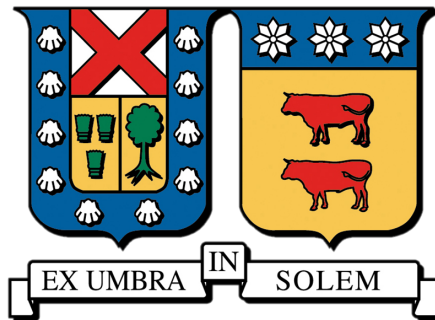


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

VALPARAÍSO-CHILE



DISEÑO, FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN  
DE NANODISCOS MAGNÉTICOS PARA SU USO  
EN TERAPIAS CONTRA EL CÁNCER

IGNACIO IVÁN RADIC BRITO

TÉSIS PARA EL GRADO DE MAGISTER EN CIENCIAS MENCIÓN FÍSICA

COMITÉ EVALUADOR

PROFESOR GUÍA  
DR. CARLOS GARCÍA

PROFESOR CO-REFERENTE  
DR. RAFAEL MORALES

DR. TOMÁS CORRALES



---

---

# AGRADECIMIENTOS

Agradezco al grupo de espectroscopia láser de la UPV/EHU. Izaro, Dani, Raquel, María, Paul, Fernando y Anton. Un grupo excepcional de personas, compañeros y amigos, espero verlos nuevamente pronto por allá en País Vasco.

También agradezco al grupo de magnetismo de la universidad el cual siempre me dio buenos consejos y me apoyaron en la investigación. Orellana, Romanque, Mery, Jonathan, Jorge, Claudio, Paul, Damian, y a mis profesores que me dieron la oportunidad de trabajar en este proyecto.

---

---

# RESUMEN

Las nanopartículas magnéticas han despertado un gran interés en el área de la biomedicina debido a su potencial uso en terapias contra el cáncer, reparto de fármacos en ambientes biológicos, manipulación celular y agentes de contraste. Gracias a su fácil manipulación con un campo magnético externo, es posible aplicar torques y procesos de hipertermia, propiedades críticas al momento de ser utilizadas en células cancerígenas para su destrucción.

Dentro de las nanopartículas existentes se destacan las de tipo *superparamagnetic iron oxide nanoparticles* (SPION), *synthetic anti-ferromagnetic* (SAF) y del tipo vórtice (*vortex*), las cuales son el principal enfoque en este trabajo de investigación. Los métodos de patronaje y de deposición varían dependiendo del tipo de nanopartícula a fabricar, abarcando métodos como son los de fotolitografía, *nanoimprinting*, *hole-mask colloidal lithography*, evaporación solvotermal, deposición por *sputtering* o mediante haz de electrones.

En el presente trabajo, se fabricaron dos discos ferromagnéticos de Fe (hierro) y Py (*permalloy*) con estructura magnética tipo vórtice la cual previene la aglomeración de los mismos. Para fabricar estos nanodiscos, se siguió la ruta de patronaje con resina negativa y deposición por haz de electrones. Discos con diámetros de 790[nm] y 260[nm] fueron creados con espesores de 50[nm] y 100[nm] de material respectivamente, dando como resultado un total de ocho muestras. Imágenes SEM (scanning electron microscope) fueron tomadas como soporte para observar la calidad de los nanodiscos.

Posteriormente se realizó una caracterización magnética completa la cual fue comparada con modelos de microsimulación magnética. Medidas de VSM (*Vibrating Sample Magnetometer*) fueron tomadas como película nanoestructurada y tras completar las medidas, los discos fueron liberados en agua dentro de *ependorfs* para

realizar una segunda caracterización con VSM y comparar los resultados. Tras las mediciones, dos tipos de discos fueron seleccionados por sus mejores propiedades magnéticas, los de menor remanencia y coercitividad para un posterior análisis, los de Fe de 260[nm] de diámetro y 50[nm] de espesor y los de Py de 790[nm] de diámetro y 50[nm] de espesor.

La simulación micromagnética fué llevada a cabo con el uso de Mumax, la cual realiza cálculos a partir de elementos finitos. Las imágenes SEM tomadas anteriormente fueron usadas como matriz para este propósito. Los ocho tipo de discos fabricados fueron simulados y se observó su estado magnético y sus características. Teniendo los resultados experimentales y simulados, se hizo una comparación y análisis de los resultados.

Para la observación de la dinámica de los discos en solución acuosa, fué montado un láser con un fotodetector capaz de medir los cambios en intensidad luminosa producido por el movimiento de los discos frente a un campo magnético externo. Se realizaron medidas a discos de Py de 790[nm] de diámetro y 50[nm] de espesor para observar su comportamiento y evolución temporal frente al campo magnético aplicado. Para apoyar estas observaciones, discos de mayor diámetro capaces de ser observados en un microscopio óptico, fueron sometidos bajo un campo magnético para observar su interacción. y también bajo MFM para ver el estado vórtice magnético.

---

---

# ABSTRACT

Magnetic nanoparticles have garnered significant interest in the field of biomedicine due to their potential applications in cancer therapy, drug delivery in biological environments, cell manipulation, and contrast agents. Their easy manipulation with an external magnetic field allows for the application of torques and hyperthermia processes, critical properties when targeting cancer cells for destruction.

Among existing nanoparticles, superparamagnetic iron oxide nanoparticles (SPIONs), synthetic anti-ferromagnetic (SAF) nanoparticles, and vortex-type nanoparticles stand out, forming the primary focus of this research. Patterning and deposition methods vary depending on the nanoparticle type, including techniques such as photolithography, nanoimprinting, hole-mask colloidal lithography, solvothermal evaporation, sputtering deposition, or electron beam deposition.

In this study, two ferromagnetic vortex-type discs of iron (Fe) and permalloy (Py) with a preventing agglomeration structure were fabricated. The fabrication process involved negative resist patterning and electron beam deposition. Discs with diameters of 790[nm] and 260[nm] were created, each with thicknesses of 50[nm] and 100[nm], resulting in a total of eight samples. Scanning electron microscopy (SEM) images were taken to assess the quality of the nanodiscs.

Subsequently, a comprehensive magnetic characterization was conducted and compared with magnetic microsimulation models. Vibrating Sample Magnetometer (VSM) measurements were taken on the nanostructured film, and after completion, the discs were released into water inside eppendorfs for a second VSM characterization to compare the results. Two types of discs were selected for further analysis based on their superior magnetic properties, specifically those with lower remanence and coercivity, Fe discs with a diameter of 260[nm] and thickness of 50[nm], and Py discs with a diameter of 790[nm] and thickness of 50[nm].

---

Micromagnetic simulation was performed using Mumax, employing SEM images as a matrix. All eight types of fabricated discs were simulated to observe their magnetic state and characteristics. With experimental and simulated results in hand, a thorough comparison and analysis were conducted.

To observe the dynamics of the discs in an aqueous solution, a laser with a photo-detector was set up to measure changes in light intensity caused by disc movement in response to an external magnetic field. Measurements were made on Py disks with a diameter of 790[nm] and a thickness of 50[nm] to observe their behavior and temporal evolution in response to the applied magnetic field. To support these observations, larger diameter disks capable of being observed under an optical microscope were subjected to a magnetic field to observe their interaction.

---

---

# ÍNDICE DE FIGURAS

- 1.1. Ejemplo de las configuraciones magnéticas en la fabricación de nanodiscos. De izquierda a derecha, discos *SAF* con magnetización en el plano, discos *P-SAF* con magnetización fuera del plano, discos en estado vórtice. [9]. 3
- 1.2. a) Ciclos de histéresis de discos de Py en estado vórtice. Espesor fijo de 15[nm], variación en el diámetro. b) Diámetro fijo de 400[nm], variación en los espesores. c) Diagrama de pérdida de energía en los ciclos de histéresis en función del diámetro (eje x) y espesor(eje y). Área en blanco, discos que no presentan vórtice. [8]. 4
- 1.3. a) Modelo de roedor al cual se le aplicaron nanodiscos de Py de 150[nm] de diámetro y 25[nm] de espesor. Campo magnético alterno en la dirección  $H_a$ . b) Gráficos de variación máxima de temperatura en diferentes órganos por dosis y área de aplicación. c) Transientes de calor para diferentes órganos, fijando dosis y área [8]. 5
- 1.4. Diagramas de sistemas para la aplicación de campo magnético. a) Sistema de imanes con eje central rotatorio. b) Electroimán con corriente alterna para generación de campos magnéticos alternos. c) Electroimán con guía de ferrita para localización del campo magnético. d) Electroimán vectorial. e) Configuración Halbach para reforzamiento de un campo magnético homogéneo al interior del cilindro. f) Configuración de imanes contiguos para un campo lineal permanente [20]. 6
- 1.5. Proceso de litografía por interferencia. Ruta izquierda aplicando resina positiva, ruta derecha aplicando resina negativa. [21]. 7

1.6.	a) Sustrato con la capa de sacrificio de Durimide y las capas resistivas. b) Proceso de patronaje con la oblea de silicio con nano pilares. c) <i>Undercut</i> de la capa de PMGI para mejoramiento del perfil. d) Deposición de material mediante evaporación. e) Proceso de <i>lift-off</i> . f) Liberación. [23].	8
1.7.	Proceso de la técnica <i>HCL</i> para la creación de discos de permalloy. Una primera capa de <i>PMMA</i> es aplicada sobre el sustrato, luego el ionizador es aplicado y las esferas repartidas sobre la superficie. Una primera capa de titanio es aplicada y las esferas son removidas con el uso de un adhesivo. El <i>PMMA</i> expuesto es removido y una capa de permalloy es aplicada. Finalmente se elimina todo el <i>PMMA</i> de la superficie, dejando solo los discos de permalloy sobre la superficie. [22].	9
1.8.	Proceso de fabricación de nanodiscos de magnetita a través de evaporación solvotermal. [24].	10
2.1.	Configuración de la óptica para el proceso de litografía por interferencia.	13
2.2.	Equipo de litografía utilizado para la creación del patrón en la resina.	13
2.3.	Esquema de funcionamiento del evaporador por haz de electrones. Un filamento emite electrones los cuales son redirigidos con el uso de un campo magnético hacia el crisol. El material es evaporado y depositado sobre la muestra. [17].	14
2.4.	Imágenes SEM discos de Fe de 790[nm] de diámetro, 50[nm] de espesor.	17
2.5.	Imágenes SEM discos de Fe de 790[nm] de diámetro, 50[nm] de espesor, vista lateral.	17
2.6.	Imágenes SEM discos de Fe de 790[nm] de diámetro, 100[nm] de espesor, vista lateral.	17
2.7.	Imágenes SEM discos de Py de 260[nm] de diámetro, 50[nm] de espesor.	18
3.1.	Comparación curvas de histéresis de Fe medidas con VSM. a) Fe diámetro 790[nm], espesor 50[nm] y 100[nm]. b) Fe diámetro 790[nm] y 260[nm], espesor 50[nm]. c) Fe diámetro 260[nm], espesor 50[nm] y 100[nm]. d) Fe diámetro 790[nm] y 260[nm], espesor 100[nm].	23
3.2.	Comparación curvas de histéresis de Py medidas con VSM. a) Py diámetro 790[nm], espesor 50[nm] y 100[nm]. b) Py diámetro 790[nm] y 260[nm], espesor 50[nm]. c) Py diámetro 260[nm], espesor 50[nm] y 100[nm]. d) Py diámetro 790[nm] y 260[nm], espesor 100[nm].	24

3.3. Comparación curvas de histéresis de Fe medidas con VSM, discos suspendidos dentro del <i>ependorf</i> . a) Fe diámetro 790[nm], espesor 50[nm] y 100[nm]. b) Fe diámetro 790[nm] y 260[nm], espesor 50[nm]. c) Fe diámetro 260[nm], espesor 50[nm] y 100[nm]. d) Fe diámetro 790[nm] y 260[nm], espesor 100[nm].	26
3.4. Comparación curvas de histéresis de Py medidas con VSM, discos suspendidos dentro del <i>ependorf</i> . a) Py diámetro 790[nm], espesor 50[nm] y 100[nm]. b) Py diámetro 790[nm] y 260[nm], espesor 50[nm]. c) Py diámetro 260[nm], espesor 50[nm] y 100[nm]. d) Py diámetro 790[nm] y 260[nm], espesor 100[nm].	27
3.5. Imagen SEM de una pequeña área del sustrato con discos ya depositados de Fe de 260[nm] de diámetro y 100[nm] de espesor.	29
3.6. Cambio de forma en la curva de histéresis en los discos de Py de 790[nm] de diámetro y 50[nm] de espesor. Azul medida en película nanoestructurada, rojo medida en <i>ependorf</i> .	33
3.7. Cambio de forma en la curva de histéresis en los discos de Fe de 260[nm] de diámetro y 50[nm] de espesor. Azul medida en película nanoestructurada, rojo medida en <i>ependorf</i> .	34
3.8. Imagen del disco de 790[nm] utilizada para la simulación.	36
3.9. Imagen SEM de un disco de 790[nm] de diámetro.	36
3.10. Imagen del disco de 260[nm] utilizada para la simulación.	37
3.11. Imagen SEM de un disco de 260[nm] de diámetro.	37
3.12. Forma general del ciclo de histéresis de discos ferromagnéticos en estado vórtice. En la inversión del campo externo se produce la nucleación y un desplazamiento del vórtice hasta que se llega a la saturación y se aniquila.	39
3.13. Diagrama de fase para discos de Py. Eje X, espesor L sobre distancia de <i>exchange</i> . Eje Y, radio R sobre distancia de <i>exchange</i> .	39
3.14. Ciclo de histéresis simulado en Mumax, disco de Fe 50[nm] de espesor, 260[nm] de diámetro.	41
3.15. Seguimiento del proceso de magnetización en el ciclo de histéresis. Disco de Fe 50[nm] de espesor, 260[nm] de diámetro.	41
3.16. Ciclo de histéresis simulado en Mumax, disco de Fe 100[nm] de espesor, 260[nm] de diámetro.	42
3.17. Seguimiento del proceso de magnetización en el ciclo de histéresis. Disco de Fe 100[nm] de espesor, 260[nm] de diámetro.	42
3.18. Ciclo de histéresis simulado en Mumax, disco de Fe 50[nm] de espesor, 790[nm] de diámetro.	43

