

EX-2024-00605830- -UNC-ME#FAMAF

PROGRAMA DE ASIGNATURA	
ASIGNATURA: Simulaciones Micromagnéticas Aplicadas al Diseño y Estudio de Nanoestructuras	AÑO: 2024
CARACTER: Especialidad	UBICACIÓN EN LA CARRERA: 4° año 2° cuatrimestre
CARRERA: Licenciatura en Física	
REGIMEN: Cuatrimestral	CARGA HORARIA: 120 horas

FUNDAMENTACIÓN Y OBJETIVOS

Los materiales ferromagnéticos, masivos y de baja dimensionalidad, exhiben propiedades interesantes, tales como la demagnetización ultrarrápida, la magnetización en el rango de los picosegundos y la dinámica precesional, de interés para diversas aplicaciones. Estas propiedades incluyen también procesos más lentos, como son el proceso de reversión de la magnetización, la dinámica de las paredes de dominio y la dinámica de los vórtices magnéticos. En particular, la teoría del Micromagnetismo, desarrollada por Landau, Lifschitz y Brown (1935-1940), permite describir los procesos de magnetización y las propiedades características del ciclo de histéresis de materiales ferromagnéticos nanoestructurados. Asimismo, estas propiedades magnéticas, estáticas y dinámicas de los elementos ferromagnéticos, están determinadas por la contribución relativa de diferentes términos energéticos. Algunas herramientas que permiten resolver las ecuaciones micromagnéticas para estructuras magnéticas de baja dimensionalidad son los programas numéricos OOMMF (de las siglas Object Oriented MicroMagnetic Framework) y Mumax, los cuales resuelven las ecuaciones de Landau- Lifschitz- Gilbert (LLG) mediante el método de diferencias finitas. En este curso se brindan los conocimientos mínimos necesarios para abordar el diseño y caracterización magnética de sistemas nanoestructurados, variados en composición y morfología, que permiten comprender sus comportamientos para aplicaciones nanotecnológicas en diferentes disciplinas.

Objetivos:

- Introducir conceptos básicos sobre el micromagnetismo de estructuras uni, bi y tridimensionales, de interés actual en diversas aplicaciones nanotecnológicas. Para ello, se emplearán herramientas de cálculo numérico en 2D y 3D, con el objetivo particular de entrenar a los/as alumnos/as en el uso de programas (OOMMF y MUMAX), que se usan actualmente para la resolución de estructuras magnéticas.
- Introducir conceptos básicos de skyrmions magnéticos y su modelamiento en micromagnetismo, implementando la interacción de Dzyaloshinskii–Moriya superficial.
- Presentar los fundamentos sobre resonancia magnética en distintas estructuras magnéticas (skyrmions, hopfions, etc.), con diámetros modulados.
- Resolver y exponer los trabajos prácticos propuestos por los docentes del curso, en formato póster.

CONTENIDO

Unidad 1: Principios y fundamentos del Micromagnetismo

Breve repaso de conceptos fundamentales de materiales magnéticos. Fundamentos básicos del micromagnetismo: Teoría de dominio y modelo micromagnético. Energías involucradas. Ecuación de movimiento. Simulación de procesos micromagnéticos: Estados de equilibrio. Minimización de la energía. Ciclos de histéresis. Procesos de reversión de la magnetización. Micromagnetismo y aprendizaje automático: computación de nanoestructuras magnéticas. Micromagnetismo y electroquímica: aplicaciones en sensado molecular. Actividades.

Unidad 2: Simulación de nanoestructuras magnéticas en OOMMF 2D y 3D

Herramientas de simulación micromagnética: uso del software Object Oriented MicroMagnetic Framework (OOMMF). Selección de parámetros. Descripción de los comandos. OOMMF y Micromagnetismo. Ejemplos 2D. Presentación de archivos de entrada (MIF). Rutas de acceso. Acceso a Nanohub. Ejemplos 3D. Simulación de nanoestructuras cilíndricas para evaluar propiedades dependientes de la geometría, el tamaño y la composición que determinan el ordenamiento de los momentos magnéticos en nanoestructuras. Actividades. Exposición y discusión de resultados.

