

Simulaciones micromagnéticas en nanohilos ferromagnéticos de Co-Ni con anisotropía transversal

Anteproyecto de Grado

Nicolás Barrios Pizo

Departamento de Física
Universidad del Valle

11 de Junio del 2023



- 1 Introducción
- 2 Marco Teórico
- 3 Objetivos
- 4 Metodología
- 5 Cronograma de Actividades
- 6 Recursos

- 1 Introducción
- 2 Marco Teórico
- 3 Objetivos
- 4 Metodología
- 5 Cronograma de Actividades
- 6 Recursos

Introducción

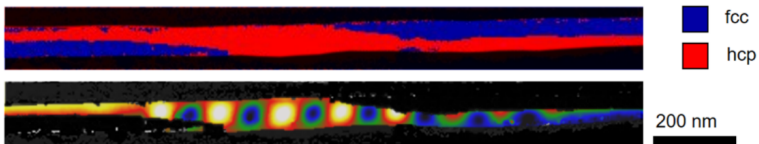
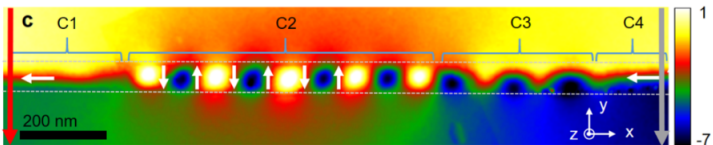
El **micromagnetismo** es una teoría continua que describe los procesos de magnetización en una escala tamaño significativa.

Model	Description	Length Scale
Atomic level theory	Quantum mechanical ab initio calculations	$< 1 \text{ nm}$
Micromagnetic theory	Continuous description of the magnetization	$1 - 1000 \text{ nm}$
Domain theory	Description of domain structure	$1 - 1000 \mu\text{m}$
Phase theory	Description of ensembles of domains	$> 0.1 \text{ mm}$

Figure 1: Modelos establecidos para la descripción del ferromagnetismo en diferentes escalas de longitud.

<http://micromagnetics.org/>

Exl, L., Suess, D. y Schrefl, T. en Handbook of Magnetism and Magnetic Materials (eds. Coey, M. y Parkin, S.) 1-44 (Springer International Publishing, Cham, 2020).



Andersen, I. M. et al. Exotic Transverse-Vortex Magnetic Configurations in CoNi Nanowires. ACS Nano 14, 1399-1405 (2020).

1 Introducción

2 Marco Teórico

3 Objetivos

4 Metodología

5 Cronograma de Actividades

6 Recursos

Ecuaciones de Landau-Lifshitz y Gilbert

Magnetización

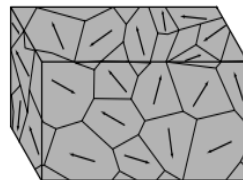
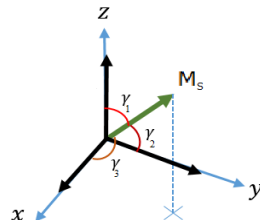
$$\mathbf{M}_s(\mathbf{r}, T) = |\mathbf{M}_s(T)| \sum_{n=1}^3 \gamma_n(\mathbf{r}) \hat{\mathbf{e}}_n$$

Ecuaciones Diferenciales

$$\frac{d\mathbf{M}_s}{dt} = \gamma_G (\mathbf{M}_s \times \mathbf{H}_{eff}) - \frac{\alpha_G}{M_s} \left(\mathbf{M}_s \times \frac{d\mathbf{M}_s}{dt} \right)$$

$$\mathbf{H}_{eff} = -(1/J_s) \partial \phi_I / \partial \mathbf{m} \quad \wedge \quad \mathbf{m} = \mathbf{M}_s / M_s$$

- γ_G : Constante giromagnética de los electrones.
- α_G : Constante de amortiguamiento de Gilbert.



Exl, L., Suess, D. y Schrefl, T. en Handbook of Magnetism and Magnetic Materials (eds. Coey, M. y Parkin, S.) 1-44 (Springer International Publishing, Cham, 2020).

