles a la corrosión, por lo que constantemente se han buscado nuevos componentes para su potencial aplicación como RAMs [5]. Algunos de ellos son:



- **Metales y aleaciones**

Metales como el níquel, aluminio, cobre y hierro se han utilizado en el desarrollo de materiales absorbentes de radiación debido a sus múltiples propiedades. El hierro y sus derivados como la ferrita, magnetita y el hierro carbonilo que se muestran en la figura a la izquierda, presentan altas propiedades magnéticas, que además son potenciables sustituyendo parte del hierro por algún otro átomo como cobalto o níquel; sin embargo, su alta densidad, peso, baja flexibilidad y dificultad de procesamiento limitan su aplicación como materiales absorbentes de radar.



- **Polímeros conductores**

En contraste con los metales, los polímeros conductores presentan propiedades destacables como baja densidad, síntesis práctica, flexibilidad y conductividad eléctrica sintonizable. Algunos polímeros conductores son el polipirrol, el politiofeno, el fluoruro de polivinilideno y la polianilina, indicados en la figura contigua.

La polianilina, en comparación con otros polímeros conductores, presenta propiedades mecánicas superiores, alta estabilidad térmica, además de conductividad eléctrica y magnética, características necesarias para RAMs efectivos, además que suelen procesarse en combinación con otros materiales como Fe, Ni, para potenciar sus propiedades magnéticas y con algunos que mejoran sus propiedades eléctricas. Sin embargo, estos materiales combinados presentan la desventaja de solo ser efectivos como RAMs en un intervalo estrecho de frecuencias, por lo que para solventar este problema se han utilizado combinaciones de polímeros con materiales base carbono tales como el grafeno, nanotubos de carbono y óxido de grafeno reducido.

- **Materiales base carbono**

Los materiales base carbono o materiales carbonosos presentan características únicas como baja densidad, conductividad eléctrica, estabilidad térmica y mecánica, elevada área superficial, ligereza y flexibilidad. Entre ellos podemos encontrar materiales como los nanotubos de carbono (NTC's) y el grafeno que se muestran en la Figura 10, y también óxido de grafeno (GO) y óxido de grafeno reducido (rGO) que son derivados del grafeno. El rGO destaca sobre los demás debido a su flexibilidad, bajo peso y elevada conductividad térmica y eléctrica, pero a menor costo que el grafeno. Sin embargo, debido a sus bajas propiedades magnéticas se ha estudiado su combinación

con partículas metálicas y polímeros conductores presentando resultados sobresalientes como materiales absorbedores de radar.



Figura 10. Materiales base carbono, a) Nanotubo de carbono, b) Grafeno [6].

- [Compósitos y su interés para la Armada de México](#)

Los compósitos son mezclas de materiales en los cuales se potencian de manera sinérgica las propiedades de sus componentes individuales. En el terreno militar y en específico para la Armada de México, el estudio de los materiales compuestos es de suma importancia para su aplicación en los diferentes sistemas del ámbito naval, empleados para desarrollar las tareas de vigilancia del mar territorial y apoyo a la población civil en caso de desastres. Entre las aplicaciones de interés se encuentran el estudio de compósitos para la generación o disipación de calor y obtener con ello aislantes térmicos para los sistemas de propulsión de unidades de superficie; recubrimientos compósitos para evitar la corrosión de los metales en ambientes marinos; generación de sensores corporales integrados en prendas de vestir o sensores acústicos para la detección del fondo marino; materiales conductores de descargas eléctricas; y la obtención de compósitos para RAMs, que permitan aislar o reflejar las ondas electromagnéticas en el rango de frecuencias de 1 a 24 GHz.

- [Compósitos rGO/polímeros conductores/metales](#)

En el ámbito de los RAM, diversos grupos han desarrollado compósitos formados por metales, polímeros conductores y materiales base carbono para reducir la densidad del material, mejorar la eficiencia de absorción y aumentar el rango de frecuencias de radar a las cuales absorbe el material. Para considerar que un material absorbente de radar es efectivo es necesario que presente una atenuación de la radiación incidente de por lo menos 90% [7]. Por ejemplo, se reportó el estudio de un compósito Ni/rGO/epoxi [8] que se preparó sobre un sustrato a diferentes espesores. Se observó que en el intervalo de frecuencias de 1 a 18 GHz la muestra de 4.9 mm de espesor presentó una atenuación máxima de 99.92% a una frecuencia de 4.4 GHz. En otro estudio, un compósito FCI/rGO/epoxi [9] preparado con varios espesores, se evaluó en el mismo rango de frecuencias y se observó que con un espesor de 2 mm se obtuvo una atenuación máxima de 99.91% a 11 GHz. Como se observa en las Figuras 11 y 12 que resumen estos estudios, ambos compósitos se pueden considerar efectivos como RAMs, sin embargo, se observa que son efectivos solo a frecuencias específicas, con bandas estrechas de atenuación, y que en el resto de frecuencia las atenuaciones no cumplen con el porcentaje mínimo requerido.