---

3.19. Seguimiento del proceso de magnetización en el ciclo de histéresis. Disco de Fe 50[nm] de espesor, 790[nm] de diámetro.	43
3.20. Ciclo de histéresis simulado en Mumax, disco de Fe 100[nm] de espesor, 790[nm] de diámetro.	44
3.21. Seguimiento del proceso de magnetización en el ciclo de histéresis. Disco de Fe 100[nm] de espesor, 790[nm] de diámetro.	44
3.22. Ciclo de histéresis simulado en Mumax, disco de Py 50[nm] de espesor, 260[nm] de diámetro.	45
3.23. Seguimiento del proceso de magnetización en el ciclo de histéresis. Disco de Py 50[nm] de espesor, 260[nm] de diámetro.	45
3.24. Ciclo de histéresis simulado en Mumax, disco de Py 100[nm] de espesor, 260[nm] de diámetro.	46
3.25. Seguimiento del proceso de magnetización en el ciclo de histéresis. Disco de Py 100[nm] de espesor, 260[nm] de diámetro.	46
3.26. Ciclo de histéresis simulado en Mumax, disco de Py 50[nm] de espesor, 790[nm] de diámetro.	47
3.27. Seguimiento del proceso de magnetización en el ciclo de histéresis. Disco de Py 50[nm] de espesor, 790[nm] de diámetro.	47
3.28. Ciclo de histéresis simulado en Mumax, disco de Py 100[nm] de espesor, 790[nm] de diámetro.	48
3.29. Seguimiento del proceso de magnetización en el ciclo de histéresis. Disco de Py 100[nm] de espesor, 790[nm] de diámetro.	48
3.30. Comparación de forma en las curvas de histéresis medidas en VSM como película nanoestructurada y en simulación. a) Fe 260[nm] de diámetro 50[nm] de espesor. b) Py 790[nm] de diámetro, 50[nm] de espesor.	50
3.31. Comparación de áreas dentro de las curvas de histéresis para el cálculo de energía disipada en discos de Fe de 260[nm] de diámetro y 50[nm] de espesor. Área sombreada, media integral de la histéresis. a) Histéresis obtenida mediante VSM, b) histéresis por simulación.	51
3.32. Comparación de áreas dentro de las curvas de histéresis para el cálculo de energía disipada en discos de Py de 790[nm] de diámetro y 50[nm] de espesor. Área sombreada, media integral de la histéresis. a) Histéresis obtenida mediante VSM, b) histéresis por simulación.	51
3.33. Imagen de amplitud MFM, disco de Py 1.6[ $\mu m$ ] de diámetro 50[nm] de espesor.	52
3.34. Imagen de amplitud MFM, filtro promedio 20 píxeles más cercanos, disco de Py 1.6[ $\mu m$ ] de diámetro 50[nm] de espesor.	52

- 3.35. Simulación y observación experimental del estado vórtice de discos de  $1[\mu m]$  de diámetro y  $50[nm]$  de espesor. a) Imágenes de MFM mostrando el desplazamiento del vórtice al aplicar campo magnético, primera fila contra reloj, segunda fila a favor de reloj. b) Imágenes del estado de magnetización de los discos obtenida mediante simulación OOMMF. [40]. 53
- 4.1. Esquemático del experimento para la observación del comportamiento de los discos en solución acuosa. Un láser es dirigido y focalizado hacia el *eppendorf* con los discos en suspensión para observar su comportamiento frente a campo magnéticos externos. Una vez pasado el *eppendorf* la señal es focalizada en el foto detector. 1) Fuente láser, 2) Apertura, 3) Colimador, 4) Espejo reflector, 5) Espejo reflector, 6) Lente focal, 7) Bobina, 8) Porta muestras, 9) Colimador, 10) Lente focal, 10) Fotodetector. 55
- 4.2. Alineación de los discos frente a un campo magnético externo. El haz pasa libremente, aumentando la señal del fotoreceptor. 56
- 4.3. Discos dispersos sin aplicar campo magnético. El haz choca contra los discos, disminuyendo la señal que llega al foto detector. 56
- 4.4. Esquema de producción del torque en los discos nano magnéticos. El torque es máximo cuando el ángulo de incidencia es de  $45^\circ$  [9]. 57
- 4.5. Medidas de intensidad de láser capturada con el fotodetector a  $1 [Hz]$  y a  $0.2[Hz]$ . Gráfico a), discos de Py de  $790[nm]$  de diámetro,  $50[nm]$  de espesor medidas a  $0.2[Hz]$ , gráfico b) discos de Py de  $790[nm]$  de diámetro,  $50[nm]$  de espesor medidas a  $1[Hz]$ . Gráficos i) Cambio de intensidad luminosa a través del tiempo, gráficos ii) deltas de amplitud a través del tiempo. 60
- 4.6. Formación de cadenas de discos de Py de  $[\mu m]$  aplicando un campo de  $40[Oe]$  a través del plano. a) Discos libres sin aplicación de campo magnético externo. b) Alineación y producción de cadenas frente a un campo magnético externo de  $40 [Oe]$ . c) Campo magnético apagado, desalineación de discos y doblamiento de cadenas 62
- 4.7. Formación de cadenas de discos de Py de  $[\mu m]$  aplicando un campo de  $40[Oe]$  dentro del plano. a) Discos dispersos sin campo magnético externo. b) Aplicación de campo magnético en el plano. Los discos se alinean en dirección del plano formando cadenas. c) Campo magnético apagado. Dispersión de los discos y de cadenas remanentes. 62

---

---

# CONTENIDO

<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>3</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>I</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>I</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>II</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN Y ESTADO DEL ARTE</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción	1
1.2. Estado del Arte	2
1.3. Desarrollo experimental	11
<b>2. PROCESO DE FABRICACIÓN</b>	<b>12</b>
2.1. Proceso de fabricación mediante litografía por interferencia y evaporación	12
2.1.1. Litografía	12
2.1.2. Evaporación	14
2.1.3. <i>Lift-off</i> y liberación	19
<b>3. CARACTERIZACIÓN MEDIANTE VSM Y SIMULACIÓN MICRO MAGNÉTICA</b>	<b>20</b>
3.1. VSM	21
3.1.1. VSM en película nanoestructurada	23
3.2. VSM en <i>ependorf</i>	26
3.3. Cálculo de discos y porcentaje de eficiencia	29
3.3.1. Análisis de resultados del VSM	30
3.3.2. Resultados VSM en película nanoestructurada	30
3.3.3. Resultados VSM en <i>ependorf</i>	31

3.3.4. Comparación de resultados en película nanoestructurada y en <i>eppendorf</i>	32
3.4. Mumax	35
3.4.1. Simulación mediante Mumax	35
3.4.2. Resultados Mumax	38
3.4.3. Fe 260[nm] de diámetro, 50[nm] de espesor	41
3.4.4. Fe 260[nm] de diámetro, 100[nm] de espesor	42
3.4.5. Fe 790[nm] de diámetro, 50[nm] de espesor	43
3.4.6. Fe 790[nm] de diámetro, 100[nm] de espesor	44
3.4.7. Py 260[nm] de diámetro, 50[nm] de espesor	45
3.4.8. Py 260[nm] de diámetro, 100[nm] de espesor	46
3.4.9. Py 790[nm] de diámetro, 50[nm] de espesor	47
3.4.10. Py 790[nm] de diámetro, 100[nm] de espesor	48
3.4.11. Comparación de resultados de VSM en película nanoestructurada con simulaciones micromagnéticas	49
3.4.12. Observación de la estructura magnética de discos de Py de 1.6[ $\mu$ m] de diámetro 50[nm] de espesor con el uso de MFM	52
<b>4. COMPORTAMIENTO DE LOS DISCOS EN SOLUCIÓN ACUOSA</b>	<b>54</b>
4.1. Medidas de dinámica de discos en agua	59
4.1.1. Medidas de 0.2[Hz] y 1[Hz]	60
<b>5. CONCLUSIONES</b>	<b>63</b>
<b>6. TRABAJOS FUTUROS</b>	<b>65</b>
<b>A. CÓDIGOS MUMAX PARA SIMULACIÓN MICRO MAGNÉTICA Y CÁLCULO DE NÚMERO DE DISCOS</b>	<b>66</b>
A.1. Parámetros de deposición	67
A.2. Códigos Mumax	69
A.2.1. 191022_50nm_Fe	69
A.2.2. 191022_100nm_Fe	70
A.2.3. 191022_50nm_Py	71
A.2.4. 191022_100nm_Py	72
A.2.5. 100920_50nm_Fe	73
A.2.6. 100920_100nm_Fe	74
A.2.7. 100920_50nm_Py	75
A.2.8. 100920_100nm_Py	76

---

A.3. Cálculo de discos	77
A.3.1. Fe 790[nm] de diámetro, 50[nm] de espesor	77
A.3.2. Fe 790[nm] de diámetro, 100[nm] de espesor	78
A.3.3. Fe 260[nm] de diámetro, 50[nm] de espesor	79
A.3.4. Fe 260[nm] de diámetro, 100[nm] de espesor	80
A.3.5. Py 790[nm] de diámetro, 50[nm] de espesor	81
A.3.6. Py 790[nm] de diámetro, 50[nm] de espesor	82
A.3.7. Py 260[nm] de diámetro, 100[nm] de espesor	83
A.3.8. Py 260[nm] de diámetro, 100[nm] de espesor	84
<b>REFERENCIAS</b>	<b>85</b>

# INTRODUCCIÓN Y ESTADO DEL ARTE

## 1.1. Introducción

Las nanopartículas magnéticas son un elemento investigado en el área de la biomedicina para su uso en terapias contra el cáncer [1], reparto de fármacos en ambientes biológicos, manipulación celular y agentes de contraste. Gracias a su fácil manipulación con un campo magnético externo, es posible aplicar torques y procesos de hipertermia, propiedades críticas al momento de ser utilizadas en células cancerígenas para su destrucción [2] [3].

Dentro de las variedades de nanopartículas existentes, se pueden encontrar las nanoesferas como las del tipo SPION (*superparamagnetic iron oxide nanoparticles*) [4] y en nanoestructuras, particularmente como nanodiscos, como son el caso de los SAF (*Synthetic antiferro magnetic*) y vórtice (*vortex*).

Las nanopartículas de tipo SPION son altamente utilizadas para terapias gracias a su baja remanencia, evitando así las aglomeraciones, pero tienen la limitación de presentar momentos magnéticos pequeños, un tamaño de unos cuantos nanómetros, su proceso de fabricación química impide regularidad en la obtención de tamaños regulares y una producción en masa, y no son viables para procesos de terapia magnetomecánica debido a que por su forma no pueden producir torques.

Los discos SAF y vórtice por su parte, además de ser fabricados bajo técnicas litográficas que permiten un ajuste preciso y una producción en grandes cantidades, presentan un alto momento magnético, una baja remanencia y coercitividad, no producen aglomeraciones y a los efectos de hipertermia se le agregan los de la terapia magnetomecánica por la posibilidad de aplicar torque.

Para poder utilizar los discos en ambientes biológicos es necesario un proceso de funcionalización. En este proceso los discos son recubiertos con una capa protectora a la que se le adhieren agentes como péptidos, anticuerpos, aptámeros y otras moléculas afines [5].

En el presente trabajo se hace un estudio exhaustivo de discos en estado vórtice de Fe y Py fabricados con técnicas litográficas. Se explicará detalladamente el proceso de fabricación y caracterización magnética, la cual será apoyada con simulaciones micromagnéticas. Finalmente se mostrará un estudio de comportamiento en solución acuosa para observar la evolución de los discos frente a la aplicación de un campo magnético externo.

## 1.2. Estado del Arte

A continuación se describen las investigaciones realizadas en fabricación, caracterización y funcionalización de nanodiscos magnéticos para usos biológicos.

Lo primero a tener en cuenta son las diferentes aproximaciones que se pueden tomar al momento de fabricar nanodiscos magnéticos. Principalmente se clasifican en tres diferentes tipos: SAF con anisotropía magnética en el plano [6], P-SAF con anisotropía magnética fuera del plano [7] y discos en estado vórtice que presentan los momentos magnéticos en forma de remolino [8].

Los discos SAF están compuestos por dos materiales ferromagnéticos separados por un espaciador no magnético y recubiertos por un material no magnético protector ante la oxidación. Con un espesor crítico en el espaciador, se logra un acoplamiento entre las dos capas ferromagnéticas, logrando así que las capas ferromagnéticas tengan magnetizaciones opuestas cancelándose una con la otra. Sin embargo, cuando un campo magnético externo es aplicado, los momentos apuntan en la misma dirección logrando la saturación en el material. Los discos P-SAF (*Perpendicular Synthetic antiferromagnetic disks*), presentan un comportamiento parecido a los SAF solo que los momentos magnéticos están orientado en dirección perpendicular. Y por último los discos en estado vórtice, los cuales se componen de una capa ferromagnética recubierta entre dos capas de material no magnético que protegen de la oxidación [9]. Los discos en estado vórtice presentan sus momentos magnéticos en forma de torbellino de forma fundamental, lo cual sumando en todas las direcciones produce un momento nulo en el plano. Cuando un campo magnético externo es aplicado, los

momentos se realinean en dirección del campo, produciendo un desplazamiento en el torbellino hasta que este desaparece y satura. En el ciclo de histéresis esto se observa como dos ciclos con coercitividades en los extremos cerca de la saturación y una remanencia y coercitividad nula a campo cero. La obtención del estado vórtice depende de la geometría y las proporciones entre el espesor y el diámetro del disco.

La distribución de los momentos magnéticos y los ciclos de histéresis ideales se pueden observar en la figura 1.1.

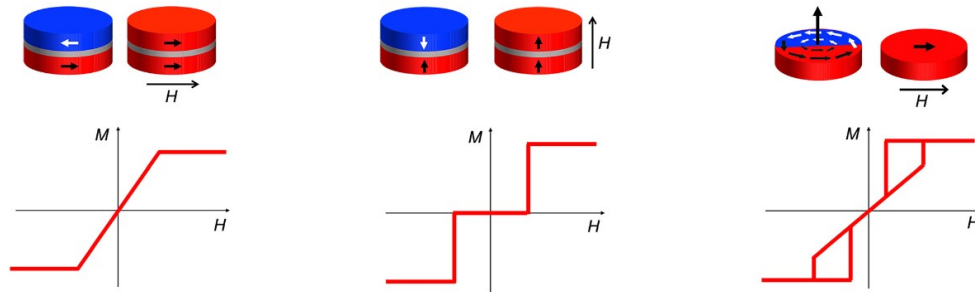


Figura 1.1: Ejemplo de las configuraciones magnéticas en la fabricación de nanodiscos. De izquierda a derecha, discos *SAF* con magnetización en el plano, discos *P-SAF* con magnetización fuera del plano, discos en estado vórtice. [9].

Las formas de fabricación varían dependiendo de los tipos de discos y las técnicas disponibles.

Para los procesos de patronaje de los discos existen *Optical lithography* [10], *Electron beam lithography* [11], *Interference lithography* [12], *Nanoimprinting* [13] y *HCL (Hole-mask colloidal lithography)* [14] entre los principales.

Y para la deposición de material se encuentran, *Magnetron sputtering* [15], *Thermal evaporation* [16], *Electron beam evaporation* [17], *Molecular beam epitaxy* [18] y *Solvo thermal synthesis* [19].

Los sistemas de destrucción celular que se buscan utilizar con los nanodiscos abarcan los procesos de hipertermia y terapia magnetomecánica.

En el proceso de hipertermia [8], se busca elevar la temperatura del medio gracias a una acción térmica. Cuando los discos se encuentran bajo un campo AC (50[Hz] - 500[Khz]) y tiene un tamaño acorde a la célula donde se aplica, estos producen calor debido a la histéresis magnética. El objetivo es alcanzar temperaturas cercanas a los 40<sup>o</sup>[C] en el interior de células cancerígenas para lograr su ablación por estos mismos efectos. En los gráficos de la figura 1.2 se observan los ciclos de histéresis de discos en estado vórtice de diferentes diámetros y espesores junto con las respectivas pérdidas de energía. Estas pérdidas de energía tienen directa relación con la capacidad de generación térmica de los discos durante la histéresis.

