

Simulaciones micromagnéticas utilizando el software Nmag

Laura Elbaile Viñuales

Rosario Díaz Crespo

Departamento de Física
Universidad de Oviedo

Índice

- Introducción
- Métodos usados por Nmag
- Algunos resultados
 - Nanohilos
 - Láminas
 - Multicapas
- Futuros trabajos

Introducción:

En los últimos años hay un interés creciente en el desarrollo de películas delgadas magnéticas, multicapas, nanohilos multicapa así como otras nanoestructuras con propiedades controlables para aplicaciones en transductores, MRAM, sensores magnéticos, medios de grabación y dispositivos magnetoelectrónicos.

Objetivos:

- Estudio de los efectos de interacción entre elementos en multicapas tanto en hilos como en láminas sobre la evolución de la distribución de la imanación.
- Determinación de las condiciones necesarias para favorecer determinados estados de imanación en las capas ferromagnéticas.

Métodos y procedimientos matemáticos utilizados por el software Nmag*:

- Discretización mediante método de elementos finitos: tetraedros.

Ventajas de este método:

- Apropriado para geometrías curvas y complicadas.
 - La geometría de los tetraedros varía a través de la región a simular.
- Mallado con el software Netgen: [http:// www.hpfem.jku.at/netgen](http://www.hpfem.jku.at/netgen)
 - Manejo de vectores y matrices: PETSc y MPI.

*Thomas Fischbacher, Matteo Franchin, Giuliano Bordignon and Hans Fangohr “*A Systematic Approach to Multiphysics Extensions of Finite-Element based Micromagnetic Simulations*” IEEE Trans. Magn. 43 (2007) 2896.

URL: <http://nmag.soton.ac.uk/nmag/>

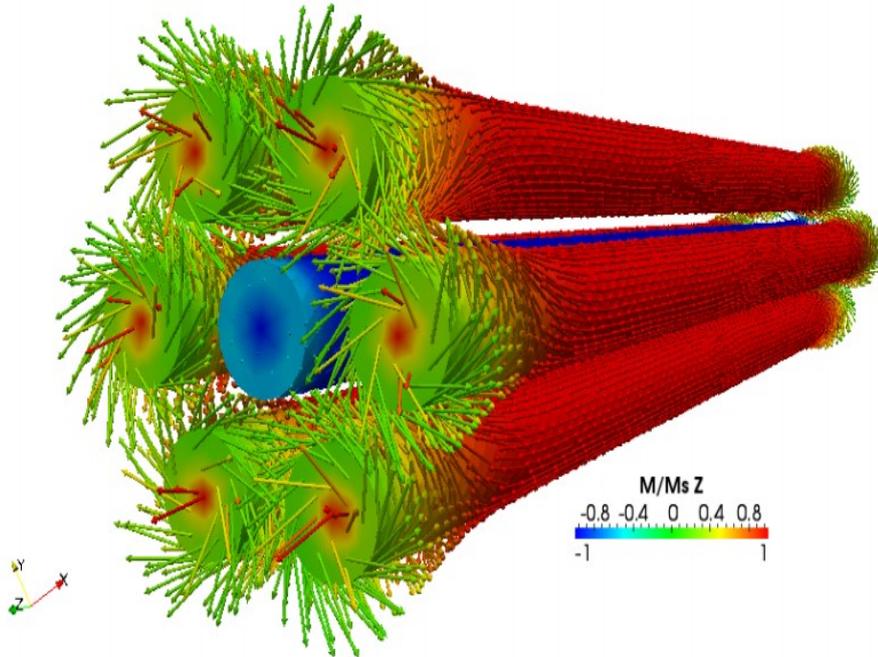
Métodos y procedimientos matemáticos utilizados por el software Nmag:

- Cálculo del campo desimanador mediante una aproximación híbrida usando métodos de elementos finitos (FEM) y elementos de contorno (BEM).
- Integración temporal de la ecuación Landau-Lifshitz Gilbert mediante el programa Sundials.

$$\frac{\partial \vec{M}}{\partial t} = -\gamma \vec{M} \times \vec{H} + \frac{\alpha}{M_{sat}} \vec{M} \times \frac{\partial \vec{M}}{\partial t}$$

Equipo: ordenador Intel Core i5 de cuatro núcleos y 8 GB de RAM.

Nanohilos monocapa



Dimensiones de los Nanohilos de Permalloy estudiados:

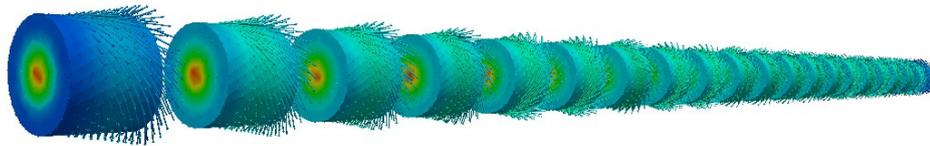
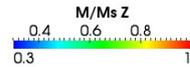
- $l=2,3 \mu\text{m}$
- $\Phi=72 \text{ nm}$
- $D=135 \text{ nm}$

