Diseño, simulación y medidas de un UCAV de baja observabilidad

Ruiz Carrasco, José Raimundo[1], Guzmán Fernández-Fígares, Javier[1], Rodríguez Amor, José Roberto[1] Plaza Gallardo, Borja[1] y Poyatos Martínez, David[1]

[1] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), Área de Radiofrecuencia. Carretera de Ajalvir, km 4,5, 28850, Torrejón de Ardoz, Madrid. Correo electrónico: poyatosmd@inta.es

Resumen

El presente artículo expone el trabajo realizado por el INTA en el Task Group NATO/STO/SET-252 cuyo fin es diseñar y fabricar un modelo de validación de un UCAV (vehículo aéreo de combate no tripulado) representativo en términos de complejidad geométrica teniendo en cuenta el uso de materiales para la reducción de los principales mecanismos de dispersión electromagnética. La computación electromagnética (CEM) es una herramienta de ingeniería crucial en el proceso de diseño general y se utiliza para identificar los centros de dispersión, para evaluar el efecto de los recubrimientos o distorsiones como la rugosidad de la superficie y, finalmente, para determinar la firma de radar del modelo. Con respecto al creciente número de vehículos autónomos no tripulados, los resultados no solo son relevantes para el ámbito militar, sino también son valiosos para el control del tráfico aéreo civil y la vigilancia aérea.

1. Introducción

Una de las preocupaciones fundamentales de la defensa aérea actual es el rápido desarrollo de los vehículos aéreos de combate no tripulados (UCAV). El uso de estos vehículos aéreos ha aumentado drásticamente y la necesidad de estimar adecuadamente su firma de radar se ha vuelto cada vez más evidente. La caracterización electromagnética de plataformas aéreas es un problema desafiante en la ingeniería militar, debido a la complejidad geométrica de los blancos reales, la presencia de materiales transparentes y absorbentes y el gran tamaño eléctrico de las plataformas. El objetivo de dicho análisis abarca desde el desarrollo de una aeronave de baja observabilidad hasta información de dispersión más general, que es utilizada para los sistemas de detección, clasificación e identificación de plataformas aéreas y de guerra electrónica.

La caracterización se puede obtener tanto por medidas como por cálculos o simulaciones, los cuales tienen sus ventajas y desventajas. La validación de estos resultados computacionales es de suma importancia, especialmente para blancos complejos.

Por tanto, el objetivo del grupo NATO/STO/SET-252 es diseñar y fabricar un modelo de validación de sección transversal radar (RCS) representativo de un blanco complejo: un UCAV de baja observabilidad. En estos términos, cada detalle es relevante y la RCS calculada dependerá en gran medida de los modelos, métodos y mallas utilizados en las simulaciones.

El punto de partida del diseño es el modelo Muldicon desarrollado por el panel NATO/STO/AVT, como un ejercicio sobre el papel para el diseño multidisciplinar (se consideraron las propiedades aerodinámicas y estructurales). La figura 1 presenta tanto la geometría exterior de la aeronave como la entrada y la salida de aire. En el diseño geométrico se tuvo en cuenta la baja observabilidad, incluyendo por ejemplo una entrada de aire oculta, pero aún así hay fenómenos de reflectividad que requieren el empleo de materiales absorbentes al radar (RAM), como por ejemplo en el borde de ataque y en la entrada de aire del motor.

Este documento abordará algunos de los temas en el proceso de diseño, con énfasis en cómo las simulaciones apoyan este proceso. El esquema del documento es el siguiente: el proceso de fabricación se evalúa y valida experimentalmente en la sección 2; la sección 3 contiene el diseño de la plataforma y los resultados computacionales del modelo final; por último, la sección 4 describe las medidas que se van a realizar sobre el modelo fabricado.