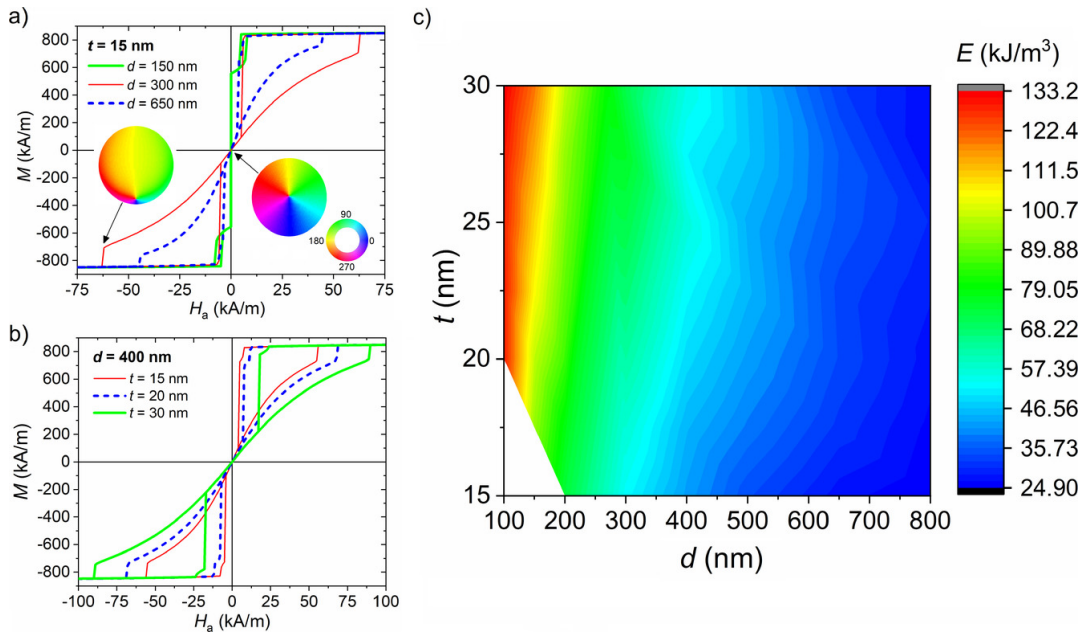


Figura 1.2: a) Ciclos de histéresis de discos de Py en estado vórtice. Espesor fijo de 15[nm], variación en el diámetro. b) Diámetro fijo de 400[nm], variación en los espesores. c) Diagrama de pérdida de energía en los ciclos de histéresis en función del diámetro (eje x) y espesor(eje y). Área en blanco, discos que no presentan vórtice. [8].

Un ejemplo claro de los efectos de hipertermia utilizando nanodiscos en ambientes biológicos se puede observar en la figura 1.3. Dosis de nanodiscos de 150[nm] de diámetro y 25[nm] de espesor son aplicados a diferentes órganos de un roedor y fueron observados los efectos de estos en el organismo. Los gráficos muestran las diferencias de temperatura producidas en diferentes órganos y dosis a lo largo del objeto de prueba.

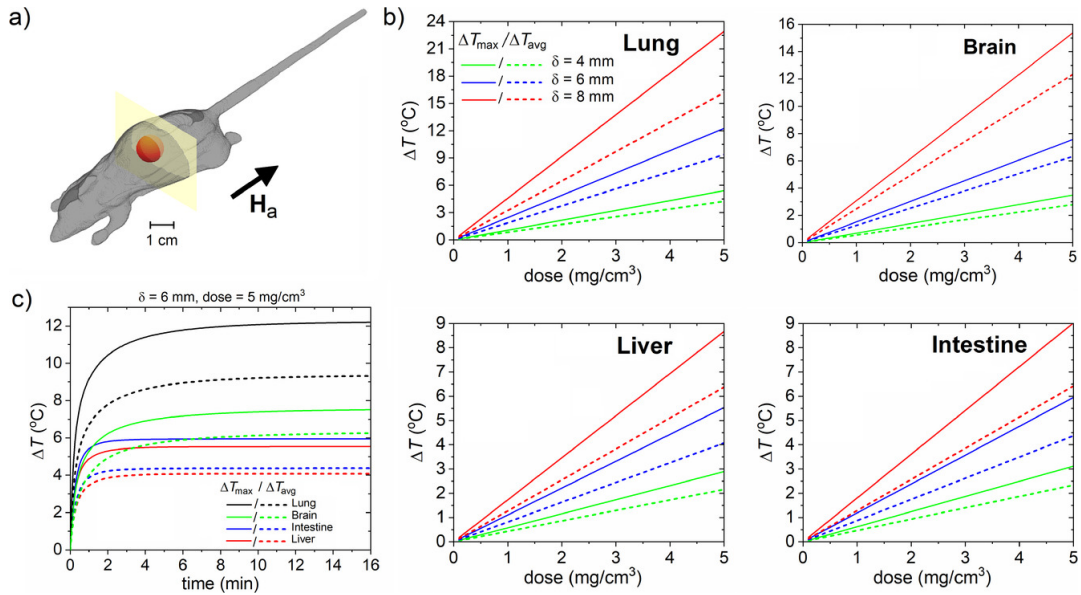


Figura 1.3: a) Modelo de roedor al cual se le aplicaron nanodiscos de Py de 150[nm] de diámetro y 25[nm] de espesor. Campo magnético alterno en la dirección  $H_a$ . b) Gráficos de variación máxima de temperatura en diferentes órganos por dosis y área de aplicación. c) Transientes de calor para diferentes órganos, fijando dosis y área [8].

Por su parte en la terapia magneto mecánica [2], se busca que la acción del movimiento de los nanodiscos en las paredes celulares o en los organelos, inicié un proceso de apoptosis o necrosis celular, llevando a la muerte de las células selectas. Estos se puede llevar a cabo a través de la aplicación de un campo magnético externo para aplicar torque a los nanodiscos. Este campo magnético, dependiendo de la forma que es aplicado, puede producir oscilaciones, desplazamientos o rotaciones completas a los nanodiscos [20]. En la figura 1.4 se pueden observar algunos métodos de aplicación del campo magnético para inducir estos movimientos.

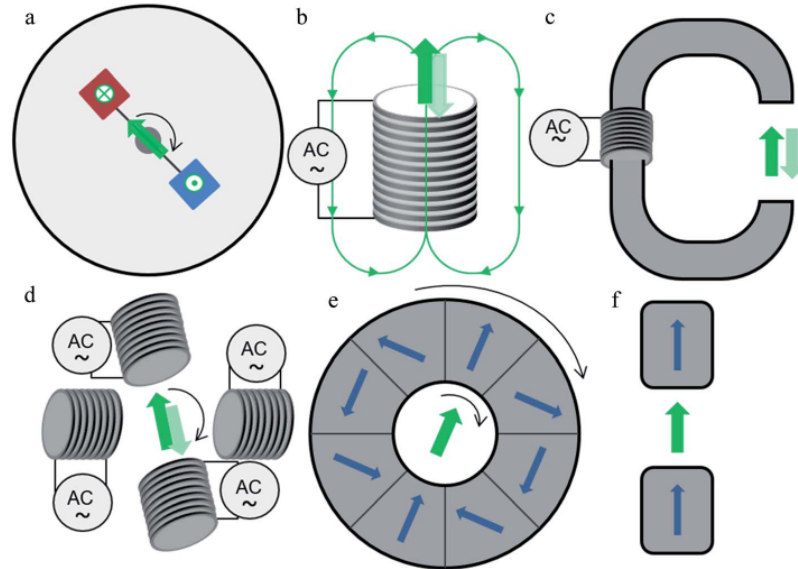


Figura 1.4: Diagramas de sistemas para la aplicación de campo magnético. a) Sistema de imanes con eje central rotatorio. b) Electroimán con corriente alterna para generación de campos magnéticos alternos. c) Electroimán con guía de ferrita para localización del campo magnético. d) Electroimán vectorial. e) Configuración Halbach para reforzamiento de un campo magnético homogéneo al interior del cilindro. f) Configuración de imanes contiguos para un campo lineal permanente [20].

Los principales trabajos desarrollados en esta temática combinan una serie de técnicas de deposición y de patronaje para la fabricación de los discos. Dentro de los trabajos a destacar se encuentran los de [21] donde utilizan una combinación de litografía por interferencia y evaporación por haz de electrones para la fabricación de discos en estado vórtice, [22] combina *HCL* (*hole-mask colloidal lithography*) con *sputtering* para crear discos en estado vórtice, [23] realiza *nanoimprinting* con evaporación térmica para fabricar discos en configuración *SAF* y finalmente [24] donde los discos son fabricados directamente con el método químico de síntesis solvo termal.

En el artículo “*Cost-effective design of high-magnetic moment nanostructures for biotechnological applications*” [21] se describe el proceso de fabricación y caracterización de nanodiscos de permalloy (Py) en estado vórtice de 650[nm] con el uso de litografía por interferencia (*Interference Lithography IL*). En el artículo se describen dos procesos de litografía, por resina positiva, en la cual se marcan pilares de resina en el sustrato donde luego es depositado el material ferromagnético, y por resina negativa, en donde se marcan las geometrías de los discos en la resina y luego el

material es depositado en la cavidades marcadas. Los dos métodos se pueden observar en la figura 1.5. Finalmente la caracterización magnética se realiza mediante MOKE (Magnetic Optic Kerr Effect) [25].

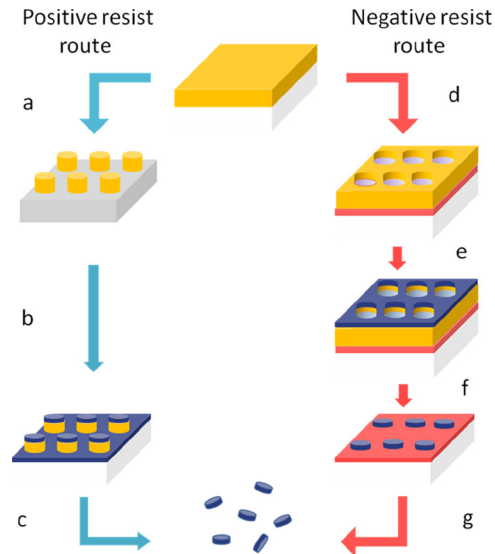


Figura 1.5: Proceso de litografía por interferencia. Ruta izquierda aplicando resina positiva, ruta derecha aplicando resina negativa. [21].

Frente a lo que es un tipo de fabricación de discos *SAF*, en [23] se describe el proceso de patronaje para discos de Fe/Ti a través de la técnica de *nanoimprinting* y la deposición por evaporación. Como primer paso, una capa de Durimide es aplicada sobre una oblea de silicio utilizando *spin-coating*. Luego, dos capas resistivas de PMGI y PMMA son aplicadas a través de *spin-coating*. Una vez lista la estructura del sustrato, el patronaje es realizado presionando las resinas con una oblea de silicio a  $180^{\circ}\text{C}$  a  $40\text{[bar]}$  de presión durante  $60\text{[seg]}$ . Esta oblea de silicio se encuentra nanoestructurada con pilares de  $150\text{[nm]}$  de alto y  $50\text{[nm]}$  de grosor, dando como resultado agujeros en la resina del sustrato.

Tras el proceso de patronaje, los residuos de *PMMA* son removidos con el uso de plasma y un *undercut* es realizado para mejorar el perfil del *PMGI*.

Finalmente el Fe y el Ti son depositados a través de evaporación. El proceso de *lift-off* es realizado con acetona y ultrasonido, y la liberación de los discos del sustrato disolviendo la Durimide en una solución de NMP. Un esquema del proceso se puede observar en la figura 1.6.

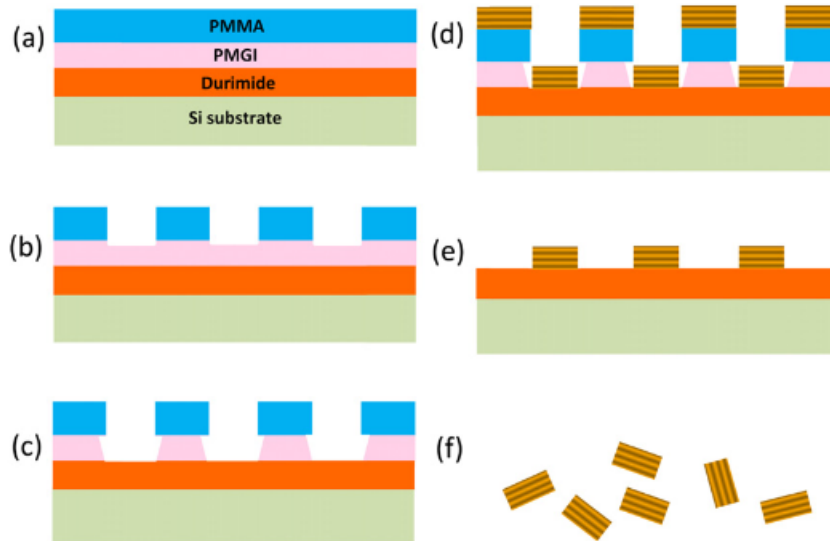


Figura 1.6: a) Sustrato con la capa de sacrificio de Durimide y las capas resistivas. b) Proceso de patronaje con la oblea de silicio con nano pilares. c) *Undercut* de la capa de PMGI para mejoramiento del perfil. d) Deposición de material mediante evaporación. e) Proceso de *lift-off*. f) Liberación. [23].

Otra técnica utilizada se presenta en el trabajo "*High-yield fabrication of 60[nm] permalloy nanodiscs in well-defined magnetic vortex state for biomedical application*" [22] es la de HCL o *hole-mask colloidal lithography*. En este trabajo, se crea un patrón sobre un sustrato con una película delgada de *PMMA* en la cual pequeñas esferas de poliestireno son repartidas equitativamente sobre la superficie con el uso de un ionizador *PDDA* (*poly diallydimethylammonium chloride*). Una primera capa de titanio es aplicada mediante *sputtering* para comenzar la formación del patronaje. Tras esta primera capa, las esferas con titanio son removidas de la superficie utilizando un adhesivo removible sensible a la presión. Con las esferas removidas, un patrón de pequeños círculos es formado sobre la película de titanio dejando expuesto el *PMMA*, el cual luego es removido. Con el patrón ya creado y el *PMMA* removido de los huecos, el permalloy es depositado mediante *sputtering*, rellenando los pequeños círculos. Finalmente la capa completa de *PMMA* y titanio es removida, dejando como resultado discos de permalloy de 60[nm] de diámetro y 50[nm] de espesor sobre la superficie del sustrato. El proceso completo se deja ver en la figura 1.7.