L. Elbaile, I. G. Cubero, R. D. Crespo, V. Vega and J. A. García, J. Alloys and Compounds [http:// dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2011.12.066](http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2011.12.066)

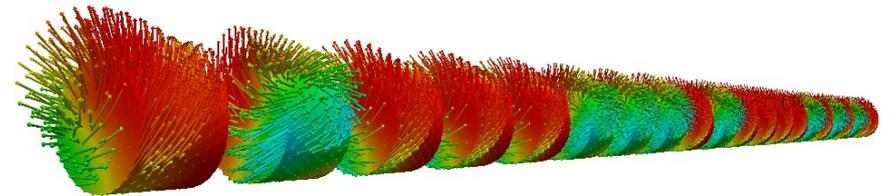
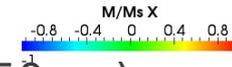
Nanohilos multicapa

- $l=2,3 \mu\text{m}$
- $\Phi=72 \text{ nm}$

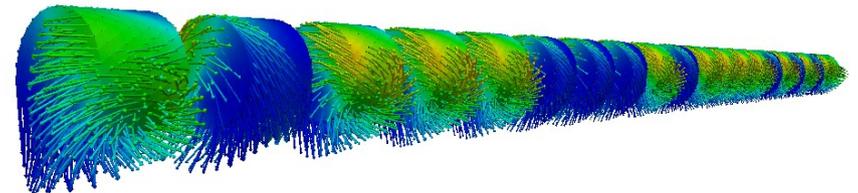
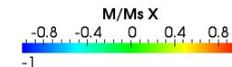
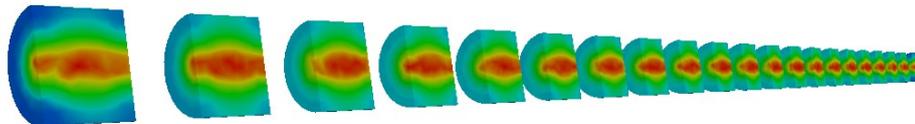
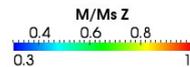
21 capas Ni79/Fe21(60nm)/Cu(50nm)



$H_z = 65000 \text{ A/m}$



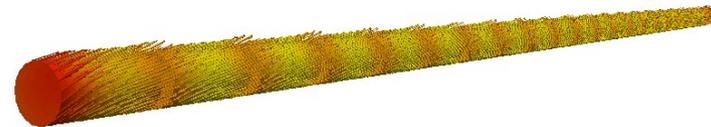
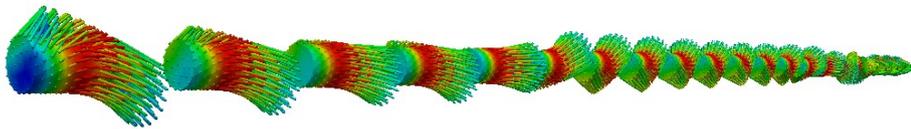
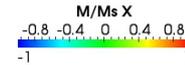
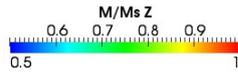
$H_x = 100000 \text{ A/m}$



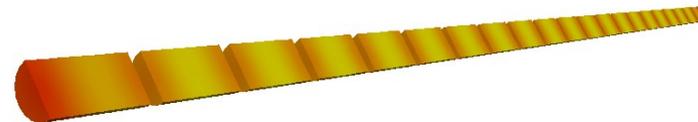
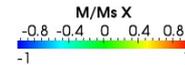
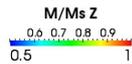
$H_x = -100000 \text{ A/m}$

Nanohilos multicapa

- $l=2,3 \mu\text{m}$
- $\Phi=34 \text{ nm}$

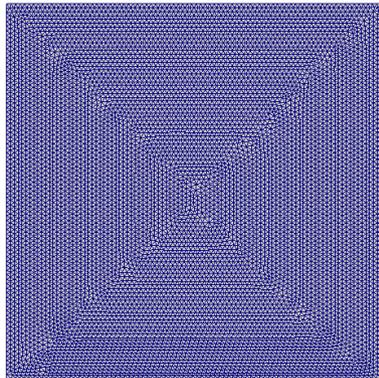


 21 capas Ni79/Fe21(60nm)/Cu(50nm)  21 capas Ni79/Fe21(70nm)/Cu(10nm)
 $H_z=150000 \text{ A/m}$ $H_x=200000 \text{ A/m}$

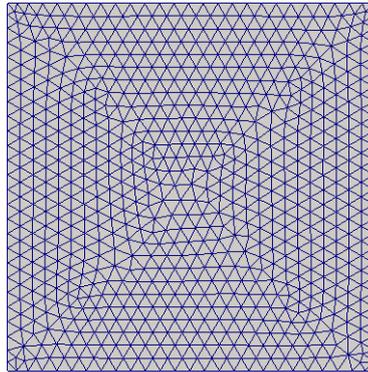


Láminas

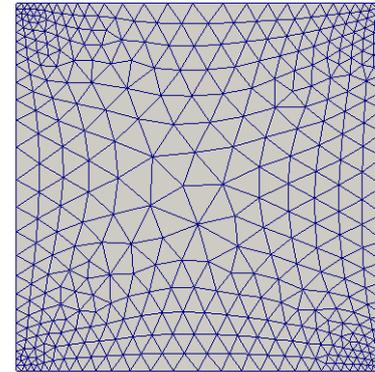
Estudio del comportamiento de la imanación dependiendo del mallado en láminas cuadradas de Permalloy de 250 nm de lado y 20 nm de espesor.



