

JUAN M. RIUS.

CommSensLab, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).

**HAN CONTRIBUIDO:** R. Boix, F. Cátedra, J. Córcoles, L.E. García-Castillo, B. Gimeno, F. Medina, F. Quesada, J. Rubio, A. Rubio, J.M. Taboada, y F. Vico.

**INSTITUCIONES:** Grupo de RF del Instituto de Física Corpuscular, CSIC-Universitat de València (IFIC); Grupo de Electromagnetismo Computacional de la Universidad de Alcalá (UAH); Grupo de Radiofrecuencia, Electromagnetismo, Microondas y Antenas de la Universidad Carlos III de Madrid (UC3M); Grupo de Electromagnetismo de Granada (UGR); Grupo de Electromagnetismo Computacional Aplicado a Antenas y Microondas de la Universidad de Extremadura (UEX); Grupo de Electromagnetismo Aplicado a las Telecomunicaciones de la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT); Grupo de Electromagnetismo Aplicado de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM); Laboratorio de Antenas y Propagación de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV); Grupo de Microondas de la Universidad de Sevilla (US); EM3WORKS de la Universidad de Vigo y la Universidad de Extremadura (UVIGO-UEX).

## Electromagnetismo computacional en la universidad española

Desde sus inicios hace 40 años se lleva desarrollando en España una intensa actividad en el campo del electromagnetismo computacional. Varios grupos punteros a nivel internacional han creado nuevos métodos y algoritmos, con una importante transferencia de tecnología a empresas líderes, así como desarrollo de software comercial. En este artículo se introducen las principales aplicaciones de esta actividad en temas relacionados con las comunicaciones (antenas, microondas y radar) y los problemas multi-físicos.

Después de los primeros trabajos en este campo publicados por Rafael Gómez Martín (UGR) y por Felipe Cátedra (actualmente en la UAH) a principios de los años 80, seguidos en esta misma década por los de Jesús Rebolgar, Juan Zapata y José Antonio Encinar (UPM), la actividad se disparó en 1989 con un proyecto de la Dirección General de Telecomunicaciones coordinado por la empresa Construcciones Aeronáuticas (CASA) que financió el desarrollo de

métodos numéricos para la predicción y optimización de Sección Recta Radar (RCS, una medida del eco que devuelve un avión a las ondas del radar, es decir de la detectabilidad del avión). La actividad iniciada en este proyecto ha continuado hasta la actualidad en los grupos de las universidades UAH, UGR, UPV, UVIGO-UEX y UPC (se pueden consultar todas las siglas en el cuadro que se publica con las instituciones que se mencionan en el artículo).

**El equipo de UVIGO-UEX ha sido galardonado con varios premios internacionales por la aplicación de técnicas de supercomputación en electromagnetismo computacional**



### Simulación electromagnética

El equipo de UVIGO-UEX ha desarrollado herramientas de simulación electromagnética para problemas realistas de gran complejidad y tamaño eléctrico. Entre sus contribuciones destacadas está la aplicación de técnicas de supercomputación en electromagnetismo computacional, por lo que han sido galardonados con los premios internacionales Intel Itanium Solutions Award y PRACE Award otorgado por la Unión Europea.

Han sido responsables de más de 100 contratos de estudios de compatibilidad e interferencia electromagnética y RCS sobre diferentes tipos de plataformas (aviones, buques, satélites) para la Armada Española y empresas nacionales e internacionales como Navantia, Indra, Raytheon o DAMEN.

También son pioneros en la aplicación de técnicas de simulación de ecuación integral en el ámbito de la nanotecnología y la nanoplasmonia, con aplicaciones en biociencia y biomedicina (espectroscopía Raman, microscopía óptica y electrónica). Mantienen colaboraciones en este campo con grupos de reconocido prestigio del CIC Biomagnete de San Sebastián y del ICFO en Barcelona, así como con universidades europeas y americanas.