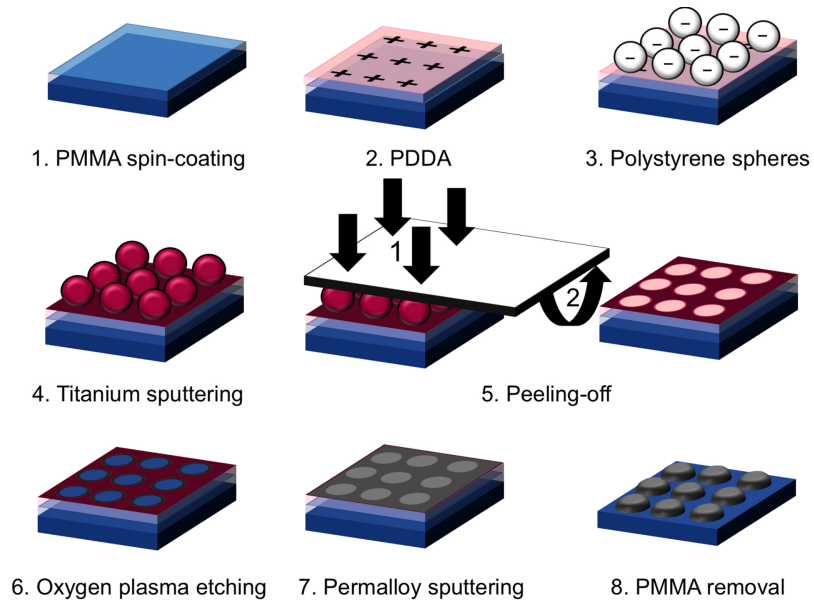


Figura 1.7: Proceso de la técnica *HCL* para la creación de discos de permalloy. Una primera capa de *PMMA* es aplicada sobre el sustrato, luego el ionizador es aplicado y las esferas repartidas sobre la superficie. Una primera capa de titanio es aplicada y las esferas son removidas con el uso de un adhesivo. El *PMMA* expuesto es removido y una capa de permalloy es aplicada. Finalmente se elimina todo el *PMMA* de la superficie, dejando solo los discos de permalloy sobre la superficie. [22].

Discos de magnetita de entre 98-226[nm] de diámetro y entre 24-37[nm] de espesor, han sido desarrollados por la técnica de evaporación solvotermal [24]. En este proceso un precursor, en este caso hematita, es calentada junto a un solvente en un sistema cerrado por sobre el punto de ebullición, aumentando la presión en el medio y fomentando la interacción entre los componentes. Una vez completado el proceso, discos de hematita son formados los que luego son reducidos a discos de magnetita. Los discos resultantes tienen estado vórtice. Un resumen del proceso anterior es mostrado en la figura 1.8.

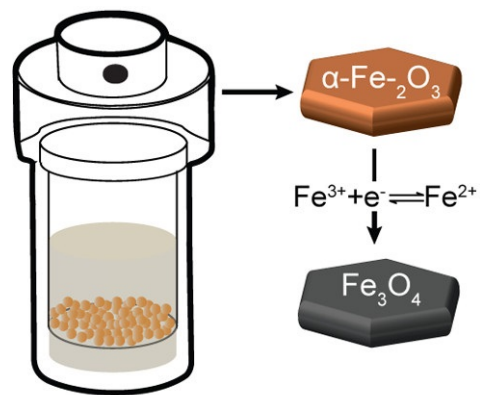


Figura 1.8: Proceso de fabricación de nanodiscos de magnetita a través de evaporación solvotermal. [24].

### 1.3. Desarrollo experimental

En el presente trabajo se fabricaron nanodiscos magnéticos de dos diámetros, dos espesores y dos materiales diferentes, hierro y permalloy. Las técnicas que se utilizaron para el proceso de patronaje y fabricación serán las de litografía por interferencia y evaporación por haz de electrones. En el proceso litográfico será utilizada resina negativa, para así una vez hecho el patronaje, la deposición sea efectuada en los espacios marcados en el sustrato. Tras la deposición, el proceso de *lift-off* es efectuado para eliminar los restos de resina y dejar solo los discos depositados en el sustrato.

Para corroborar la calidad de las deposiciones, mediciones *SEM* (*Scanning Electron Microscope*) son llevadas a cabo. Tras la fabricación, se realizará la caracterización magnética de las muestras mediante VSM (*Vibrating Sample Magnetometer*) observando de esta manera los ciclos de histéresis y obtener su magnetización total. En paralelo, simulaciones micromagnéticas con el uso del software Mumax [26] se realizan para comparar el comportamiento magnético ideal de los nano discos con los resultados experimentales. Para las simulaciones micro magnéticas, se tomarán como base geométrica las imágenes tomadas con el *SEM*.

Una vez listo el proceso de caracterización de los discos en película nanoestructurada, estos son llevados al proceso de liberación, donde se desprenden los discos del sustrato y son depositados en *ependorf* en volúmenes de 1[ml]. Tras la liberación, nuevamente son llevados a VSM para observar sus características magnéticas.

Finalmente se realiza un experimento en que se observará el comportamiento dinámico de los discos en agua frente a un campo magnético externo.

# PROCESO DE FABRICACIÓN

## 2.1. Proceso de fabricación mediante litografía por interferencia y evaporación

### 2.1.1. Litografía

El proceso de fabricación de los nanodiscos parte por el patronaje de los mismos sobre una resina negativa depositada en una capa de sacrificio sobre una oblea de silicio.

Una capa antireflectiva (*antireflective coating ARC*) WIDE-8B (*Brewer Science*) es aplicada con *spin coating* a 5000 [rpm] durante 60 segundos y calentada en un *hotplate* en dos pasos, 40 segundos a 100<sup>o</sup>[C] y luego 60 segundos a 180<sup>o</sup>[C]. Tras la aplicación de esta primera capa, se aplica resina negativa TSMR-IN027 (*Ohka*) sobre el ARC a 4000 [rpm] durante 60 segundos, seguido por un paso de calentamiento a 90<sup>o</sup>[C] durante 90 segundos, obteniendo así una capa de 280[nm] de resina.

El proceso de litografía se realiza mediante litografía por interferencia con el uso de un espejo Lloyd. Un láser de He-Cd ( $\lambda = 325\text{nm}$ ) es dirigido con el uso de espejos hasta un filtro espacial, el cual expande el haz hasta la base giratoria donde se encuentra el sustrato y el espejo. La configuración del espejo se observa en la figura 2.1 y el equipamiento real en la figura 2.2.

La periodicidad del patrón formado depende del ángulo entre el eje horizontal del láser y el espejo, y puede ser calculado a partir de este ángulo y de la longitud de onda del láser. La fórmula viene dada por la ecuación 2.1.1, donde P es el periodo del patrón,  $\lambda$  la longitud de onda del láser y  $\theta$  el ángulo formado.

$$P = \frac{\lambda}{2\text{Sin}\theta} \quad (2.1.1)$$

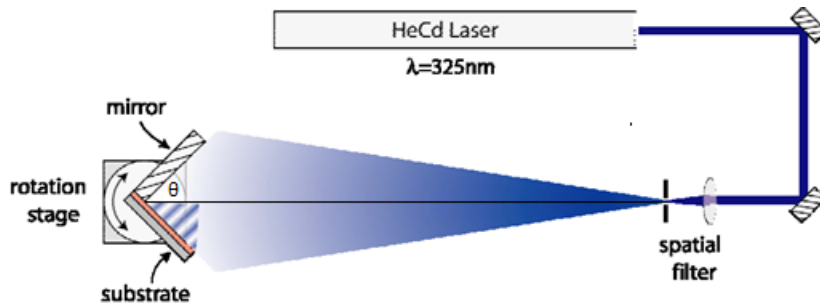


Figura 2.1: Configuración de la óptica para el proceso de litografía por interferencia.

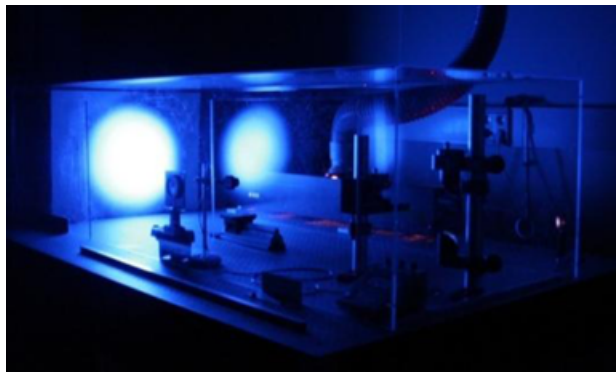


Figura 2.2: Equipo de litografía utilizado para la creación del patrón en la resina.

Tras una primera exposición se forma un patrón de barras sobre la resina, lo cual es debido a que el patrón de interferencia solo produce destrucción o construcción del haz de luz. Para producir puntos, hay que realizar una rotación del sustrato en  $90^\circ$ , de esta manera se realiza una exposición cruzada con el sustrato. Es importante destacar los efectos de los tiempos de exposición del sustrato frente al láser. A mayores tiempos de difusión se lograrán estructuras más cuadradas y menores tiempos de difusión estructuras más circulares [27]. La resina expuesta es luego posteriormente horneada a  $110[\text{C}^\circ]$  por un minuto y expuesta al revelador AZ 736 MIF (*MicroChemicals*), produciendo así el arreglo de *anti-dots*.

En este trabajo se fabricaron discos de  $790[\text{nm}]$  y  $260[\text{nm}]$ . Los valores de ángulo utilizados y los periodos obtenidos son mostrados en la tabla 2.1.

Ángulo $\theta$	20.59°	7,76°
Periodo	462[nm]	1251[nm]
Diámetro del disco	260[nm]	790[nm]

Tabla 2.1: Valores calculados de periodo y ángulo para los discos fabricados

### 2.1.2. Evaporación

Tras la fabricación del patrón de resina, se deposita el material del que estarán formados los discos. Los discos están conformados por una capa de sacrificio de aluminio, una primera capa exterior de titanio para protegerlos de la oxidación, una capa intermedia ferromagnética de hierro o permalloy para los dos diferentes tipos de discos y una segunda capa exterior.

La deposición se realiza mediante evaporación con haz de electrones. En un crisol se colocan los trozos de material que se desean depositar y una corriente controlada con una potencia de 25[kV] es dirigida hacia el crisol con el uso de un campo magnético. El haz de electrones calienta el material hasta la lograr la evaporación, depositándose sobre la muestra colocada en la parte superior de la cámara.

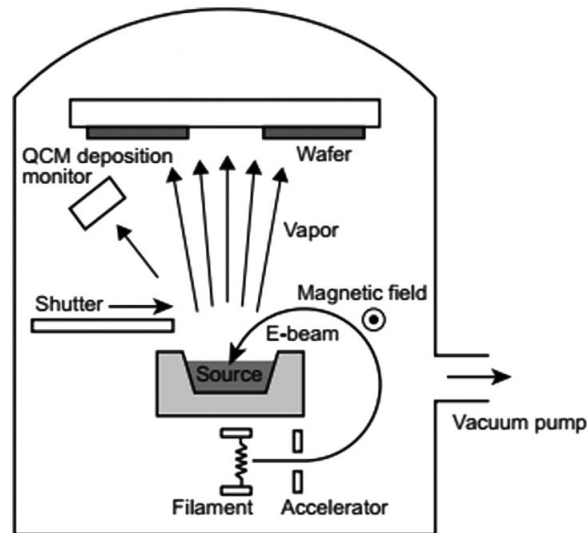


Figura 2.3: Esquema de funcionamiento del evaporador por haz de electrones. Un filamento emite electrones los cuales son redirigidos con el uso de un campo magnético hacia el crisol. El material es evaporado y depositado sobre la muestra. [17].

En este trabajo, los materiales elegidos fueron el hierro y el permalloy debido a sus altas permeabilidades magnéticas, su fácil manipulación en el evaporador y su compatibilidad biológica. Para los estudios requeridos, se fabricaron discos de dos diámetros y espesores diferentes. Teniendo en cuenta todo lo anterior, da un total de ocho tipos diferentes de discos los cuales se crean en cuatro procesos de deposición.

En el sistema de deposición se pueden colocar hasta cuatro materiales diferentes, por lo que se preparan los crisoles con el Al, Ti y Fe. Ya preparados los materiales se puede cerrar la cámara y generar vacío. Un nivel óptimo de vacío es del orden de los  $10^{-6}$  [bar].

El primer paso es encender la bomba mecánica para obtener un nivel de vacío previo para que se pueda usar la bomba turbo molecular. Con la bomba turbo molecular se logran obtener niveles de vacío para la evaporación. Una vez alcanzado el vacío óptimo y teniendo el *shutter* cerrado, se selecciona el material a depositar y se enciende el haz de electrones. La corriente del haz es controlada a través de un potenciómetro externo, donde la corriente es aumentada en pequeños pasos tanto para la estabilidad del haz como también para tener una evaporación controlada. Ya alcanzada la corriente necesaria y una evaporación constante, se abre el *shutter*, se expone la muestra al material evaporado y se controla el espesor observando la balanza de cuarzo. La balanza de cuarzo tiene que ser configurada a partir de la densidad del material a depositar a través de un factor llamado *tooling factor*. Una vez alcanzado el espesor deseado, se cierra el *shutter*, se baja la corriente del haz lentamente hasta llegar a cero y se deja enfriar el crisol. Terminado esto, se cambia de material y se repite el proceso hasta completar el *stack* deseado.

El primer material a depositar es la capa de Al que se utiliza como sacrificio. La capa de sacrificio sirve como base para depositar lo que serán los discos. Esta capa en el proceso de liberación, se disuelve para poder desprender los discos del sustrato. En todos los casos se deposita un espesor de 50[nm]. Luego de la capa de sacrificio, viene la capa protectora a la oxidación. Se deposita un espesor de 5[nm] de Ti para todos los casos.

Luego de las capa de sacrificio y de la capa protectora, viene la de material ferromagnético. Para los dos diámetros de discos disponibles, se depositaron dos diferentes espesores, 50[nm] y 100[nm] de Fe, 50[nm] y 100[nm] de Py, dando como resultado un total de ocho tipos de discos diferentes.

Los ocho discos fueron fabricados en cuatro procesos de deposición. Dos sustratos de silicio con patronaje son colocados por *holder*. Al momento de depositar el material magnético, uno de los sustratos es expuesto la mitad del tiempo, cerrando el *shutter* parcialmente, de esta manera se logran los dos espesores en una sola deposición.

Los discos resultantes son:

Fe 790[nm] diámetro, 50[nm] de espesor	Py 790[nm] diámetro, 50[nm] de espesor
Fe 790[nm] diámetro, 100[nm] de espesor	Py 790[nm] diámetro, 100[nm] de espesor
Fe 260[nm] diámetro, 50[nm] de espesor	Py 260[nm] diámetro, 50[nm] de espesor
Fe 260[nm] diámetro, 100[nm] de espesor	Py 260[nm] diámetro, 100[nm] de espesor

Tabla 2.2: Discos resultantes en el proceso de fabricación. Discos de Fe y Py de 790[nm] y 260[nm] de diámetro, espesores 50[nm] y 100[nm].

Los parámetros de deposición de las ocho muestras se encuentran en las tablas del apéndice A.1.

Una vez depositados los discos, se toman imágenes SEM para corroborar la geometría y la calidad de la deposición. La imagen 2.4 y 2.5 corresponden a discos de Fe de 790[nm] de diámetro y 50[nm] de espesor, la imagen 2.6 a discos de Fe de 790[nm] de diámetro y 100[nm] de espesor y la imagen 2.7 corresponde a discos de Py de 790[nm] de diámetro y 50[nm] de espesor.

