



## 1. DATOS BÁSICOS DEL TFG:

**Título:** Simulación de metamateriales mediante métodos numéricos en electromagnetismo

**Descripción general** (resumen y metodología):

### **Descripción y resumen de contenidos**

Este TFG propone analizar, mediante simulaciones numéricas FDTD (Finite-Difference Time-Domain), la respuesta electromagnética de metamateriales de índice negativo —en concreto, de aquellos conocidos como doblemente negativos (DNG), para los que la permitividad ( $\epsilon$ ) y la permeabilidad ( $\mu$ ) adoptan valores negativos en un determinado ancho de banda.

El trabajo se estructura en

- Revisión del marco teórico y estado del arte.
- Revisión de las ecuaciones de Maxwell en medios dispersivos.
- Fundamentos físicos de los metamateriales y condiciones para la aparición de índice de refracción negativo.
- Aplicaciones relevantes (superlentes, cloaking, etc.).

### **Metodología**

- Introducción rigurosa al método FDTD: discretización espacial y temporal, estabilidad (criterio de Courant) y errores de dispersión numérica.
- Implementación de condiciones absorbentes (PML), fuentes pulsadas y modelos de dispersión Drude-Lorentz para  $\epsilon(\omega)$  y  $\mu(\omega)$ .

### **Actividades a desarrollar**

El alumno tendrá acceso a códigos y soporte para el uso del simulador OpenSEMBA disponible bajo <https://github.com/OpenSEMBA>, para utilizar herramientas ya implementadas para la simulación de los problemas planteados en los objetivos descritos más abajo.

**Tipología:** Estudio de casos, teóricos o prácticos, relacionados con la temática del Grado.

### **Objetivos planteados:**

#### **General**

Dominar el uso de simulaciones FDTD para caracterizar el comportamiento de metamateriales DNG y extraer conclusiones físicas de interés científico y tecnológico.

#### **Específicos**

1. Comprender la teoría electromagnética de medios dispersivos y negativos.
2. Adquirir habilidades prácticas en la configuración, ejecución y depuración de códigos FDTD profesionales.
3. Implementar modelos de dispersión Drude-Lorentz y validar los resultados frente a soluciones analíticas o datos de la literatura.
4. Simular la interacción de ondas planas y gaussianas con capas DNG, evaluando coeficientes de reflexión, transmisión e índice de refracción efectivo.
5. Realizar un estudio paramétrico (frecuencia, ángulo de incidencia, espesor, pérdidas) cuantificando fenómenos de resonancia, retrorreflexión y superlente.

### **Bibliografía básica:**

1. FDTD Modeling of Metamaterials: Theory and Applications Yang Hao and Raj Mittra, Artech House, 2009
2. X. Fu, Y. Han, J. Wang, J. Yang y T. Cui, «2nd-Order Debye relaxation in electromagnetic metasurfaces for wideband dispersion engineering», Light: Science & Applications, vol. 14(143), 2025
3. N. Ullah, M. T. Islam, W. H. Yong, A. M. Alenezi, H. H. Goh, T. A. Kurniawan, M. S. Soliman y M. S. Islam, «Design and experimental validation of a compact dual-band double negative metamaterial for energy harvesting applications», Scientific Reports, vol. 15 (14521), 2025

**Recomendaciones y orientaciones para el estudiante:**

Conocimientos previos de Electromagnetismo, métodos numéricos y programación.

**Plazas:** 1

**2. DATOS DEL TUTOR/A:**

**Nombre y apellidos:** SALVADOR GONZÁLEZ GARCÍA

**Ámbito de conocimiento/Departamento:** ELECTROMAGNETISMO

**Correo electrónico:** salva@ugr.es

**3. COTUTOR/A DE LA UGR (en su caso):**

**Nombre y apellidos:**

**Ámbito de conocimiento/Departamento:**

**Correo electrónico:**

**4. COTUTOR/A EXTERNO/A (en su caso):**

**Nombre y apellidos:**

**Correo electrónico:**

**Nombre de la empresa o institución:**

**Dirección postal:**

**Puesto del tutor en la empresa o institución:**

**Centro de convenio Externo:**

**5. DATOS DEL ESTUDIANTE:**

**Nombre y apellidos:**

**Correo electrónico:**