Mallado 1



Mallado 2



Mallado 3

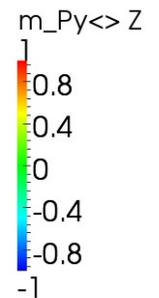
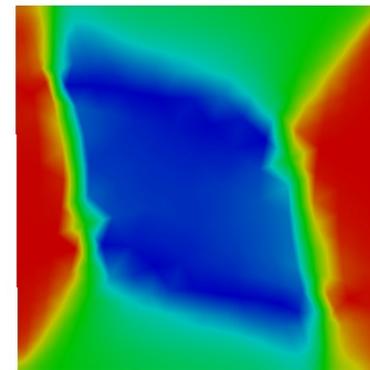
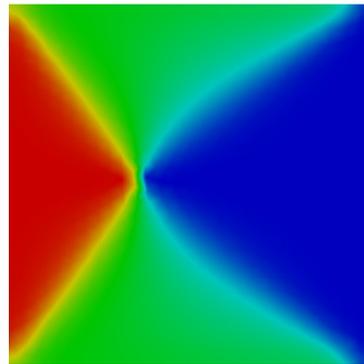
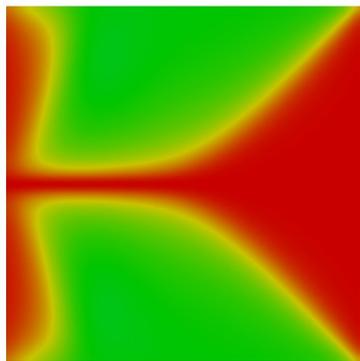
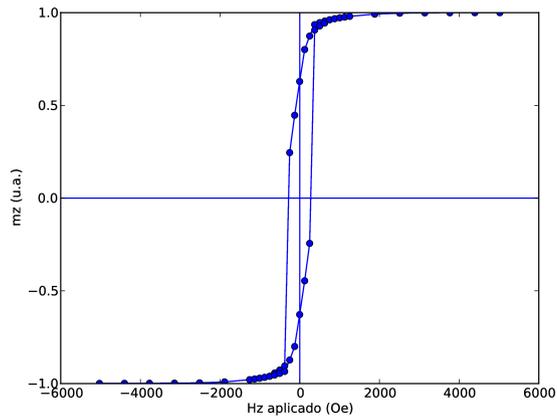
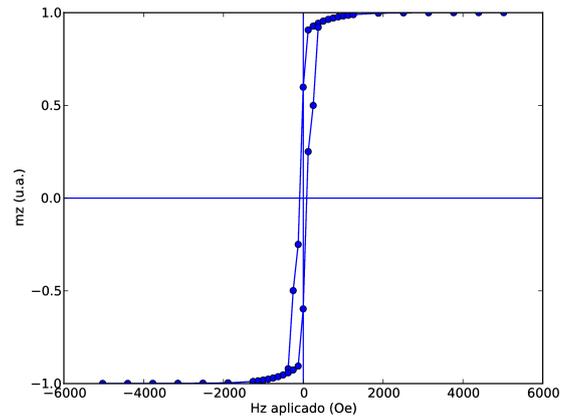