### Cálculo de RCS

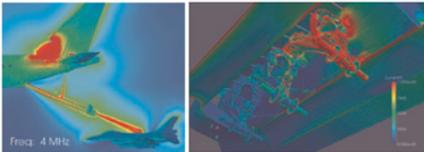
Por otra parte, UAH también ha continuado con el desarrollo de herramientas para análisis de antenas, radomos, compatibilidad electromagnética y RCS. Para el cálculo de RCS con métodos asintóticos de alta frecuencia ha introducido nuevas técnicas de aceleración del trazado de rayos. Este grupo de investigadores también ha trabajado con el 'Método de los Momentos', siendo uno de los principales desarrolladores del 'Método de las Funciones Base Características' combinado con el Multi-level Fast Multipole Method (MLFMA). Las herramientas de simulación han sido comercializadas en todo el mundo a través de Newlasant, empresa de base tecnológica creada por el grupo, que en 2019 se incorporó al grupo internacional Altair.

### Algoritmos numéricos

Paralelamente, UGR ha trabajado tanto



Corrientes inducidas por la radiación de una antena embarcada, sobre la superficie de un barco y la de un avión (LVGO-UEX). Premio europeo PRACE de computación.



Simulaciones por AIRBUS DS con software SEMBA-FDTD de la UGR

Corrientes y campos inducidos durante un repostaje en un A300 a F16, y corrientes inducidas durante la caída de un rayo en el cableado del tren de aterrizaje de un A400M.

en algoritmos numéricos como en desarrollos teóricos y métodos experimentales para aplicaciones que van desde sistemas de comunicación (guías de ondas, fibras ópticas, antenas y radar) hasta problemas de compatibilidad electromagnética, fundamentalmente en la industria aeronáutica, pasando por el estudio de efectos biológicos del campo electromagnético, problemas de nanoelectromagnetismo, georradars y aplicaciones médicas.

Como consecuencia de esta actividad se ha creado la empresa ELEMWAVE, que comercializa, entre otros, el simulador SEMBA-FDTD basado en el método de diferencias finitas en el dominio del tiempo, que, parcialmente, está

disponible de forma pública en <https://github.com/salvaugres/semba-fdtd.git>.

#### Software GRECO

Como alternativa a los métodos tradicionales, UPV ha desarrollado el software GRECO para cálculo de RCS monoestática en alta frecuencia identificando las superficies ocultas del blanco con un innovador algoritmo de procesado gráfico que se ha licenciado a empresas europeas y americanas desde los años 90 hasta la actualidad.

También trabajan en mejorar la formulación y discretización de las ecuaciones integrales con innovaciones para analizar mallas no conformadas y superficies

**Como consecuencia de la actividad de UGR, se ha creado la empresa ELEMWAVE, que comercializa, entre otros, el simulador SEMBA-FDTD basado en el método de diferencias finitas en el dominio del tiempo**

abiertas gruesas, y en desarrollar algoritmos que reducen el coste computacional en la solución del sistema de ecuaciones, entre ellos el primer 'Fast Solver' directo eficiente y la post-compresión que se utiliza habitualmente en la actualidad.

#### Ecuaciones integrales

UPV ha colaborado con la Universidad de Nueva York en el avance de métodos de simulación electromagnética basados en ecuaciones integrales, contribuyendo al desarrollo de técnicas de análisis y optimización mediante el uso de FFT. Además, han creado ecuaciones integrales de elementos de frontera de alto orden y precisión, empleando el MLFMA y asegurando estabilidad en bajas frecuencias. Estos algoritmos respaldan herramientas de diseño que se basan en el cálculo de modos característicos para antenas eléctricamente pequeñas, así como en la creación de lentes con dieléctrico variable.

En paralelo con el análisis de antenas y RCS, también se ha desarrollado en España una gran actividad para la simulación y diseño asistido por ordenador de dispositivos de alta frecuencia.

#### Métodos numéricos

Entre otros trabajos, en UPM se han desarrollado métodos numéricos eficientes y novedosos en tres líneas principales de investigación fundamentadas en análisis modal. La primera es el análisis de superficies selectivas en frecuencia (FSS) y reflect/transmit-arrays (junto a IRS), formulando e implementando algoritmos rápidos y precisos en los dominios espectral y espacial para la caracterización de los elementos del array en estructuras periódicas multicapa.

La segunda línea es el Método de Elementos Finitos con modos esféricos para el diseño eficiente de arrays, bocinas dieléctricas, lentes, sensores para caracterización de líquidos o antenas planas de alta ganancia (junto a UEX). La tercera se centra en los métodos de 'Ajuste Modal' para analizar FSS y circuitos en guíaonda.