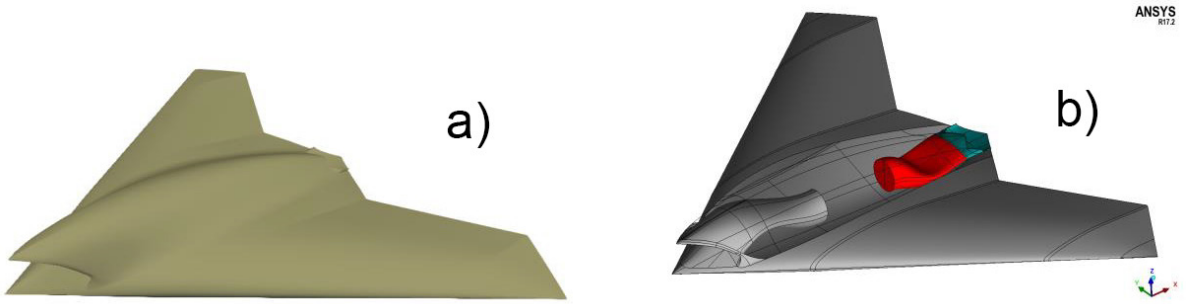


Figura 1. Geometría del UAV Muldicon. a) Molde externo. b) Entrada y salida de aire

2. Evaluación del proceso de fabricación

El modelo Muldicon se fabricará mediante impresión 3D. Este proceso no dará como resultado una superficie lisa, ya que el filamento se aplica en capas. Para evaluar el efecto de la rugosidad de la superficie en la firma radar, se fabrican cuatro cono-esferas 3D diferentes con diferentes acabados y conductividad, además de una cono-esfera de aluminio como referencia. Las dimensiones se definen en la figura 2.

Definición del modelo

La fabricación se ha realizado mediante el método fabricación de filamentos fusionados (FFF) en la Agencia Sueca de Investigación para la Defensa (FOI). En este método, el diámetro de la boquilla determina el tiempo que lleva imprimir el objeto y el grosor de la capa. A mayor diámetro, menor tiempo de fabricación, pero mayor grosor de la capa y también mayor rugosidad de la superficie, lo que puede afectar la dispersión de las ondas electromagnéticas o aumentar el trabajo manual necesario posteriormente. Por lo tanto, el tiempo de impresión y la tolerancia a la rugosidad de la superficie deben equilibrarse.

Las cono-esferas se imprimen en dos secciones (ver figura 3) para evitar el soporte de impresión. Las secciones tienen un pequeño orificio central donde se coloca una clavija para alinear la sección de cono y esfera durante el montaje. Esta clavija también aumenta la unión entre las partes cuando se pegan.

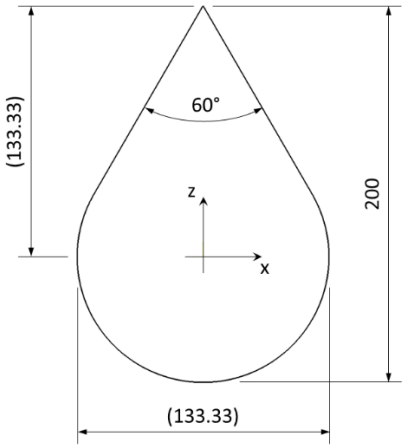


Figura 2. Dimensiones en milímetros

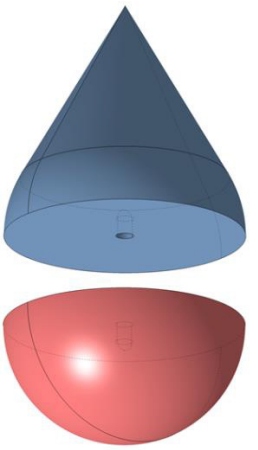


Figura 3. Secciones

Para dar a las cono-esferas una superficie conductora eléctrica perfecta (PEC), los modelos se pintan con *spray* con varias capas de pintura a base de cobre (Kontakt Chemie EMI 35). Las superficies solo se limpian y desengrasan antes de pintar para mantener las imperfecciones superficiales resultantes del proceso de impresión. Los cinco modelos son:

- Cono-esfera A: tamaño de boquilla 0,4 mm, altura de capa 0,2 mm. Filamento PLA estándar (PrimaCreator EasyPrint PLA). Piezas pegadas entre sí y luego recubiertas con PEC, lo que da un cono-esfera «sin costuras».
- Cono-esfera B: tamaño de boquilla 0,8 mm, altura de capa 0,4 mm. Filamento PLA estándar (PrimaCreator EasyPrint PLA). Piezas pegadas entre sí y luego recubiertas con PEC, lo que da un cono-esfera «sin costuras».
- Cono-esfera C: tamaño de boquilla 0,4 mm, altura de capa 0,2 mm. Filamento PLA estándar (PrimaCreator EasyPrint PLA). Las piezas primero se recubrieron con PEC y luego se pegaron para simular la unión del ala y el fuselaje.
- Cono-esfera D: tamaño de boquilla 0,4 mm, altura de capa 0,2 mm. Filamento PETG conductor eléctrico (resistividad 106-109 Ohm-cm). Piezas unidas con un tornillo metálico central.
- Cono-esfera E: totalmente metálica.

Las cono-esferas A y B se diseñaron para investigar el efecto de la rugosidad de la superficie debido a la altura de la capa. Las figuras 4 y 5 muestran un primer plano de las superficies después de recubrirlas con pintura de cobre conductora. No se hizo otro tratamiento que pintar las superficies. La cono-esfera C fue diseñada para investigar si hay algún efecto en la RCS debido a una unión no perfecta entre dos superficies PEC, en este caso, en la unión entre el ala y el fuselaje central. Para simular este tipo de unión, la sección esférica y cónica de la cono-esfera se recubrieron con pintura de cobre por separado (incluida la superficie de unión) y luego se pegaron entre sí.

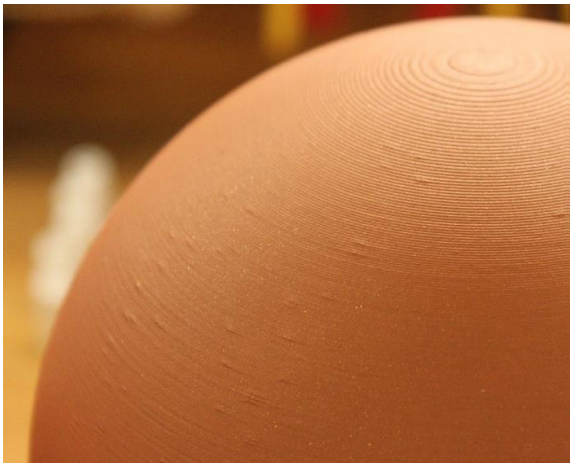


Figura 4. Cono-esfera A



Figura 5. Cono-esfera B

Las medidas de RCS se realizaron en el campo compacto (CATR) del INTA a 10 GHz (frecuencia escalada de Muldicon) y para barridos angulares desde la punta a la parte posterior (ángulo polar $0° < \theta < 180°$).

Simulaciones

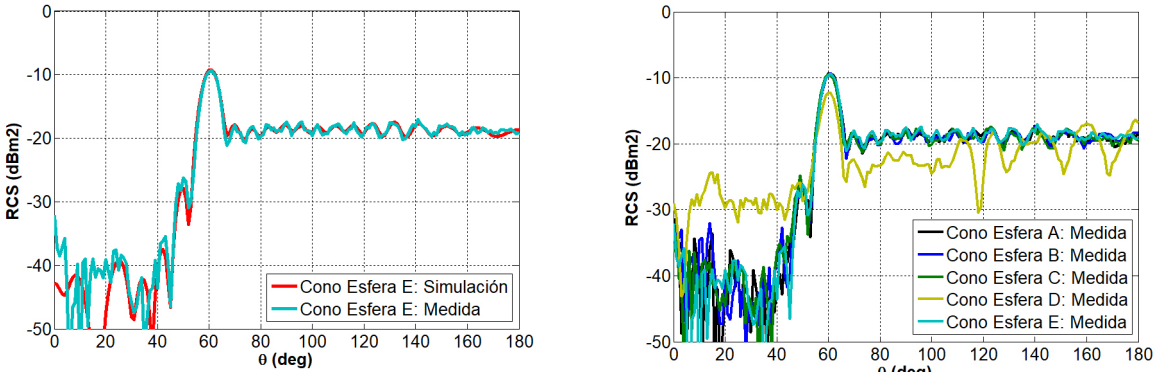
Con el fin de comparar las medidas realizadas, también se simularon las diferentes cono-esferas:

- Simulación de referencia para cono-esferas A, B y C: El modelo de simulación está compuesto por un núcleo dieléctrico (teflón) con una capa metálica de conductividad finita ($\sigma = 40\,000$ S/m) que cubre la superficie exterior. En las simulaciones, la superficie de los modelos es suave, no se modela ninguna rugosidad de la superficie del proceso de impresión 3D. Además, la articulación de la cono-esfera C no está modelada: el modelo es continuo.
- Simulación de referencia para cono-esfera E: geometría PEC.

Comparación y evaluación

En esta sección se mostrarán los resultados para la polarización vertical. Los resultados para la polarización horizontal son similares.

En la figura 6a se comparan los resultados de la medida y la simulación de RCS para la cono-esfera PEC. La concordancia es muy buena, excepto cerca de la punta ($\theta = 0$) lo que proporciona confianza en la configuración de la medida. Las medidas a 10 GHz para polarización vertical se muestran en la figura 6b. El objetivo es ver si las diferentes técnicas de fabricación tienen efectos significativos y si las diferentes muestras tienen una firma comparable a la muestra metálica.



Figuras 6. Comparación medidas-simulación 10 GHz PV. a) Comparación medida-simulación Cono-esfera PEC b) Comparación de medidas

Se pueden ver diferencias insignificantes entre la muestra A (tamaño de la boquilla 0,4 mm) y la muestra B (tamaño de la boquilla 0,8 mm), excepto en la punta ($\theta = 0$). Se puede concluir que la reducción en el tamaño de la boquilla solo es relevante para detalles geométricos muy pequeños y nítidos. Por tanto, no se espera encontrar ningún efecto en el Muldicon fabricado debido al tamaño de la boquilla.

Al estudiar la muestra B (tamaño de la boquilla 0,8 mm, altura de la capa 0,4 mm) en detalle y compararla con la muestra metálica E, nuevamente solo la punta del cono-esfera muestra una RCS más alta. Por lo tanto, la altura de la capa no causará ningún efecto relevante en el Muldicon fabricado.

Hay diferencias insignificantes entre la muestra A (piezas pegadas entre sí y luego pintadas) y la muestra C (piezas primero pintadas y luego pegadas). La pintura PEC parece funcionar bien en ambos casos. Se puede concluir que no se espera ningún efecto en la RCS debido a la unión entre las secciones del ala y el cuerpo cuando se fabrican por separado y se unen después según lo planeado.

Finalmente, la muestra D (material PETG) muestra una menor RCS debido a la baja conductividad del material del que está fabricado. Por lo tanto, este material no es una alternativa para fines de fabricación.

3. Simulación sobre modelo Muldicon

El modelo Muldicon tiene una envergadura de unos 15 m. El modelo medido será de 3 m de envergadura a escala 1:5, y se medirá a la frecuencia central de 10 GHz. Por lo tanto, la frecuencia sin escalar (modelo tamaño real) es de 2 GHz, típico de los radares de alerta temprana. Dado que el modelo se medirá en varias instalaciones, es necesario dividirlo para facilitar su transporte. El modelo consta de tres partes separables: dos alas y una sección media. La sección media está impresa en 3D y las alas están moldeadas a partir de espuma. Se aplica una pintura de níquel a todo el avión para garantizar una superficie PEC. El material RAM se aplica a ciertas partes de la aeronave para reducir la firma radar.

La figura 7 muestra un primer plano del modelo. Las áreas verde y azul se tratan con material RAM de banda estrecha mientras que las áreas naranja, morada y gris son PEC.