Energía libre de Gibbs

Energía libre de Gibbs

$$\phi'_I = U - TS - \sigma \cdot \epsilon - \mathbf{J}_s \cdot \mathbf{H}_{\text{ext}}$$

$$\phi_I = \int_V \phi'_I dV$$

Densidad de energía interna

$$U = \phi'_s + \phi'_K + \phi'_{\text{ex}} + \phi'_H + \phi'_{\text{el}}$$

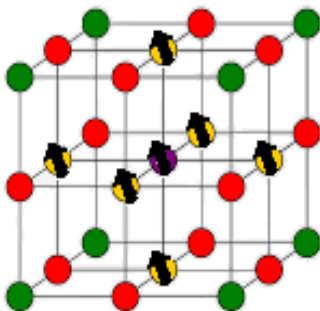
- S : Entropía por unidad de volumen.
- σ : Tensor de estrés.
- ϵ : Tensor de Tensión.
- \mathbf{H}_{ext} : Campo magnético externo.
- T : Temperatura.
- ϕ'_s : Den. ener. dipolar.
- ϕ'_K : Den. ener. anisotropía magnetocristalina.
- ϕ'_{ex} : Den. ener. intercambio.
- ϕ'_H : Den. ener. Zeeman.
- ϕ'_{el} : Den. ener. elástica.

En equilibrio termodinámico, la energía libre de Gibbs corresponde de a un mínimo ($\delta\phi_I = 0$). En donde T , σ y \mathbf{H}_{ext} son parámetros libres.

Kronm uller, H. y Fahnle, M. Micromagnetism and the Microstructure of Ferromagnetic Solids
(Cambridge University Press, 2003)

Energía de Intercambio

$$\mathcal{H}_{\text{ex}} = -2 \sum_{i \neq j} J_{ij} \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j \quad \rightarrow \quad \phi'_{\text{ex}} = A \sum_{n=1}^3 (\nabla \gamma_n(\mathbf{r}))^2$$

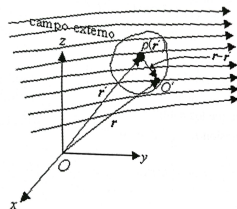


El Hamiltoniano de intercambio de Heisenberg describe la interacción magnética entre los momentos magnéticos de los electrones en un sistema cuántico.

Energía Magnetostática

Energía Zeeman

$$\phi'_H = -\mu_0 \mathbf{H}_{\text{ext}} \cdot \mathbf{M}_s.$$

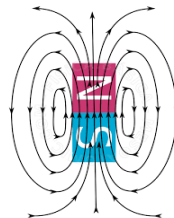


Energía dipolar

$$\phi'_s = \frac{\mu_0}{2} \mathbf{H}_s^2.$$

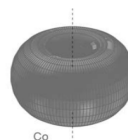
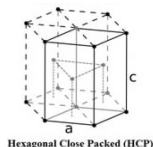
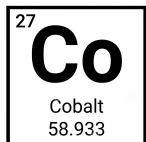
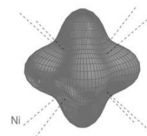
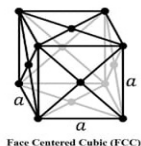
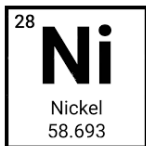
$$\mathbf{H}_s(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi} \sum_i \left(\frac{\mu_i(\mathbf{r}_i)}{|\mathbf{R}|^3} - \frac{3(\mu_i(\mathbf{r}_i) \cdot \mathbf{R}) \cdot \mathbf{R}}{|\mathbf{R}|^5} \right)$$

$$\mu_i(\mathbf{r}) = g\mu_B \mathbf{S}_i(\mathbf{r})$$



Energía de anisotropía magnetocristalina

$$\phi'_K = k_0(\mathbf{r}) + \sum_{i \neq j} k_{ij} \gamma_i(\mathbf{r}) \gamma_j(\mathbf{r}) + \sum_{ijk} k_{ijk} \gamma_i(\mathbf{r}) \gamma_j(\mathbf{r}) \gamma_k(\mathbf{r}) + \dots$$



Coe, J. M. D. Magnetism and Magnetic Materials (Cambridge University Press, 2010).