Imagen de la imanación en el plano (mz) para un campo aplicado
 $H_z = -125$ Oe

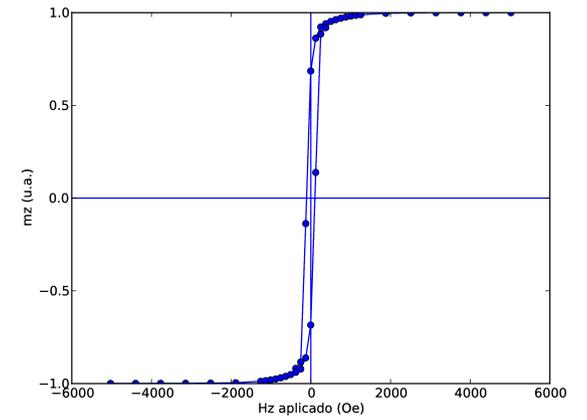
Ciclos para diferentes mallados



Mallado 1



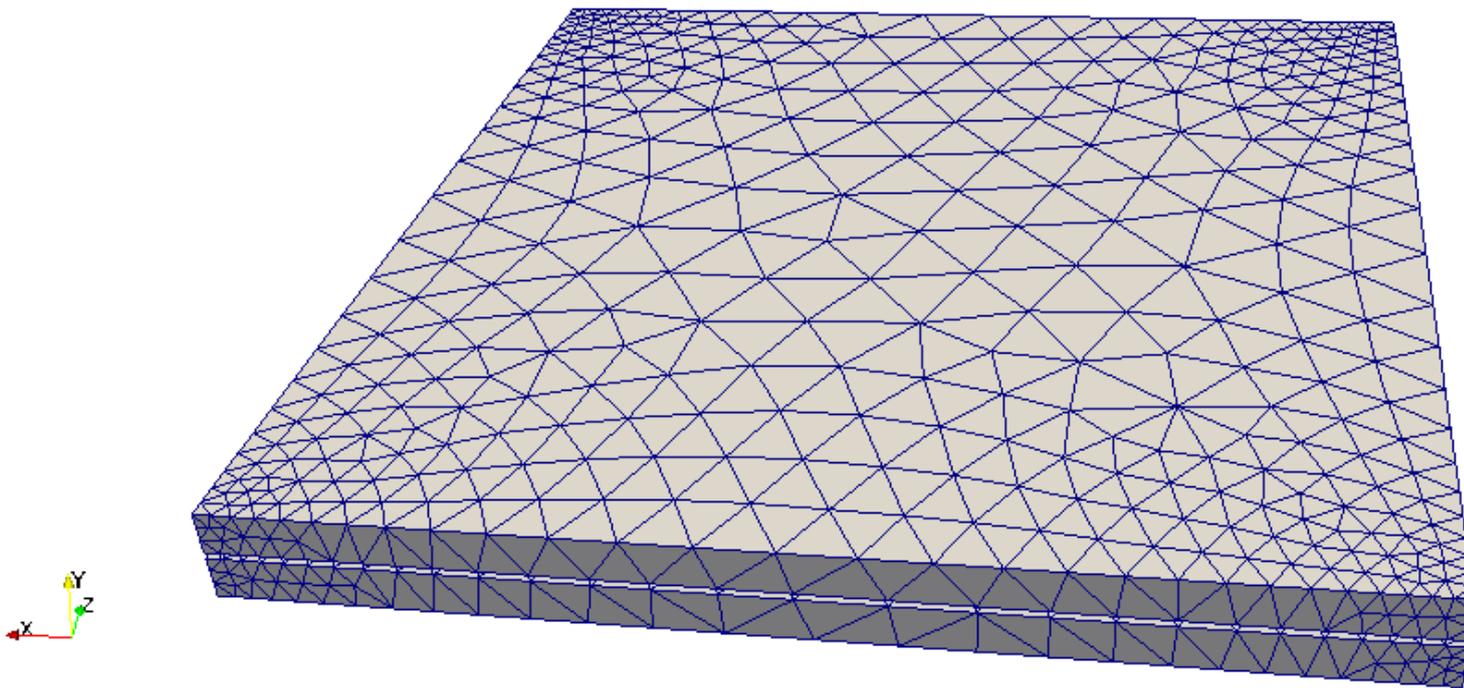
Mallado 2



Mallado 3

Dos láminas

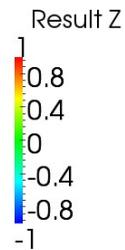
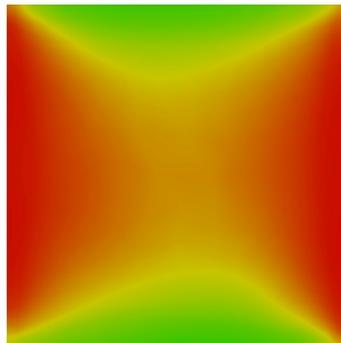
El objetivo del estudio de dos láminas es estudiar el efecto de la interacción sobre la inversión de la imanación para distintas separaciones.



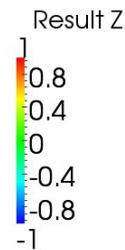
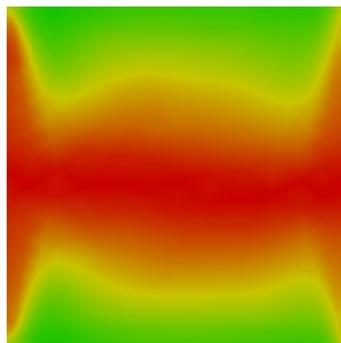
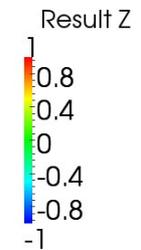
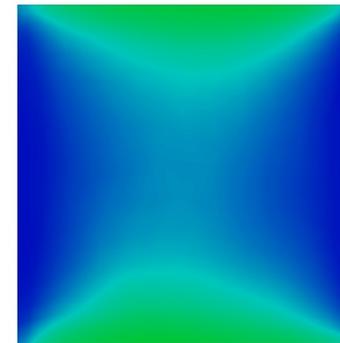
Dos láminas: Simulación de la imanación en remanencia

Lámina 1

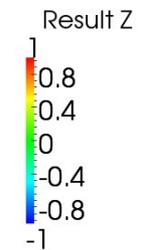
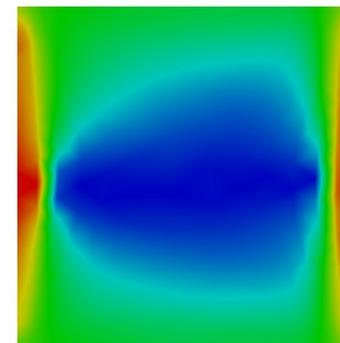
Lámina 2