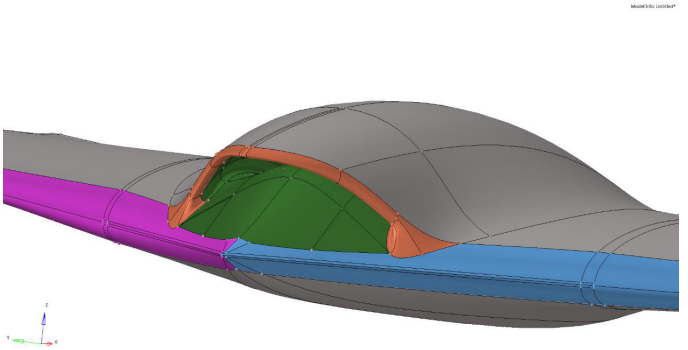


Figura 7. Modelo computacional del Muldicon tratado

EL INTA dispone de distintas herramientas de simulación electromagnética (CEM). En concreto, esta simulación se ha realizado con el *software* de ALTAIR FEKO con condiciones de contorno IBC y utilizando «solvers» de ecuaciones integrales con aceleración MLFMM.

Los resultados de la simulación en la elevación 0° se muestran en la figura 8. Como se observa, la diferencia entre ángulos de barrido del ala izquierda (sin tratamiento RAM) y del ala derecha (con tratamiento RAM) muestran que el tratamiento reduce la RCS en 20 dB alrededor de $\phi = 53°$. Además, y lo que es más importante, la RCS del morro se reduce significativamente, incluso sin tratamiento del borde de entrada a la cavidad, logrando niveles de RCS por debajo de -30 dBm^2. Con estos resultados se decide fabricar el modelo de validación.

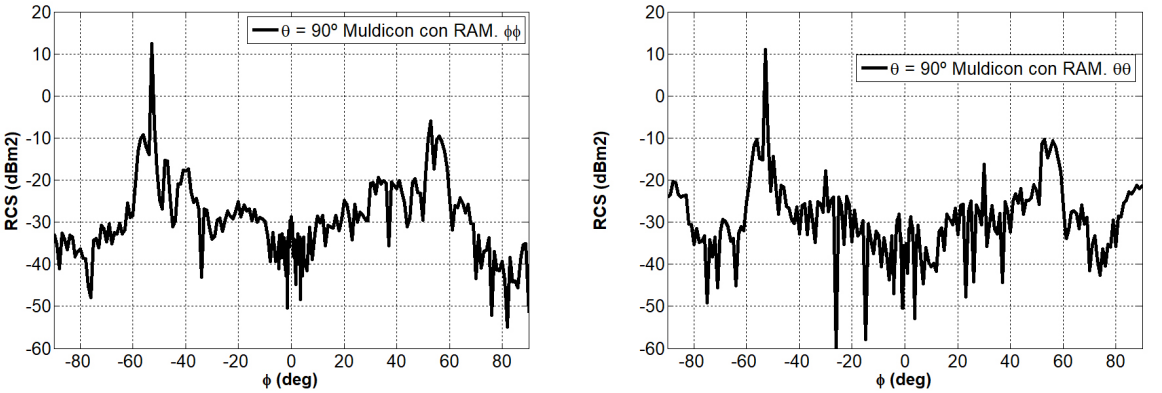


Figura 8. Resultados a elevación 0°. RCS en dBm2. Arriba: polarización horizontal; abajo: polarización vertical

4. Medida del modelo Muldicon

Se prevé realizar las medidas del modelo Muldicon en el CATR del INTA durante 2024. El CATR es un sistema completo de ensayos para medida de antenas y RCS. Consiste en un sistema de medida de un solo reflector, instalado dentro de una cámara anecoica apantallada de 30,5 x 18 x 13 m. El reflector produce un frente de onda plano en una zona quieta emulando las condiciones de campo lejano. La zona quieta es un cilindro elíptico de 5,5 x 5 x 6 m y se puede usar en un rango de frecuencia de 1 a 110 GHz cuando se utiliza con las fuentes de RF y los componentes apropiados. Además, se puede operar como área de sala blanca clase ISO 8.