Unidad 3: Principios Fundamentales de los skyrmions magnéticos: Estabilidad y Dinámica

Perspectiva general. Definiciones básicas: skyrmion magnético, carga topológica. Interacción de Dzyaloshinskii–Moriya. Diferencias entre skyrmions y burbujas magnéticas. Evidencia experimental de skyrmions a temperatura ambiente. Estabilidad y dinámica de skyrmions. Aplicaciones. Modelamiento de skyrmions en sistemas magnéticos utilizando la teoría micromagnética. Implementación de la interacción de Dzyaloshinskii–Moriya superficial. Estabilización de skyrmions. Dinámica inducida por la interacción con corrientes polarizadas en espín. Definición de problemas a resolver. Actividades. Exposición y discusión de resultados.

Unidad 4: Propiedades estáticas y dinámicas de nanoestructuras

Antecedentes teóricos. Aproximación al continuo. Fundamentos sobre resonancia magnética. Burbujas skyrmiónicas. Hopfions magnéticos. Nanohilos con diámetros modulados. Dinámica de la magnetización. Ejemplos. Actividades. Herramientas para el desarrollo de actividades empleando python. Exposición y discusión de resultados.

Unidad 5: Materiales magnéticos quirales

Antecedentes generales de los materiales magnéticos quirales. Simulaciones micromagnéticas con Mumax3 en materiales quirales. Cálculos de configuraciones estacionarias y curvas de histéresis. Un nanohilo magnético con y sin modulación. Sistema de nanohilos magnéticos. Sistemas conectados tipo Artificial Spin Ice. Cálculos de la magnetorresistencia.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA BÁSICA

Módulo 1

- [1.1] C. Kittel, Introduction to Solid State Physics, Seventh edition, Wiley India, New Delhi, India. (2009).
- [1.2] A. H. Morrish, The Physical Principles of Magnetism. (IEEE Press, New York, United States, 2001).
- [1.3] B. D. Cullity, C. D. Graham, Introduction to Magnetic Materials, Second Edition. IEEE Press and John Wiley & Sons, Inc., Publication. United States of America (2009). [61] Aharoni, A. (1996). Introduction to the Theory of Ferromagnetism International Series of Monographs on Physics. Oxford University Press Inc., New York.
- [1.4] O'Handley, R. C. (1999). Modern Magnetic Materials: Principles and Applications. Wiley-Interscience, New York. [64] M. J. Donahue, R. D. McMichael, Physica B: Condensed Matter 233, 272–278 (1997).
- [1.5] Artículos científicos y trabajos de grado (FAMAF) seleccionados por los docentes a cargo del módulo.

Módulo 2

- [2.1] J. E. Miltat, M. J. Donahue, M. J. Handbook of magnetism and advanced magnetic materials - Numerical micromagnetics: Finite difference methods. John Wiley & Sons, Universidad Estatal de Pensilvania (2007).
- [2.2] Software y manuales extraídos de <https://math.nist.gov/oommf/>
- [2.3] Artículos científicos seleccionados por los docentes a cargo del módulo.

Módulo 3

- [3.1] F. Tejo, E. Saavedra, J.C. Denardin, J. Escrig. Dynamic susceptibility of skyrmion clusters in Co/Pt nanodots. *Applied Physics Letters* 117 (15) (2020).
- [3.2] F. Tejo, et al. Stabilization of Magnetic Skyrmions on Arrays of Self-Assembled Hexagonal Nanodomes for Magnetic Recording Applications. *ACS Applied Materials & Interfaces* 12 (47), 52231-53570 (2020).
- [3.3] F. Tejo, F. Velozo, R.G. Elías, J. Escrig. Oscillations of skyrmion clusters in Co/Pt multilayer nanodots. *Scientific Reports* 10 (16517) (2020).
- [3.4] N. Vidal-Silva, A. Riveros F. Tejo J. Escrig, D. Altbir. Controlling the nucleation and annihilation of skyrmions with magnetostatic interactions. *Applied Physics Letters* 115 (8) (2019).
- [3.5] F. Tejo, A. Riveros, J. Escrig, K.Y. Guslienko, O. Chubykalo-Fesenko. Distinct magnetic field dependence of Néel skyrmion sizes in ultrathin nanodots. *Scientific reports* 8 (1), 1-10 (2018).
- [3.6] A. Fert, V. Cros, J. Sampaio. Skyrmions on the track. *Nat. Nanotechnol.* 8, 152–156 (2013).
- [3.7] J. Sampaio, V. Cros, S. Rohart, A. Thiaville, A. Fert. Nucleation, stability and current-induced motion of isolated magnetic skyrmions in nanostructures. *Nat. Nanotechnol.* 8, 839–844 (2013).
- [3.8] O. Boulle, et al. Room-temperature chiral magnetic skyrmions in ultrathin magnetic nanostructures. *Nat. Nanotechnol.* 11, 449–454 (2016)
- [3.9] C. Moreau-Luchaire, et al. Additive interfacial chiral interaction in multilayers for stabilization of small individual skyrmions at room temperature. *Nat. Nanotechnol.* 11, 444 (2016)
- [3.10] K. S. Ryu, S.-H. Yang, L. Tomas, S. S. P. Parkin. Chiral spin torque arising from proximity-induced magnetization. *Nat. Commun.* 5, 3910 (2014).
- [3.11] A. Fert, N. Reyren, V. Cros. Magnetic skyrmions: advances in physics and potential applications. *Nature Reviews Materials* volume 2, Article number: 17031 (2017).