Simulaciones micromagnéticas

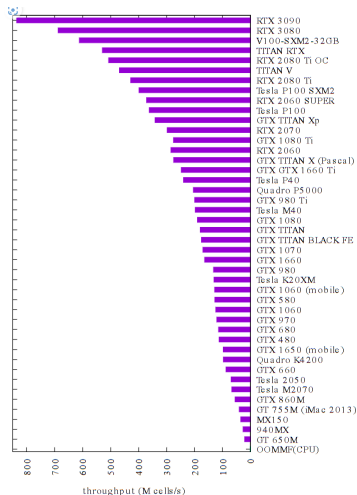
Name	Release	FE/FD	GPU capable?	Free?
LLG micromagnetics simulator	1997	FD	No	Commercial
OOMMF	1998	FD	No	Free
micromagus	2003 ^a	FD	No	Commercial
magpar	2003	FE	No	Free
Nmag	2007	FE	No	Free
GPMagnet	2010	FD	Yes	Commercial
FEMME	2010	FE	No	Commercial
tetramag ^b	2010	FE	Yes	Commercial
finmag ^c	2011	FE	No	Free
Fastmag	2011	FE	Yes	Commercial
Mumax	2011	FD	Yes	Free
micromagnum	2012	FD	Yes	Free
magnum.fd ^d	2014	FD	Yes	Free
magnum.fe	2013	FE	No	Commercial
numax ³	2014	FD	Yes	Free
LLG micromagnetics simulator v4.	2015	FD	Yes	Commercial
Grace	2015	FD	Yes	Free
OOMMF (GPU version)	2016	FD	Yes	Free
fidimag	2018	FD	No	Free
comics	2018	FE	No	Free

Método numérico

- **FD:** Diferencias finitas.
- **FE:** Elementos finitos.

Leliaert, J. Tomorrow's micromagnetic simulations. Journal of Applied Physics 125 (2019).

<https://mumax.github.io/index.html>



- 1 Introducción
- 2 Marco Teórico
- 3 Objetivos**
- 4 Metodología
- 5 Cronograma de Actividades
- 6 Recursos

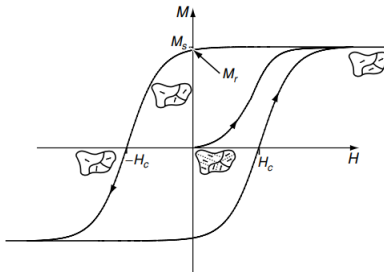
Objetivos

Objetivo General:

Estudiar la microestructura magnética de nanohilos basados en la aleación Co-Ni y su dependencia con variables intrínsecas y extrínsecas.

Objetivos Específicos:

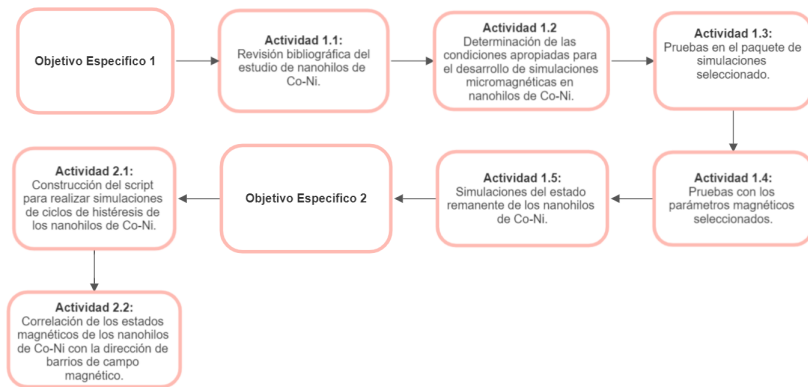
- Estudiar la dependencia de la microestructura remanente como función de la geometría del nanohilo, la anisotropía magnetocristalina y la composición.
- Estudiar el proceso de inversión de la imanación para condiciones y parámetros magnéticos de interés.



Coe, J. M. D. Magnetism and Magnetic Materials (Cambridge University Press, 2010).

- 1 Introducción
- 2 Marco Teórico
- 3 Objetivos
- 4 Metodología**
- 5 Cronograma de Actividades
- 6 Recursos

Metodología



- 1 Introducción
- 2 Marco Teórico
- 3 Objetivos
- 4 Metodología
- 5 Cronograma de Actividades**
- 6 Recursos

Cronograma de Actividades

Actividades	Mes											
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
Actividad 1.1: Revisión bibliográfica.	x	x										
Actividad 1.2: Determinación de parámetros micromagnéticos.		x	x									
Actividad 1.3: Pruebas en el paquete de simulación.			x	x	x							
Actividad 1.4: Pruebas con los parámetros seleccionados.					x	x	x	x				
Actividad 1.5: Simulaciones del sistema.								x	x			
Actividad 2.1: Script para simular ciclos de histéresis.								x	x	x		
Actividad 2.2: Correlaciones.									x	x	x	x

Table 1: Cronograma de actividades

- 1 Introducción
- 2 Marco Teórico
- 3 Objetivos
- 4 Metodología
- 5 Cronograma de Actividades
- 6 Recursos**

Recursos

	Valor
Dedicación del asesor: 3 (h/sem)	\$10.600.000
Estación de cálculo (Workstation)	\$4.000.000
Total:	\$ 14.600.000