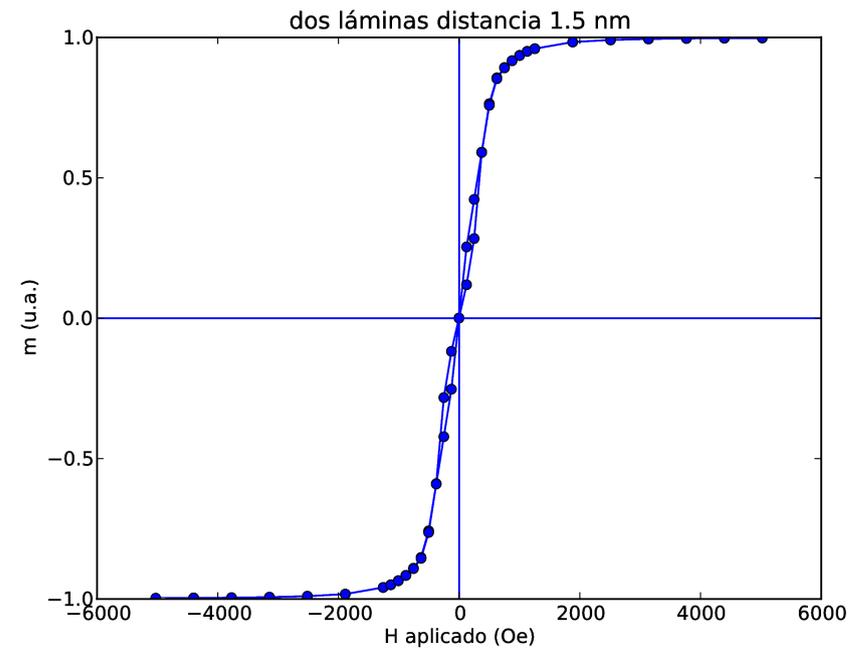
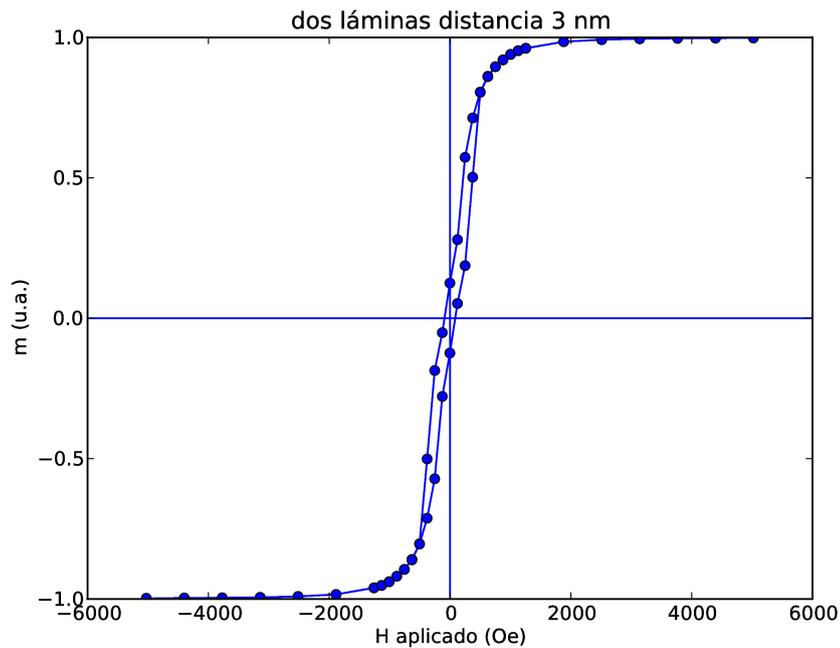
Distancia 1.5 nm