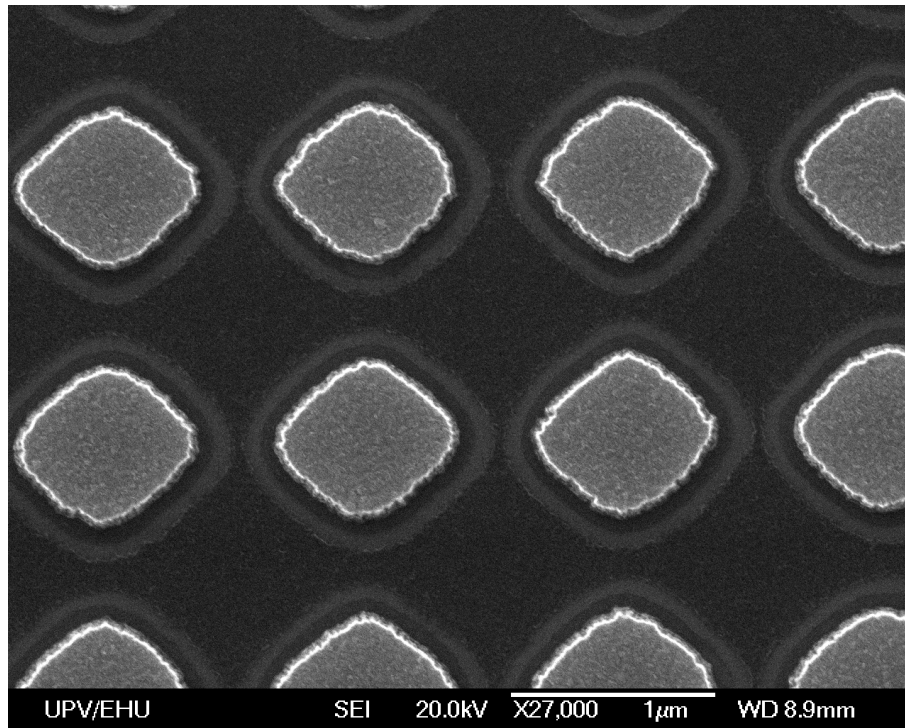


Figura 2.4: Imágenes SEM discos de Fe de 790[nm] de diámetro, 50[nm] de espesor.

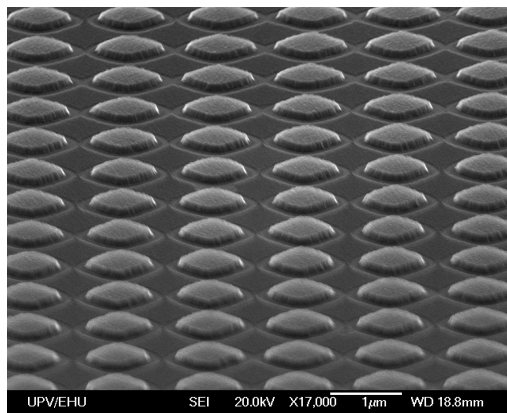


Figura 2.5: Imágenes SEM discos de Fe de 790[nm] de diámetro, 50[nm] de espesor, vista lateral.

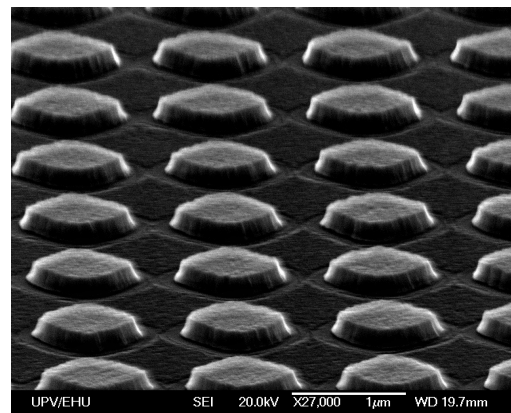


Figura 2.6: Imágenes SEM discos de Fe de 790[nm] de diámetro, 100[nm] de espesor, vista lateral.

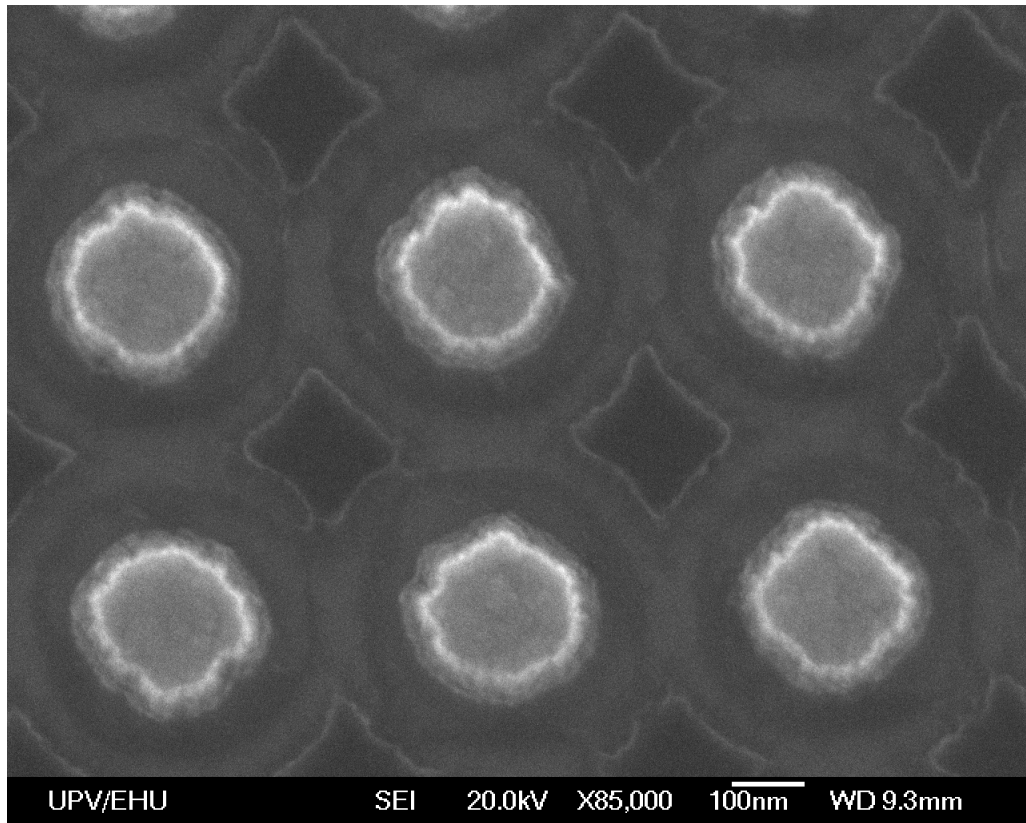


Figura 2.7: Imágenes SEM discos de Py de 260[nm] de diámetro, 50[nm] de espesor.

Se puede observar en las imágenes SEM el efecto producido sobre la geometría por el proceso de litografía por interferencia. Los discos de mayor tamaño tiene una forma más cuadrada que los de menor tamaño debido al mayor tiempo de exposición al haz. A pesar de este defecto esperado, el cual tiene un grado menor en la funcionalización, la fabricación de los discos fue exitosa, logrando fabricar los discos deseados para el posterior análisis.

Una vez corroborada la correcta fabricación, los sustratos son llevados al VSM para realizar una caracterización magnética de los discos antes de ser liberados. Los resultados son discutidos en el capítulo 3.

### 2.1.3. *Lift-off* y liberación

Terminado el proceso de evaporación y corroborado la formación correcta de los discos, la resina expuesta es retirada y los discos liberados.

El proceso de *lift-off* consiste en eliminar toda la resina restante del sustrato una vez ya depositado. Para ellos se utilizan solventes químicos específicos dependiendo de la resina. De esta manera solo, queda en el sustrato los discos depositados.

El proceso de *lift-off* se realiza primero sumergiendo el sustrato en una solución de NMP (*N-Methyl-2-pyrrolidone*) durante unos minutos a 125<sup>o</sup>[C] seguidos de baños de ultrasonido. El proceso se repite hasta observar que la mayoría de la resina es levantada.

Una vez retirada la resina, se tiene que eliminar la capa de sacrificio de aluminio sobre la cual se fabricaron los discos. En la liberación los discos son extraídos del sustrato y suspendidos en agua.

La capa de sacrificio de Al es atacada utilizando una solución de KOH (*Potassium hydroxide*) al 15 % seguida por un baño de ultrasonido de 10 minutos. Una vez liberado los discos, estos son lavados varias veces con agua estéril para eliminar la toxicidad de las soluciones y luego transferidos a *ependorfs* en cantidades de 0.1 [mL].

# CARACTERIZACIÓN MEDIANTE VSM Y SIMULACIÓN MICRO MAGNÉTICA

Uno de los puntos importantes tras la fabricación, es corroborar las características magnéticas de los discos fabricados. Remanencia, coercitividad, magnetización de saturación, son las propiedades magnéticas que se buscan medir. Estas propiedades darán información importante sobre la calidad de los discos fabricados. Una menor remanencia impide la auto aglomeración de los discos ayudando la fagocitación y una menor coercitividad, mayor magnetización y mayor susceptibilidad, ayuda a un mayor torque para las terapias magnetomecánicas.

Para la observación de los parámetros magnéticos, los nanodiscos fabricados son caracterizados con el uso de VSM antes y después del proceso de liberación. En paralelo, se simula el comportamiento magnético de los discos mediante Mumax y se compara el comportamiento magnético ideal con el medido en el VSM. En total se realizaron un total de ocho simulaciones, una por cada tipo de disco fabricado.

1. Discos de 790[nm] de diámetro.
  - Fe 50[nm]
  - Fe 100[nm]
  - Py 50[nm]
  - Py 100[nm]
2. Discos de 260[nm] de diámetro.
  - Fe 50[nm]
  - Fe 100[nm]
  - Py 50[nm]
  - Py 100[nm]

### 3.1. VSM

El equipo de VSM es utilizado para obtener los parámetros magnéticos de los nanodisco en película nanoestructurada y liberados en los *eppendorfs*.

Para medir los discos en película nanoestructurada, la muestra es colocada en una varilla de manera que el campo se aplique en el plano. Para el caso de los discos ya liberados en el *eppendorf*, una varilla es colocada dentro del *eppendorf* formando una especie de tapa que lo sostiene. Para este caso, la posición del *eppendorf* con respecto al campo aplicado es arbitraria.

Con los resultados de las mediciones se logra medir la coercitividad, remanencia, campo de saturación, imanación y número de discos.

Las medidas correspondientes se pueden ver en los gráficos en listados a continuación, donde se hace la comparación entre diferentes diámetros de discos y los diferentes espesores.

- VSM en película nanoestructurada.
  - Fe figura 3.1
    - a) Fe 790[nm], espesor 50[nm] y 100[nm]
    - b) Fe 790[nm] y 260[nm], espesor 50[nm]
    - c) Fe 260[nm], espesor 50[nm] y 100[nm]
    - d) Fe 790[nm] y 260[nm], espesor 100[nm]
  - Py figura 3.2
    - a) Py 790[nm], espesor 50[nm] y 100[nm]
    - b) Py 790[nm] y 260[nm], espesor 50[nm]
    - c) Py 260[nm], espesor 50[nm] y 100[nm]
    - d) Py 790[nm] y 260[nm], espesor 100[nm]
- VSM en *eppendorf*.
  - Fe figura 3.3
    - a) Fe 790[nm], espesor 50[nm] y 100[nm]
    - b) Fe 790[nm] y 260[nm], espesor 50[nm]
    - c) Fe 260[nm], espesor 50[nm] y 100[nm]
    - d) Fe 790[nm] y 260[nm], espesor 100[nm]
  - Py figura 3.4

- a) Py 790[nm], espesor 50[nm] y 100[nm]
- b) Py 790[nm] y 260[nm], espesor 50[nm]
- c) Py 260[nm], espesor 50[nm] y 100[nm]
- d) Py 790[nm] y 260[nm], espesor 100[nm]

### 3.1.1. VSM en película nanoestructurada

#### A. Fe

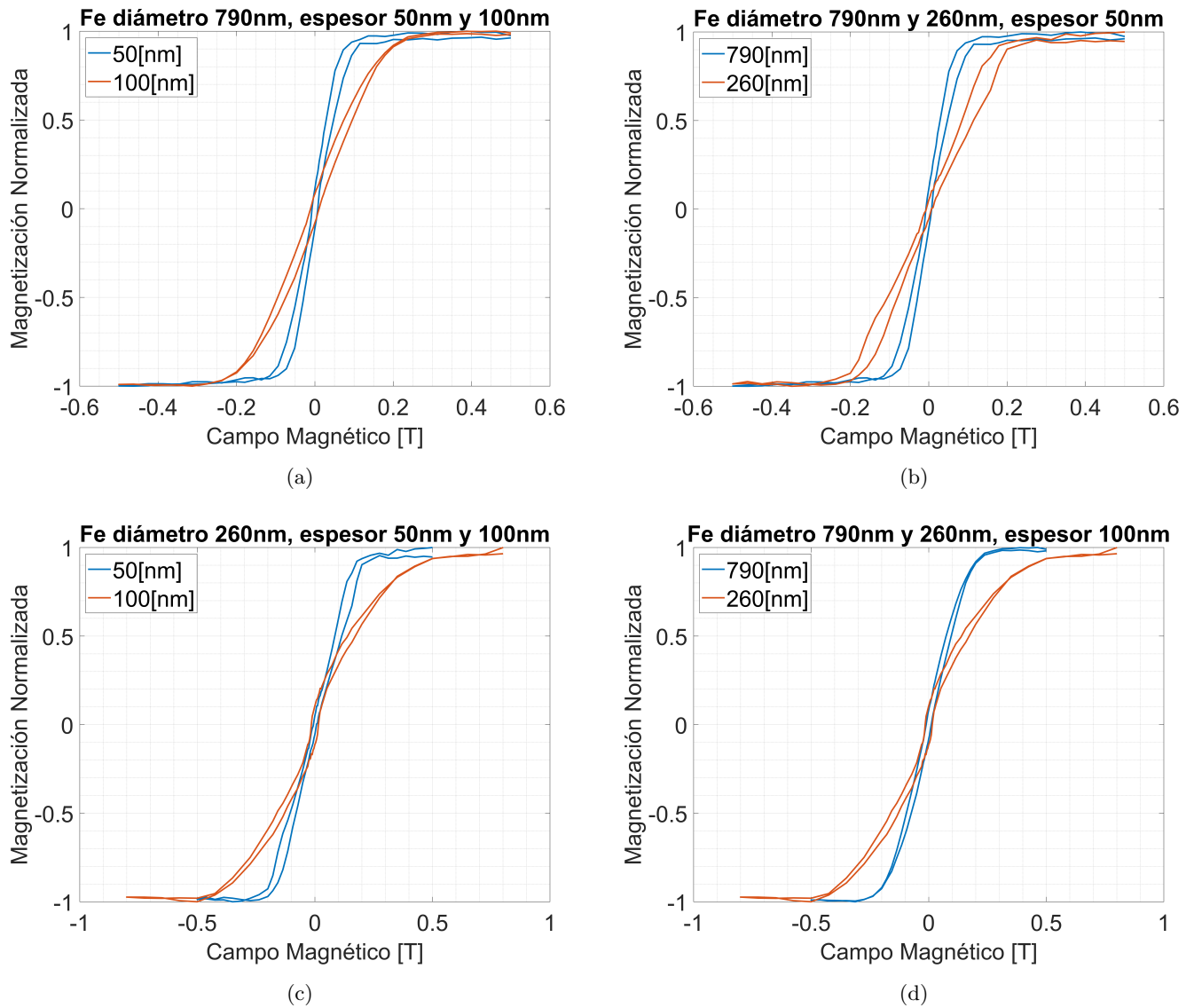


Figura 3.1: Comparación curvas de histéresis de Fe medidas con VSM. a) Fe diámetro 790[nm], espesor 50[nm] y 100[nm]. b) Fe diámetro 790[nm] y 260[nm], espesor 50[nm]. c) Fe diámetro 260[nm], espesor 50[nm] y 100[nm]. d) Fe diámetro 790[nm] y 260[nm], espesor 100[nm].