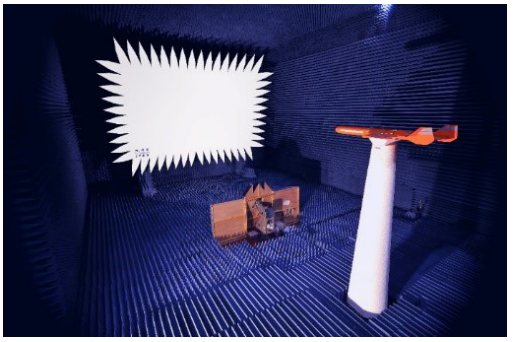


Figura 9. Campo compacto del INTA durante medida de RCS

5. Conclusiones

En este artículo se han presentado los diferentes puntos a tener en cuenta en el diseño de un modelo de vehículo aéreo no tripulado de baja observabilidad. El diseño de plataformas de baja observabilidad requiere potentes herramientas de simulación electromagnética, instalaciones de caracterización de nuevos materiales absorbentes y transparentes, y de medida de RCS con niveles muy bajos de señal, y precisa una metodología de diseño compleja y un ajuste y calibración exigentes de instalaciones y equipos de medida. Sin cambiar la aerodinámica de la plataforma, se ha reducido la RCS utilizando material RAM de banda estrecha y se presentan los resultados de la simulación de RCS del modelo Muldicom. Se ha evaluado y validado la fabricación mediante impresión 3D con la ayuda de un modelo de medida en el que se ha comparado simulación y medidas de RCS realizadas en la instalación de campo compacto, y como trabajo futuro, se va a medir el modelo fabricado y se van a comparar y validar los resultados de las herramientas de simulación con datos experimentales.

Referencias

Altair Feko [en línea]. (s. f.). [Consulta: 2025]. Disponible en: https://www.altair.com/feko.

Du, W. *et al.* (2019). A Quantitative Analysis of Electromagnetic Simulation Model Credibility. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. Vol. 18, n.º 1, pp. 34-38. Doi: 10.1109/LAWP.2018.2879799.

Hess Introduction to RCS measurements. Loughborough Antennas and Propagation Conference. (2008). Loughborough, UK, pp. 37-44, Doi: 10.1109/LAPC.2008.4516860.

IEEE Recommended Practice for Radar Cross-Section Test Procedures. (2020). IEEE Std 1502-2020. Revision of IEEE Std 1502-2007. 29 Dec., pp. 1-78. Doi: 10.1109/IEEESTD.2020.9310748.

Kontakt Chemie. [en línea]. [Consulta: 2025]. Disponible en: http://www.kontaktchemie.com/KOC/KOCproductdetailV2.csp? product=EMI%2035

Nangia, R. *et al.* (2019). Aerodynamic design assessment and comparisons of the MULDICON UCAV concept. *Aerospace Science and Technology.* Vol. 93, 105321. ISSN 1270-9638. [Consulta: 2025]. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.ast.2019.105321.

Ngo, T. *et al*. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*. Vol. 143, pp. 172-196. ISSN 1359-8368. [Consulta: 2025]. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012

North 3D Filament [en línea]. [Consulta: 2025]. Disponible en: https://addnorth.com/product/ESD%20PETG/ESD%20PETG%20-%201.75mm%20-%20750g%20-%20Black

Poyatos, D. *et al.* (2009). RCS Analysis of a Configurable Mock-Up Cavity With Blade Motion Capability. *IEEE Transactions on Magnetics*. Vol. 45, n.º 3, pp. 1096-1099. Doi: 10.1109/TMAG.2009.2012631.

Rodríguez J. R. *et al*. (2020). Poyatos Medidas singulares de antenas en equipos y sistemas aeroespaciales. *VIII Congreso Nacional de i+d en Defensa y Seguridad 2020 (DESEI+d).*

Surre, F. (2004). Introduction to RF Stealth. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. Vol. 46, n.º 6, pp. 106-107.

S&T Organization NATO SET-252. (2018). *Development of a validation model of a stealth UCAV.* [Consulta: 2025]. Disponible en: https://www.sto.nato.int/Lists/test1/activitydetails.aspx?ID=16327.

Woo, A. *et al.* (1993). EM programmer's notebook-benchmark radar targets for the validation of computational electromagnetics programs. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. Vol. 35, n.º 1, pp. 84-89. Doi: 10.1109/74.210840.