Módulo 4

- [4.1] Investigation Of Static And Dynamic Magnetic Properties Of Two-Dimensional Magnonic Crystals, Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy (Science) in Physics Ruma Mandal (2015).
- [4.2] Quasistatic and ultrafast magnetization dynamics in magnetic nanostructures, Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy (Science) in Physics (Experimental) by Bivas Rana (2013).
- [4.3] Investigation of static and dynamic magnetic properties in magnetic micro and nano elements with varying shapes, Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy (Science) in Physics (Experimental) by Bipul Kumar Mahato (2022).
- [4.4] Collective Magnetization Dynamics in Magnetic Nanostructures at Various Length Scales and Time Scales, Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy (Science) in Physics Susmita Saha (2015).
- [4.5] Susceptibilidad dinámica de nanoestructuras y geometrías complejas, Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencia con Mención en Física, Eduardo Saavedra (2019).
- [4.6] Proposal of a micromagnetic standard problem for ferromagnetic resonance simulations, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Volume 421, 2017, Pages 428-439, ISSN 0304-8853, <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.08.009>.
- [4.7] Dynamic susceptibility of nanopillars, N. Dao et al 2004, *Nanotechnology* 15 S634 (2004).
- [4.8] Magnetic normal modes of nanoelements, R.D. McMichael, M.D. Stiles, *J. Appl. Phys.* 97 (2005) 10J901.

Módulo 5

- [5.1] S.D. Yi, S. Onoda, N. Nagaosa, J. Hoon Han. *Physical Review B* 80, 054416 (2009).
- [5.2] J. H. Han, J. Zang, Z. Yang, J.-H. Park, N. Nagaosa. *Physical Review B* 82, 094429 (2010).
- [5.3] D. Prychynenko, M. Sitte, K. Litzius, B. Krüger, G. Bourianoff, M. Kläui, J. Sinova, K. Everschor-Sitte. *Physical Review Applied* 9, 014034 (2018).
- [5.4] G. Sáez, P. Díaz, E. Cisternas, E.E. Vogel, J. Escrig. *Scientific Reports* 11, 20811 (2021)

EX-2024-00605830- -UNC-ME#FAMAF

[5.5] G. Sáez, E. Cisternas, P. Díaz, E.E. Vogel, J.P. Burr, E. Saavedra, J. Escrig. Journal of Magnetism and Magnetic Materials 512, 167045 (2020).

[5.6] G. Sáez, P. Díaz, N. Vidal-Silva, J. Escrig, E. E. Vogel. Results in Physics 39, 105768 (2022).

[5.7] E. Saavedra, J. Escrig, J.L. Palma. Journal of Magnetism and Magnetic Materials 490, 165522 (2019).

[5.8] E. Saavedra, J. Escrig. Journal of Magnetism and Magnetic Materials 513, 167084 (2020).

[5.9] F. Valdés-Bango, M. Vélez, L. M. Alvarez-Prado, J. I. Martín. New Journal of Physics 20, 113007 (2018).

EVALUACIÓN

FORMAS DE EVALUACIÓN

Escrita y oral, a través de exposiciones y defensa de resultados obtenidos en cada módulo. Al finalizar, se realizará una evaluación integral del tema asignado a cada alumno/a.

REGULARIDAD

Aprobar al menos el 60% de los Trabajos Prácticos o de Laboratorio.

PROMOCIÓN

Aprobar todas las evaluaciones parciales con una nota no menor a 6 (seis), y obteniendo un promedio no menor a 7 (siete).

Aprobar un coloquio.

CORRELATIVIDADES

Para cursar y rendir: Tener promocionada Física Experimental III.