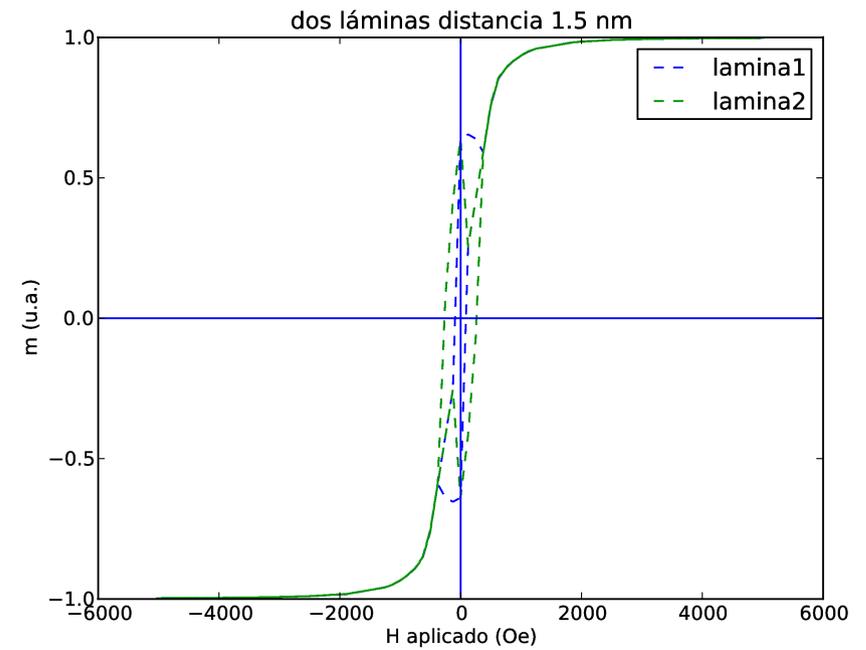
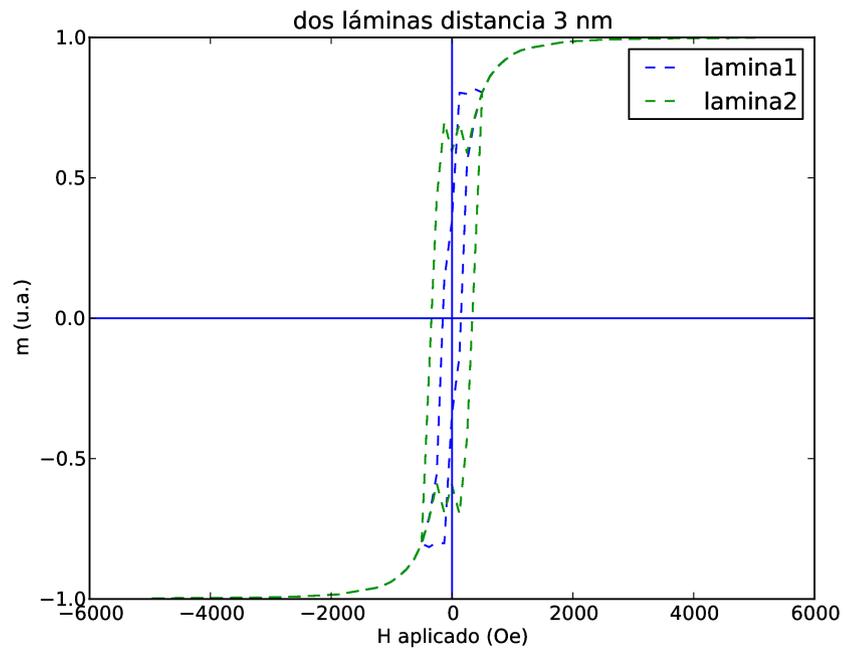
Distancia 3 nm