## B. Py

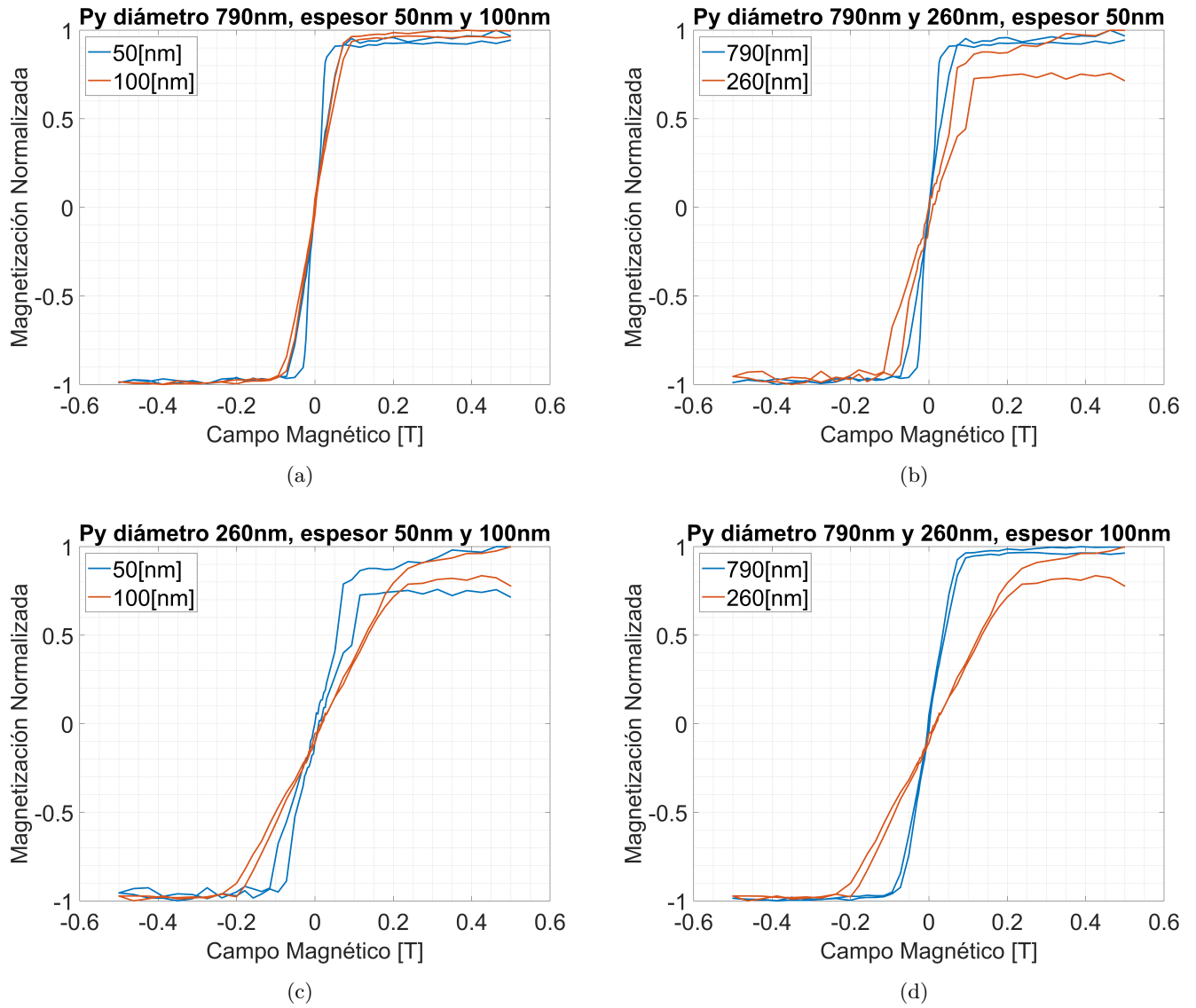


Figura 3.2: Comparación curvas de histéresis de Py medidas con VSM. a) Py diámetro 790[nm], espesor 50[nm] y 100[nm]. b) Py diámetro 790[nm] y 260[nm], espesor 50[nm]. c) Py diámetro 260[nm], espesor 50[nm] y 100[nm]. d) Py diámetro 790[nm] y 260[nm], espesor 100[nm].

	Coercitividad	Remanencia	Campo de saturación [Oe]
Fe 790[nm] 50[nm]	$100 \pm 18$ [Oe]	$11 \pm 1\%$	1149
Fe 790[nm] 100[nm]	$200 \pm 20$ [Oe]	$8 \pm 1\%$	3125
Fe 260[nm] 50[nm]	$100 \pm 18$ [Oe]	$5 \pm 1\%$	2749
Fe 260[nm] 100[nm]	$300 \pm 18$ [Oe]	$11 \pm 1\%$	5751
Py 790[nm] 50[nm]	$20 \pm 18$ [Oe]	$1 \pm 2\%$	724
Py 790[nm] 100[nm]	$40 \pm 9$ [Oe]	$5 \pm 1\%$	938
Py 260[nm] 50[nm]	$100 \pm 19$ [Oe]	$3 \pm 3\%$	1150
Py 260[nm] 100[nm]	$20 \pm 19$ [Oe]	$2 \pm 1\%$	2374

Tabla 3.1: Resultados VSM en película nanoestructurada

En los gráficos de la figura 3.1, correspondientes a los discos de Fe, se observa lo siguiente:

Para los casos donde se aumenta el espesor de los discos, sean en los de 790[nm] de diámetro o en los de 260[nm] de diámetro, el aumento de material hace que se produzca un aumento en el campo magnético necesario para la saturación. Igualmente en el caso donde se mantienen los espesores y se comparan los diferentes diámetros, una disminución en el diámetro aumenta el campo necesario para lograr la saturación del material. Por otro lado, observando las diferencias de coercitividades y remanencias, los discos de 260[nm] de diámetro y 50[nm] de espesor presentaron los menores valores, por lo que para este material, serían los mejores candidatos para ser probados en usos biológicos.

En la figura 3.2 correspondientes a los discos de Py:

A diferencia de los discos de Fe, el Py presenta ciclos de histéresis con menor coercitividades y una forma mucho más parecida a lo que se espera en discos de estado vórtice. Se observa de mejor manera un proceso de nucleación, es decir, de la formación del vórtice, especialmente en las curvas de histéresis de los discos de 790[nm] de diámetro. Finalmente el mejor candidato en los casos de los discos de Py, sería el de los discos de 790[nm] de diámetro y 50[nm] de espesor por su baja remanencia y pequeña coercitividad.

### 3.2. VSM en *eppendorf*

#### A. Fe

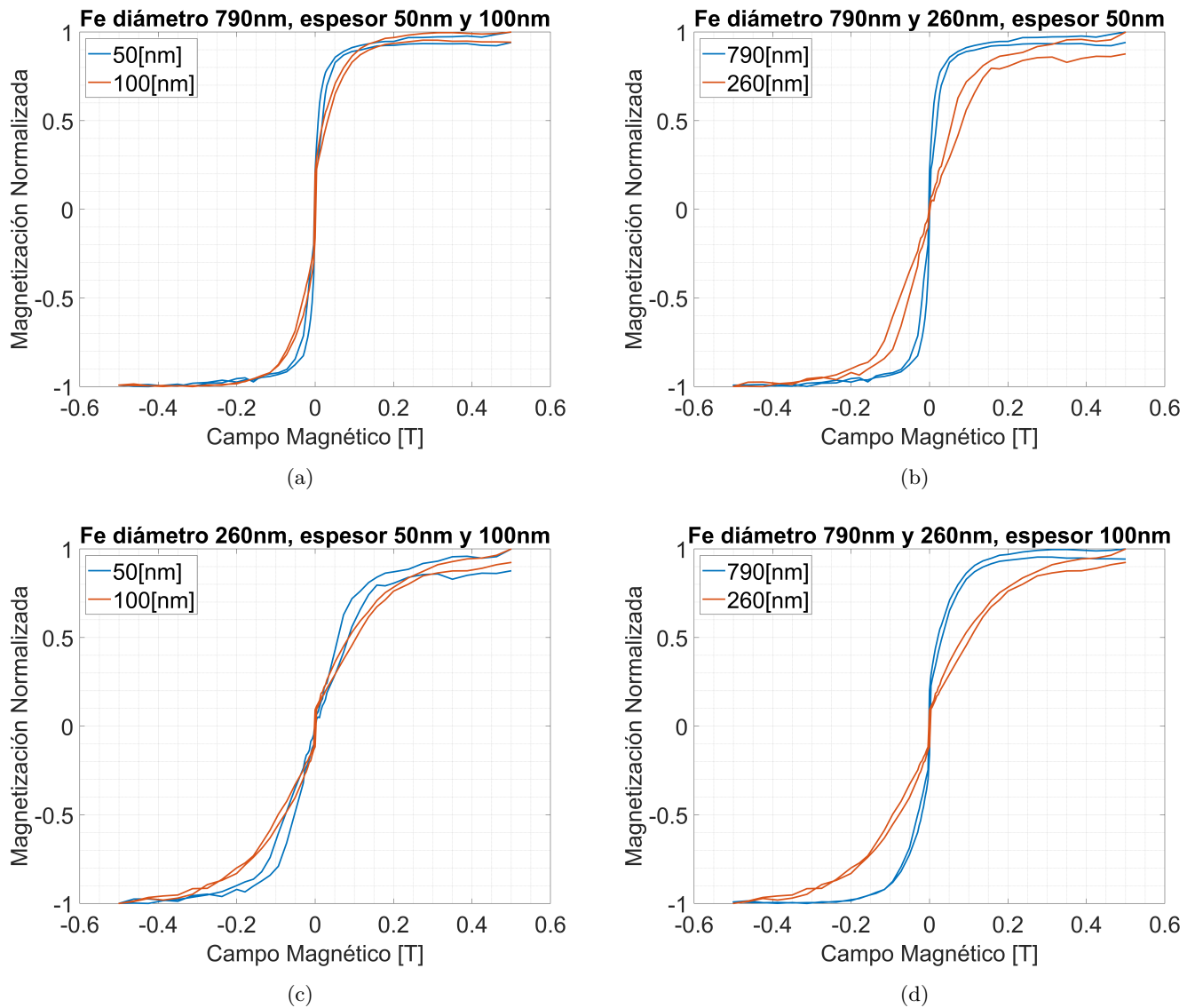


Figura 3.3: Comparación curvas de histéresis de Fe medidas con VSM, discos suspendidos dentro del *eppendorf*. a) Fe diámetro 790[nm], espesor 50[nm] y 100[nm]. b) Fe diámetro 790[nm] y 260[nm], espesor 50[nm]. c) Fe diámetro 260[nm], espesor 50[nm] y 100[nm]. d) Fe diámetro 790[nm] y 260[nm], espesor 100[nm].

## B. Py

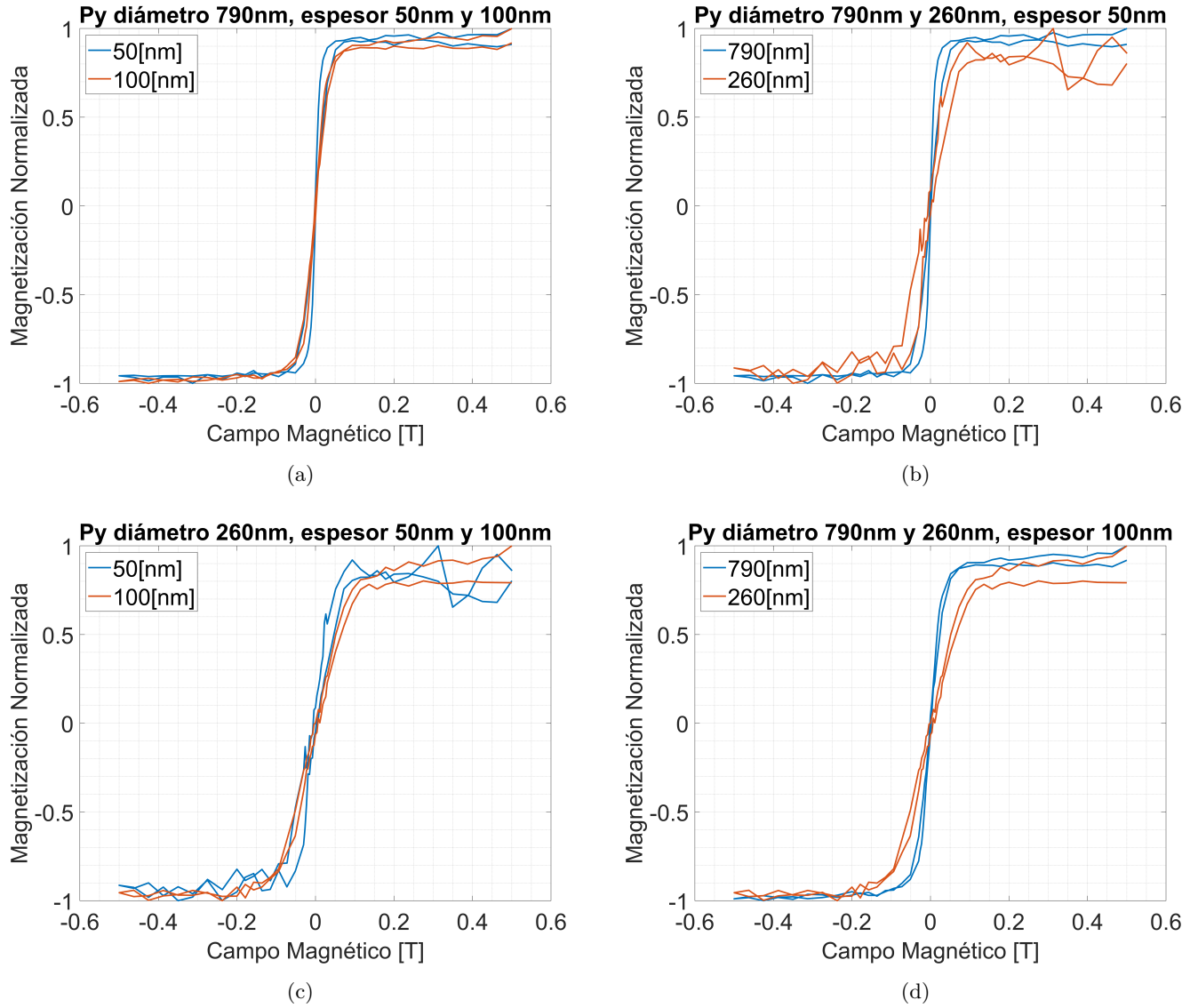


Figura 3.4: Comparación curvas de histéresis de Py medidas con VSM, discos suspendidos dentro del *ependorf*. a) Py diámetro 790[nm], espesor 50[nm] y 100[nm]. b) Py diámetro 790[nm] y 260[nm], espesor 50[nm]. c) Py diámetro 260[nm], espesor 50[nm] y 100[nm]. d) Py diámetro 790[nm] y 260[nm], espesor 100[nm].