Figura 11. Gráfico de atenuación vs frecuencia del compósito Ni/rGO/epoxi a diferentes espesores (adaptado de la referencia [7]).



Figura 12 Gráfico de atenuación vs frecuencia, del compósito FCI/rGO/epoxi a diversos espesores (adaptado de la referencia [8]).

Uno de los retos a superar al fabricar RAMs es la obtención de compósitos que presenten atenuación de radiación en intervalos amplios de frecuencia, es decir, materiales que muestren una atenuación mínima de 90% sin tener los espacios de baja o nula atenuación que se observaron en las Figuras 11 y 12 para los compósitos reportados en la literatura, cubriendo la mayor cantidad de frecuencias posibles manteniendo las propiedades de ligereza y flexibilidad.

Perspectivas

En el grupo de investigación de Materiales y Tecnologías para Energía, Salud y Medio Ambiente (GESMAT) del CICATA Altamira, perteneciente al Instituto Politécnico Nacional, se desarrolla, en conjunto con el Instituto de Investigación y Desarrollo Tecnológico de la Armada de México (INIDETAM), institución que tiene la misión de estudiar e integrar proyectos de I + D con el fin de apoyar las operaciones de las Fuerzas, Unidades y Establecimientos Navales [10], un proyecto de investigación enfocado en materiales compósitos basados en grafeno/partículas magnéticas/polímeros conductores y su evaluación como materiales absorbedores de radar en aplicaciones militares de detección. El proyecto, que contempla la participación de químicos en materiales, expertos en telecomunicaciones, antenas, electrónica y mecatrónica tanto civiles como militares, así como la colaboración de diversas instituciones nacionales, permitirá la obtención de nuevos conocimientos y el desarrollo de tecnología de baja detectabilidad. Durante el desarrollo de este proyecto, los materiales y los compósitos preparados se evaluarán en el intervalo de 1 a 24 GHz; se estudiarán diferentes arquitecturas de los recubrimientos para cubrir un intervalo amplio de frecuencias. Además de las pruebas de laboratorio, el proyecto contempla evaluar los materiales en un entorno real de operación, para lo cual se aplicarán los recubrimientos en objetos y/o dispositivos utilizados en las operaciones de la Armada de México.



Este proyecto brindará la oportunidad de incursionar en el ámbito nacional en la investigación, desarrollo e implementación de materiales de baja detectabilidad con potenciales aplicaciones en el terreno militar, que puedan llevar a la obtención de mejores “capas de invisibilidad” sobre las que mucha tinta ha corrido y que tanta imaginación ha despertado en la Humanidad.

Referencias

- [1] Christian Wolff. (2009) Algunos radares y su banda de frecuencias. [Online]. <https://www.radartutorial.eu/07.waves/pic/radars.jpg>
- [2] Staff Sgt. Aaron Allmon II. (2002, Agosto) F-117 Nighthawk Front. [Online]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:F-117_Nighthawk_Front.jpg
- [3] Staff Sgt. Bennie J. Davis III. (2006, Mayo) B-2 Spirit original. [Online]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:B-2_Spirit_original.jpg
- [4] Franck Dubey. (2004, Abril) Barco furtivo. [Online]. https://es.wikipedia.org/wiki/Barco_furtivo#/media/Archivo:FS_Surcouf.jpg
- [5] Vinneta Shukla, “Review on the Electromagnetic Interference Shielding Materials fabricated by Iron Ingredients,” *Nanoscale Advances*, pp. 1-34, 2019.
- [6] Alexander AlUS. (2010, Agosto) Grafeno. [Online]. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Graphen.jpg>
- [7] C. G. Jayalakshmi, A. Inamdar, A. Anand, and B. Kandasubramanian, “Polymer matrix composites as broadband radar absorbing structures for stealth aircrafts,” *J. Appl. Polym. Sci*, 2019.
- [8] Chih-Chia Chen, Wen-Fan Liang, Yu-Hsun Nien, Hsien-Kuang Liu, and Ruey-Bin Yang, “Microwave absorbing properties of flake-shaped carbonyl iron/reduced graphene oxide/epoxy composites,” *Materials Research Bulletin*, pp. 81-85, 2017.
- [9] Bin Zhang et al., “High-performance microwave absorption epoxy composites filled with hollow

nickel nanoparticles modified graphene via chemical etching method,” *Composites Science and Technology*, pp. 54-63, 2019.

[10] Secretaria de Marina Armada de México. Instituto de Investigación y Desarrollo Tecnológico de la Armada de México. [Online]. <http://www.semar.gob.mx/INIDETAM/index.html>

This entry was posted on Tuesday, January 19th, 2021 at 4:15 pm and is filed under [Ciencias Exactas](#), [Zona Abierta](#)

You can follow any responses to this entry through the [Comments \(RSS\)](#) feed. Both comments and pings are currently closed.