Ciclo promedio de histéresis de dos láminas separadas diferente distancia



Ciclos de histéresis de cada lámina



Distribución de la imanación de una tricapa en remanencia

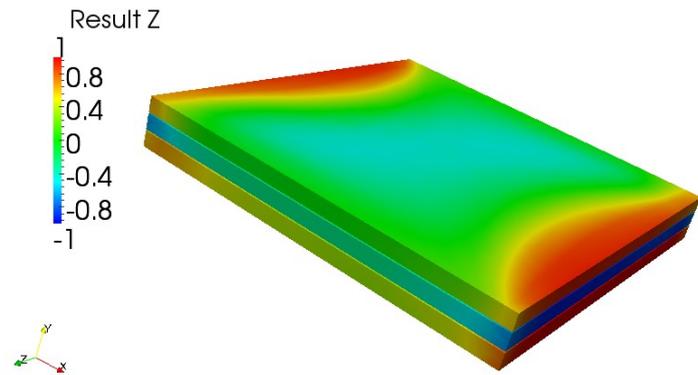


Lámina superior

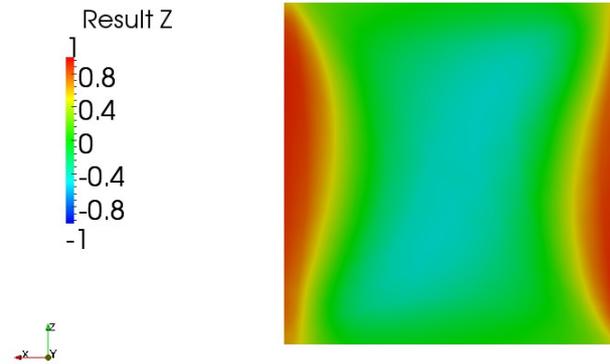


Lámina central

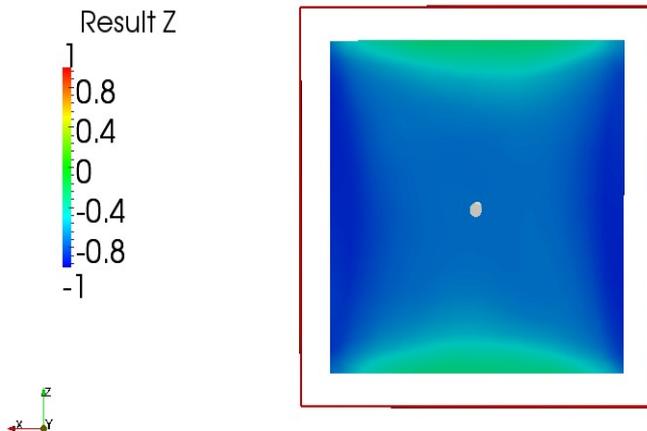
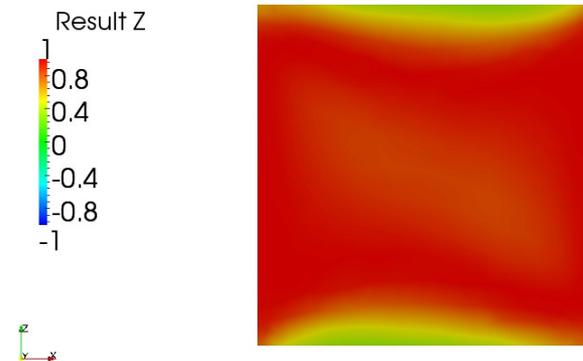
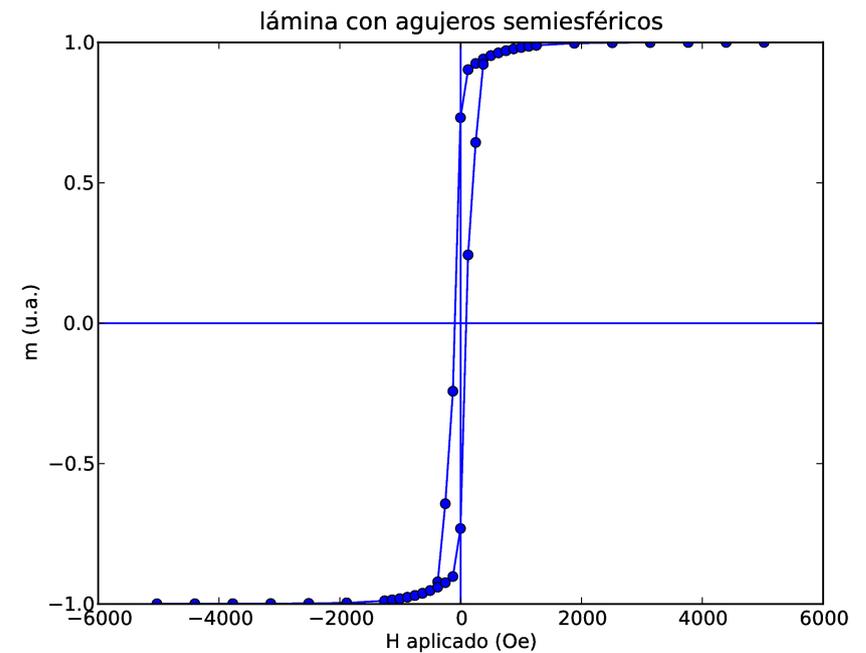
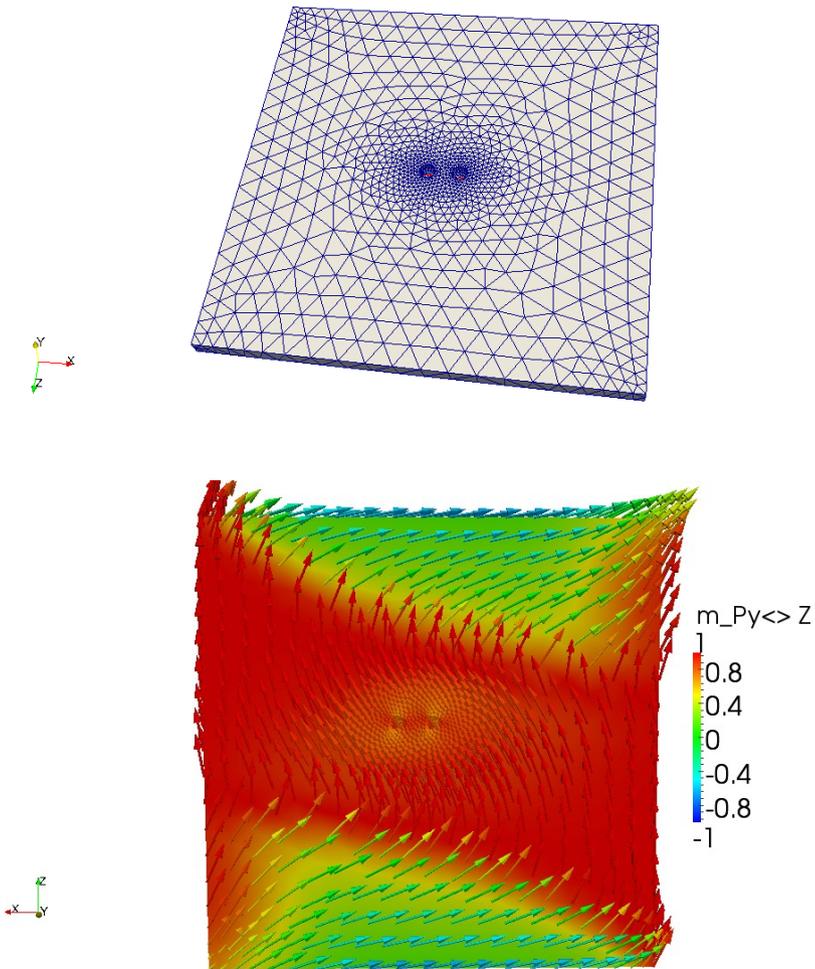