	Coercitividad	Remanencia	Campo de saturación [Oe]
Fe 790[nm] 50[nm]	$30 \pm 20$ [Oe]	$22 \pm 8$ %	1998
Fe 790[nm] 100[nm]	$30 \pm 36$ [Oe]	$20 \pm 4$ %	2750
Fe 260[nm] 50[nm]	$30 \pm 19$ [Oe]	$3 \pm 1$ %	2373
Fe 260[nm] 100[nm]	$40 \pm 18$ [Oe]	$9 \pm 2$ %	3877
Py 790[nm] 50[nm]	$30 \pm 19$ [Oe]	$7 \pm 1$ %	723
Py 790[nm] 100[nm]	$30 \pm 19$ [Oe]	$4 \pm 2$ %	1148
Py 260[nm] 50[nm]	$80 \pm 46$ [Oe]	$9 \pm 4$ %	1362
Py 260[nm] 100[nm]	$70 \pm 13$ [Oe]	$4 \pm 6$ %	1363

Tabla 3.2: Resultados VSM en *eppendorf*

En los gráficos de la figura 3.3 correspondientes a los discos de Fe en *eppendorf*, se observa lo siguiente:

Al igual que en el caso de los discos medidos en película nanoestructurada, cuando se mantiene el diámetro, los discos de mayor espesor presentan un mayor campo de saturación. Por el mismo lado, manteniendo el espesor fijo, los de menor diámetro presentan un mayor campo de saturación. Otro punto importante es que en los *eppendorf* a diferencia de las medidas en película nanoestructurada, son libres de moverse en el líquido, haciendo que estos interactúen de manera más fuerte produciendo cambios de forma en las curvas de histéresis. Para el caso de los discos de Fe en *eppendorf*, el mejor candidato sería el disco de 260[nm] de diámetro y 50[nm] de espesor.

Finalmente en la figura 3.4, se observan los resultados de los discos de Py:

Al igual que en las medidas anteriores, se puede observar que en los gráficos donde se mantiene el diámetro, el aumento del espesor aumenta el campo de saturación y cuando se mantiene el espesor, una disminución del diámetro aumenta el campo de saturación. Lo que respecta a las formas de las curvas de histéresis, todas presentan características muy buenas, baja coercitividad, baja remanencia y alta susceptibilidad. El mejor candidato para este caso, son los discos de 790[nm] de diámetro y 100[nm] de espesor.

### 3.3. Cálculo de discos y porcentaje de eficiencia

Teniendo las medidas de VSM tanto en película nanoestructurada como en *eppendorf*, es posible calcular el rendimiento de traspaso de los nanodiscos. Primero se calcula el número de discos que existen en la película con la ayuda del programa *ImageJ*. Con el programa se observa una imagen SEM de una pequeña parte del sustrato y se estima mediante procesamiento de imágenes el porcentaje efectivo de discos depositados, es decir, cuantos discos debiesen existir de manera ideal en esa área comparado con los discos realmente depositados. En la imagen 3.5 se puede observar una porción de sustrato con discos de Fe de 260[nm] de diámetro y 100[nm] de espesor efectivamente depositados.

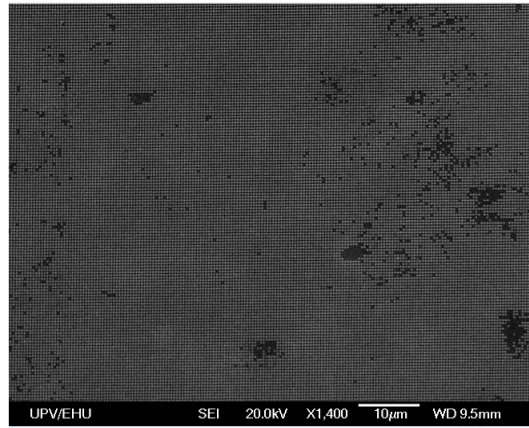


Figura 3.5: Imagen SEM de una pequeña área del sustrato con discos ya depositados de Fe de 260[nm] de diámetro y 100[nm] de espesor.

Al realizar la medida en el VSM, se puede obtener el total de momento magnético de la muestra y con ello saber el momento magnético por disco. Tras la medición, se realiza el proceso de liberación y se traspasan los nanodiscos a los *eppendorf* donde nuevamente se realizan medidas de VSM para obtener los momentos magnéticos. Con estas nuevas medidas se realiza una comparación en el cambio de momento magnético total el cual es proporcional a los discos y se puede obtener el número de discos en los *eppendorf*. Finalmente se comparan los momentos magnéticos medidos como película nanoestructurada y dentro de los *eppendorf* y se calcula la razón entre las medidas. Esta razón entrega el porcentaje de efectividad de traspaso de los nanodiscos de película nanoestructurada a *eppendorf*.

El número de discos en las películas nanoestructuradas y en *eppendorf* se pueden observar en la tabla 3.3. Para mayor detalle como momento magnético por disco y

área efectiva de discos se puede observar en la referencia A.2.8.

	Discos en película nanoestructurada	Discos en <i>eppendorf</i>	% de Eficiencia
Fe 790[nm], 50[nm] de espesor	$5.43 * 10^7$	$3.31 * 10^7$	60.87 %
Fe 790[nm], 100[nm] de espesor	$5.5 * 10^7$	$3.4 * 10^7$	61.86 %
Fe 260[nm], 50[nm] de espesor	$4.92 * 10^8$	$2.75 * 10^8$	56 %
Fe 260[nm], 100[nm] de espesor	$3.94 * 10^8$	$2.57 * 10^8$	65.15 %
Py 790[nm], 50[nm] de espesor	$5.65 * 10^7$	$3.5 * 10^7$	61.87 %
Py 790[nm], 100[nm] de espesor	$6.15 * 10^7$	$2.99 * 10^7$	48.52 %
Py 260[nm], 50[nm] de espesor	$3.52 * 10^8$	$1.19 * 10^8$	33.9 %
Py 260[nm], 100[nm] de espesor	$6.8 * 10^8$	$2.05 * 10^8$	34.23 %

Tabla 3.3: Número de discos calculados a partir de los valores de momento magnético. Porcentaje de traspaso efectivo entre película nanoestructurada y *eppendorf*.

### 3.3.1. Análisis de resultados del VSM

A continuación se realizará un análisis de los datos obtenidos. Primero se analizarán los gráficos de manera separada, viendo los resultados en película nanoestructurada y en *eppendorf* por separado para luego hacer análisis de los cambios que existieron al realizar la caracterización con los discos en suspensión.

### 3.3.2. Resultados VSM en película nanoestructurada

Observando los números de la tabla 3.1, se puede observar que los discos que presentaron menor coercitividad y menor porcentaje de remanencia son los de Py de 790[nm] de diámetro y 50 [nm] de espesor. La curva de histéresis se muestra en el gráfico a) de la figura 3.2 donde el estado vórtice esta bien definido. Existe una mayor coercitividad cercana a los puntos de saturación y esta disminuye a medida que el campo aplicado decrece. Una vez el campo aplicado es nulo, se llega a la menor remanencia y al estado magnético fundamental del disco.

Tomando en cuenta estos discos como referencia, en la tabla 3.4 se ordenan los discos de menor a mayor coercitividad y la diferencia porcentual. Del mismo modo en la tabla 3.5, se ordenan los datos de menor a mayor porcentaje de remanencia y la diferencia entre ellos.

	Coercitividad	%
Py 790[nm] 50[nm]	20[Oe]	-
Py 790[nm] 100[nm]	40[Oe]	100
Py 260[nm] 50[nm]	100[Oe]	400
Fe 260[nm] 50[nm]	100[Oe]	400
Fe 790[nm] 50[nm]	100[Oe]	400
Py 260[nm] 100[nm]	200[Oe]	900
Fe 790[nm] 100[nm]	200[Oe]	900
Fe 260[nm] 100[nm]	300[Oe]	1400

Tabla 3.4: Comparación de coercitividad en los resultados de VSM en película nanoestructurada.

	Remanencia	%
Py 790[nm] 50[nm]	1 %	-
Py 260[nm] 100[nm]	2 %	1
Py 260[nm] 50[nm]	3 %	2
Py 790[nm] 100[nm]	5 %	3
Fe 260[nm] 50[nm]	5 %	3
Fe 790[nm] 100[nm]	8 %	7
Fe 260[nm] 100[nm]	11 %	10
Fe 790[nm] 50[nm]	11 %	10

Tabla 3.5: Comparación de remanencia en los resultados de VSM en película nanoestructurada.

Con los datos ordenados, se observa que en su mayoría los discos de Py son los que presentan menor coercitividad y menor remanencia. Lo que es la calidad del vórtice, los discos de Py de 260[nm] de diámetro y 50[nm] de espesor presentan la peor de todas, con una forma de curva no muy bien definida.

Por su parte, el disco de Fe que presento la menor coercitividad y la menor remanencia fué el de 260[nm] de diámetro y 50[nm] de espesor. Al mismo tiempo, estos discos son lo que presentan la mejor calidad de vórtice en todas las muestras de Fe.

### 3.3.3. Resultados VSM en *eppendorf*

Para el caso de la caracterización de los discos en suspensión, los discos de Fe de 260[nm] de diámetro y 50[nm] de espesor, presentaron la menor coercitividad y el menor porcentaje de remanencia. Su curva de histéresis, mostrada en el gráfico c) de la figura 3.3, muestra un estado vórtice bien definido, con coercitividad en los extremos y remanencia muy baja a campo nulo.

Los datos ordenados de menor a mayor coercitividad con diferencia porcentual y de menor a mayor porcentaje de remanencia se muestran en las tablas 3.6 y 3.7. El porcentaje de coercitividad de los discos no presenta una dispersión muy alta. Lo que es la calidad del vórtice, los discos de Fe de 790[nm] de diámetro y 50[nm] de espesor presentan la peor calidad debido a su alta remanencia.

Los discos de mejor calidad de Py fueron los de 790[nm] de diámetro y 100[nm] de espesor. Presentan un vórtice bien definido con baja coercitividad y baja remanencia.

	Coercitividad	%
Fe 260[nm] 50[nm]	30[Oe]	-
Fe 790[nm] 50[nm]	30[Oe]	-
Py 790[nm] 100[nm]	30[Oe]	-
Py 790[nm] 50[nm]	30[oe]	-
Fe 790[nm] 100[nm]	30[Oe]	-
Fe 260[nm] 100[nm]	40[Oe]	33
Py 260[nm] 100[nm]	70[Oe]	133
Py 260[nm] 50[nm]	80[Oe]	167

Tabla 3.6: Comparación de coercitividad en los resultados de VSM en *eppendorf*.

	Remanencia	%
Fe 260[nm] 50[nm]	3 %	-
Py 260[nm] 100[nm]	4 %	1
Py 790[nm] 100[nm]	4 %	1
Py 790[nm] 50[nm]	7 %	4
Py 260[nm] 50[nm]	9 %	6
Fe 260[nm] 100[nm]	9 %	6
Fe 790[nm] 100[nm]	20 %	17
Fe 790[nm] 50[nm]	22 %	19

Tabla 3.7: Comparación de remanencia en los resultados de VSM en *eppendorf*.

### 3.3.4. Comparación de resultados en película nanoestructurada y en *eppendorf*

Considerando los mejores casos de ambas medidas, los discos de Py de 790[nm] de diámetro y 50[nm] de espesor fueron los que obtuvieron las mejores medidas en película nanoestructurada. Estos presentaron un cambio de coercitividad del 50 %, de 20[Oe] a 30[Oe] y un cambio en la remanencia del 6 %, del 1 % al 7 %. La diferencia en la forma de la curva de histéresis se puede ver en la figura 3.6, en azul la medida en película nanoestructurada y en rojo en *eppendorf*.

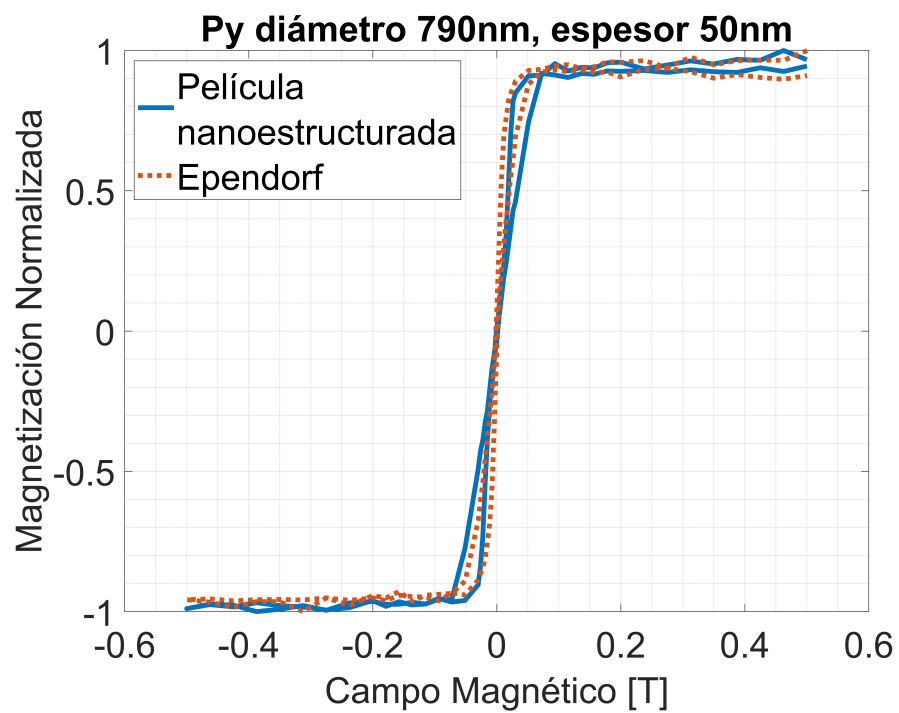


Figura 3.6: Cambio de forma en la curva de histéresis en los discos de Py de 790[nm] de diámetro y 50[nm] de espesor. Azul medida en película nanoestructurada, rojo medida en *eppendorf*.

Por su parte, los discos que obtuvieron las mejores medida en *ependorf*, los discos de Fe de 260[nm] de diámetro y 50[nm] de espesor, presentaron una mejoría en su coercitividad del 400 %, de 100[Oe] a 30[Oe] y en la remanencia una mejoría del 2 %, de 5 % a 3 %. Las curvas de histéresis se observan en la figura 3.7. En azul la medida en película nanoestructurada, en rojo en *ependorf*.