Las tres líneas han participado en proyectos de la Agencia Espacial Europea y han diseñado componentes que están

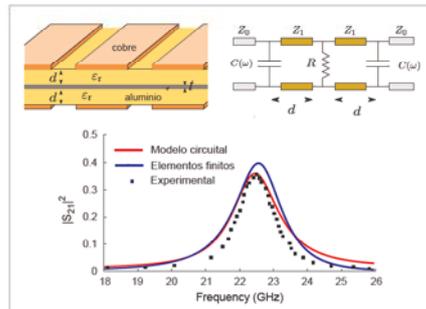
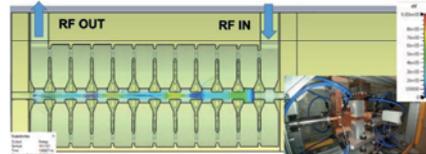


Lámina delgada 1-60 nm de aluminio que se hace parcialmente transparente a 22,5 GHz gracias al doble array de tiras de cobre. Circuitos equivalentes con parámetros analíticos predicen los resultados numéricos y experimentales (US).



Cavidad de RF para el desarrollo de un sistema de protonterapia para tratamiento de cáncer basado en un acelerador lineal de alto gradiente diseñado en el CERN (Ginebra, Suiza). Simulación de los electrones emitidos por emisión de efecto de campo para una cavidad tipo 'Backward Traveling-Wave' centrada en 30GHz con pulsos de 12 MW potencia de pico (IFIC).

embarcados en satélites de comunicaciones actualmente en órbita.

#### Estructuras electromagnéticas periódicas

En US también se ha trabajado en los últimos años de forma intensa en el modelado de estructuras electromagnéticas periódicas usando circuitos equivalentes, desarrollando herramientas muy precisas y eficaces, que han permitido diseñar eficientemente múltiples dispositivos (FSS, polarizadores, etc.) y explicar fenómenos físicos recientemente descritos en los campos de la óptica y las microondas (transmisión extraordinaria en diversas versiones).

En el ámbito RF ha aportado mejoras significativas en sistemas de imagen por RMN. También desarrolla una línea activa en diseño de dispositivos pasivos de microondas, especialmente de tipo diferencial.

En UCM utilizan el 'Método de los Elementos Finitos' (e hibridaciones con otras técnicas numéricas) para el diseño de circuitos de alta frecuencia, antenas y caracterización de RCS. Han desarrollado un simulador orientado a entornos computacionales de altas prestaciones (HPC) y, en base a éste, se realizan actividades de consultoría y

transferencia de tecnología con importantes empresas nacionales del sector aeronáutico.

Los dispositivos de microondas en cavidades y guías de ondas que incluyen elementos metálicos y dieléctricos con formas arbitrarias han sido trabajados en la UPCT, formulando técnicas numéricas eficientes basadas en ecuación integral.

Han contribuido al desarrollo de paquetes de software comercial de análisis electromagnético como FEST3D, ahora parte de CST Studio Suite. Las técnicas desarrolladas han servido para el estudio de fenómenos de alta potencia en colaboración con Multipactor y Corona en colaboración con la Agencia Espacial Europea.

#### Fenómenos multifísicos

Un grupo especializado en el análisis de estos fenómenos multifísicos es IFIC, que dispone de un laboratorio de alta frecuencia para el testeo y diagnóstico de cavidades en banda S para su uso en sistemas de protonterapia (radioterapia de protones para tratamiento de cáncer).

Este tipo de estudios se complementan con simulaciones electromagnéticas realizadas en el dominio del tiempo que permiten analizar la evolución de los electrones emitidos por emisión de efecto de campo en las estructuras aceleradoras. Estas simulaciones requieren el análisis de la dinámica relativista de las partículas existentes en las cavidades aceleradoras para estudiar la interacción de los electrones con los haces de protones que se pretenden acelerar, así como la posible generación de descargas electrónicas de alta frecuencia.

La cantidad de publicaciones internacionales realizadas cada año por todos los grupos mencionados en el texto demuestra la madurez de este campo de investigación en España, la importante contribución hecha desde las universidades y la transferencia de conocimiento a la industria aeronáutica y de comunicaciones que permitirá afrontar mejor los retos del futuro. ▶