Lámina inferior

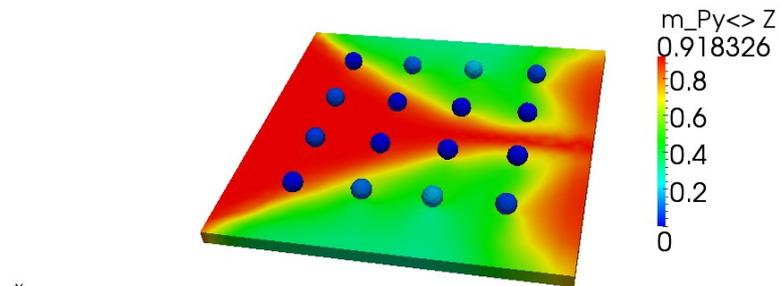
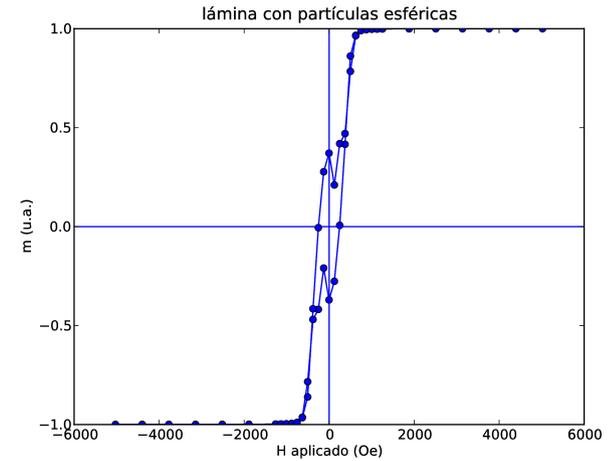
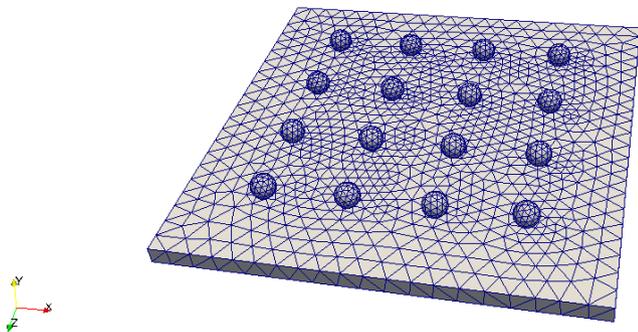


Configuración de la imanación en láminas con superficie irregular

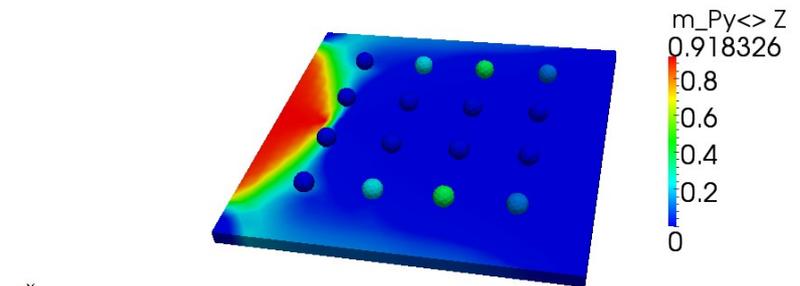
Dos huecos semiesféricos de 10 nm de radio.



Láminas con partículas esféricas



Remanencia



Campo Hz= -125 Oe

Trabajos que tenemos en mente

Nmag permite la extensión de la ecuación de Landau-Lifshitz-Gilbert a la propuesta por Zhan-Li* que permite modelar la interacción entre una densidad de corriente eléctrica uniforme y la variación espacial de la imanación. De tal forma que la ecuación LLG extendida (ampliada) es:

$$\frac{\partial \vec{M}}{\partial t} = -\gamma \vec{M} \times \vec{H} + \frac{\alpha}{M_{sat}} \vec{M} \times \frac{\partial \vec{M}}{\partial t} - \frac{v}{M_{sat}^2} \vec{M} \times (\vec{M} \times \vec{j} \cdot \nabla \vec{M}) - \frac{\xi v}{M_{sat}} \vec{M} \times \vec{j} \cdot \nabla \vec{M}$$

* S. Zhang and Z. Li, Roles of nonequilibrium conduction electrons on the magnetization dynamics of ferromagnets, Phys. Rev. Lett. 93, 127204 (2004)

Simulaciones micromagnéticas de partículas magnéticas para la terapia del cáncer por hipertermia

Las nanopartículas que son superparamagnéticas debido a su pequeño volumen muestran histéresis en presencia de un campo magnético de alta frecuencia.

Las pérdidas de energía por histéresis y relajación causan hipertermia localizada.

El objetivo es mejorar la eficiencia térmica de estas partículas:

- Aplicando diferentes tipos de ondas
- Aplicando campos estáticos perpendiculares

Para la realización de estas simulaciones se debe añadir un término al campo efectivo H_{eff} , además de los campos habituales, correspondiente a la fluctuación térmica.