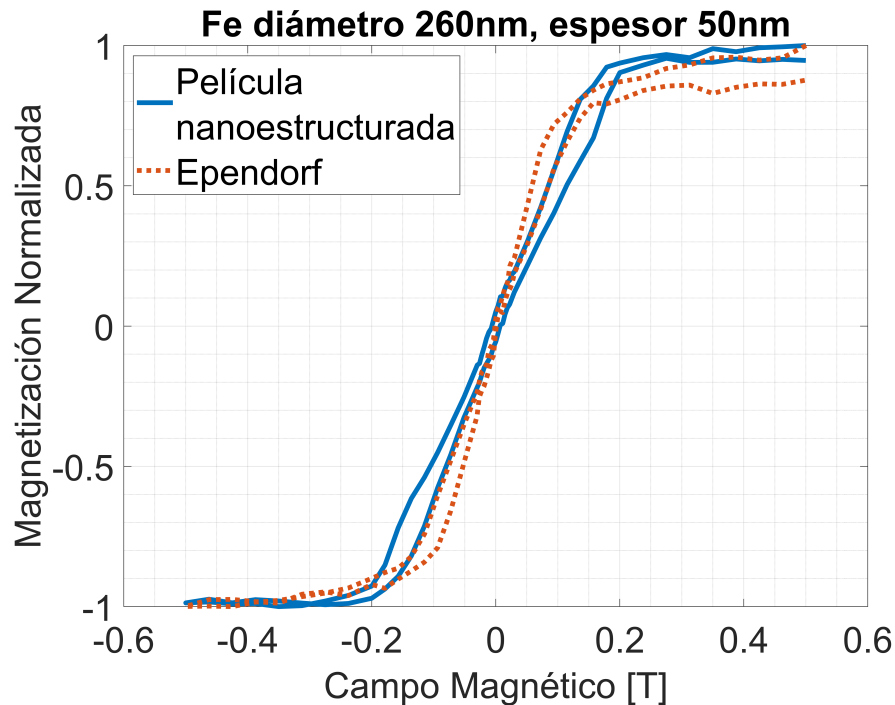


Figura 3.7: Cambio de forma en la curva de histéresis en los discos de Fe de 260[nm] de diámetro y 50[nm] de espesor. Azul medida en película nanoestructurada, rojo medida en *ependorf*.

Como se puede observar en ambos gráficos, las mediciones de VSM en película nanoestructurada como en líquido difieren. Cuando se mide el ciclo de histéresis como película nanoestructurada, se mide solo en una anisotropía y los discos solo tienen la posibilidad de interactuar magnéticamente de forma magnetoestática entre los vecinos más cercanos, obteniendo así una medida más característica de cada disco de manera individual. Cuando se realiza la medida dentro de los *ependorf*, los discos se agrupan en un pequeño montículo con los discos apuntando en varias direcciones. Los discos se encuentran muy agrupados, provocando que estos pueda interactuar de manera magnetoestática y dipolar, causando diferencias en las medidas de ciclo de histéresis a comparación de las medidas en película nanoestructurada.

## 3.4. Mumax

### 3.4.1. Simulación mediante Mumax

A partir de las imágenes SEM de los discos reales fabricados, se hicieron una serie de simulaciones mediante el software Mumax [26]. Estas simulaciones muestran el comportamiento magnético ideal de un solo nanodisco. Para realizar esto a cabo, la imagen se discretiza en pequeñas regiones o celdas mutuamente interactuantes.

Mumax para realizar la simulación toma en cuenta la ecuación de Landau-Lifshitz, la energía magnetoestática y el campo externo. Con esos tres factores es posible observar el estado fundamental y la evolución temporal del estado magnético de los nanodiscos.

Para poder utilizar la imagen SEM en la simulación, es necesario realizar ajustes en ella. Primero, se recorta y redimensiona para tener un tamaño adecuado con respecto a los recursos computacionales. A mayor discretización de imagen, mayores los recursos necesarios, teniendo como coste un mayor tiempo de simulación. Este reajuste se hace además para tener la relación correcta entre tamaño de celda y tamaño de imagen. Este último punto es de suma importancia, ya que cada celda debe ser de una longitud menor a la distancia de *exchange*. En la tabla 3.9 [28] se pueden observar los distintos parámetros de los metales ferromagnéticos. Teniendo en cuenta lo anterior, las imágenes utilizadas se discretizan en 384x384 para los discos de 790[nm] y en 256x256 para los discos de 260[nm]. Los respectivos tamaños de grilla y celda utilizados se encuentran en la tabla 3.8.

	Grilla	Celda
790[nm] de diámetro, 50[nm] de espesor	384 x 384 x 25	2.75[nm] x 2.75[nm] x 2[nm]
790[nm] de diámetro, 100[nm] de espesor	384 x 384 x 50	2.75[nm] x 2.75[nm] x 2[nm]
260[nm] de diámetro, 50[nm] de espesor	256 x 256 x 25	1.455[nm] x 1.455[nm] x 2[nm]
260[nm] de diámetro, 100[nm] de espesor	256 x 256 x 50	1.455[nm] x 1.455[nm] x 2[nm]

Tabla 3.8: Parámetros de simulación micromagnética. Tamaño de grilla y celda para diámetros y espesores de nanodiscos.

Una vez redimensionada la imagen es necesario identificar el área que será compuesta por material magnético. Para ello, Mumax hace una distinción entre tonos, negro significando espacio vacío y blanco espacio con material, por lo que en la imagen original SEM se identifica el área que corresponde al disco rellenándola con blanco y el resto con color negro. Las imágenes SEM y las imágenes finales utilizadas para la simulaciones son mostradas en las figuras 3.8, 3.9, 3.10 y 3.11.

Metals	$M_s(10^6 A/m)$	$A(10^{-11} J/m)$	$I_{ex}(nm)$
Co	1.445	3.00	4.78
Fe	1.752	2.10	3.30
Py	0.860	1.3	7.64
Ni	0.484	0.86	5.29

Tabla 3.9: Parámetros magnéticos de metales ferromagnéticos Co, Fe, Py y Ni.  $M_s$ , magnetización de saturación;  $A$ , constante de *exchange*;  $I_{ex}$ , distancia de *exchange*.



Figura 3.8: Imagen del disco de 790[nm] utilizada para la simulación.

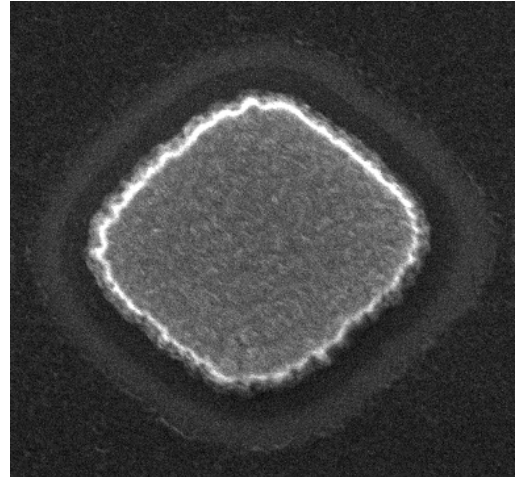


Figura 3.9: Imagen SEM de un disco de 790[nm] de diámetro.

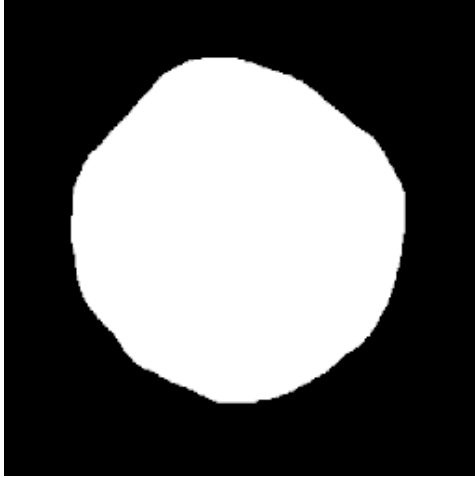


Figura 3.10: Imagen del disco de 260[nm] utilizada para la simulación.

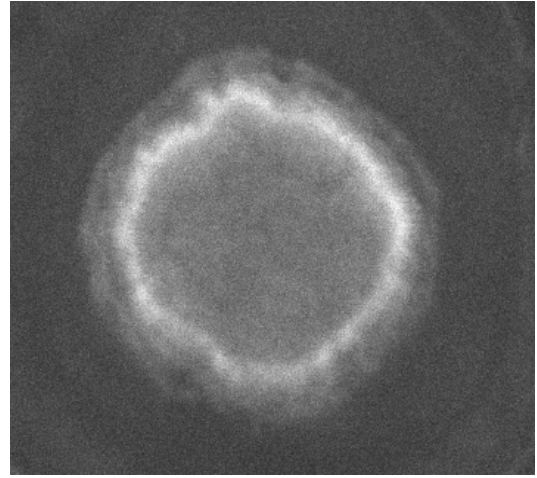


Figura 3.11: Imagen SEM de un disco de 260[nm] de diámetro.

Los códigos utilizados se pueden observar en el apéndice A.1. En el código se observan además los parámetros de simulación y los ajustes en el tamaño de celda.

### 3.4.2. Resultados Mumax

A continuación se presentan los resultados de las simulaciones con el ciclo de histéresis respectivo y estados de magnetización.

1. Fe diámetro 260[nm], 50[nm] de espesor. Figuras 3.14 y 3.15.
2. Fe diámetro 260[nm], 100[nm] de espesor. Figuras 3.16 y 3.17.
3. Fe diámetro 790[nm], 50[nm] de espesor. Figuras 3.18 y 3.19.
4. Fe diámetro 790[nm], 100[nm] de espesor. Figuras 3.20 y 3.21.
5. Py diámetro 260[nm], 50[nm] de espesor. Figuras 3.22 y 3.23.
6. Py diámetro 260[nm], 100[nm] de espesor. Figuras 3.24 y 3.25.
7. Py diámetro 790[nm], 50[nm] de espesor. Figuras 3.26 y 3.27.
8. Py diámetro 790[nm], 100[nm] de espesor. Figuras 3.28 y 3.29.

En las simulaciones presentadas a continuación se puede observar que los discos presentan el estado magnético de vórtice [29]. En este estado, los vectores magnéticos del disco se encuentran en el plano rotando alrededor de un punto central, donde se encuentra un vector que apunta hacia afuera o hacia adentro del plano. Este estado se produce en estructuras circulares que tienen dimensiones mayores a la longitud de *exchange* del material, abarcando desde unas decenas de nanómetros a decenas de micrómetros.

Lo particular de este estado, es que es un estado de mínima energía, los discos se encuentran en monodominios magnéticos y no presentan remanencia magnética. En el ciclo de histéresis de este tipo de estructura se puede ver que pasan por una fase de nucleación, que es donde se forma el vórtice, una fase de desplazamiento del vórtice y una fase de aniquilación una vez el material es saturado con el campo externo. Este proceso se puede observar en la figura 3.12.

Es importante destacar las propiedades del vórtice [29], donde se definen por su quiralidad  $C = \pm 1$  (dirección de giro reloj o contra reloj) y por la polarización del núcleo  $p \pm 1$ . Estas dos características entregan un total posible de cuatro estados de mínima energía para los nanodiscos en estado vórtice. Un punto particular de estos estados de mínima energía es que su producción es de manera aleatoria con una distribución determinada [30].

La aparición del vórtice en nanodiscos ferromagnéticos, tiene estricta relación entre el radio del disco  $R$ , su espesor  $L$  y la longitud de *exchange*  $L_{ex}$  del material. El factor  $\beta = R/L$  es uno de los factores más críticos que determina el comportamiento del vórtice frente a campos magnéticos externos y las condiciones  $L > L_{ex}$  y  $R \gg L_{ex}$  [31] [32] la formación del fenómeno.

En la figura 3.13 se puede observar para el caso del Py, el diagrama de fase donde el estado vórtice se hace presente.

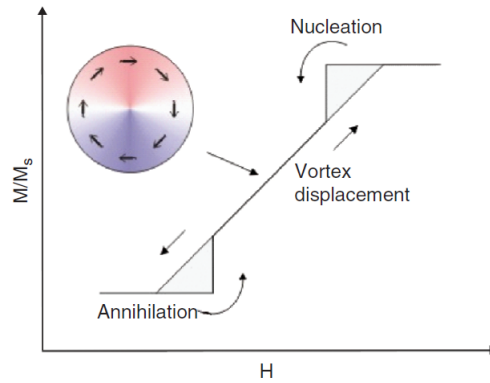


Figura 3.12: Forma general del ciclo de histéresis de discos ferromagnéticos en estado vórtice. En la inversión del campo externo se produce la nucleación y un desplazamiento del vórtice hasta que se llega a la saturación y se aniquila.

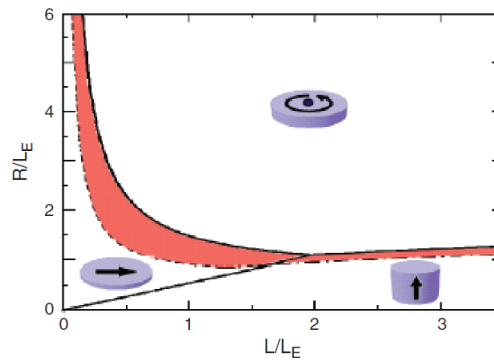


Figura 3.13: Diagrama de fase para discos de Py. Eje X, espesor  $L$  sobre distancia de *exchange*. Eje Y, radio  $R$  sobre distancia de *exchange*.

Otro posible estado que se puede encontrar como estado base o cuando se está en el proceso de magnetización de los nanodiscos, es el de doble vórtice [33] [34]. Este estado ha sido reportado en la literatura de manera teórica [32] y experimental en discos de cobalto de 1000[nm] de diámetro y 30[nm] de espesor [35], es discos elípticos de Py de 700x500[nm] y 60[nm] de espesor [36] y en otras geometrías [37] [38].

La aparición de los dobles vórtices ocurre cuando existe una disminución en el espesor de los nanodiscos de manera tal que estos no llegan a un estado de mínima energía donde la magnetización ocurra en el plano. A menor espesor, el núcleo del vórtice disminuye, favoreciendo la aparición de más metaestados [33]. Otro factor que influye en la producción de estos meta estados es la geometría y la dirección del campo aplicado. Para elipses, este puede ser un factor que cambie los estados de magnetización de vórtice simple a doble vórtice [39]. Cuando se aplica en dirección del eje mayor favorece la producción de doble vórtice, mientras que en el eje menor vórtices simples.

Para el caso de los discos simulados de las figuras 3.19 3.21 y 3.27 3.29, los discos de 790[nm] de diámetro presentan un cambio en el estado de magnetización cuando su espesor disminuye de 100[nm] a 50[nm]. Se puede observar que durante la desmagnetización, pasa por un estado de doble vórtice a un vórtice simple como estado base en el caso del disco Fe. Para el caso del Py, pasa por un estado de doble vórtice el cual se mantiene como el estado base y luego decae en vórtice simple. Hay que destacar que estas simulaciones a pesar de ser de discos individuales, si correlacionan a las medidas de VSM en película nanoestructurada. Las distancia entre ejes de los nanodiscos en las medidas de VSM son suficiente para ignorar el efecto de interacciones dipolares y magnetoestáticas [30].

Las simulaciones presentadas por lo tanto entregan información que ayuda a corroborar el comportamiento magnético que tienen frente a campos magnéticos externos. Un resumen de los resultados se puede observar en la tabla 3.10.

### 3.4.3. Fe 260[nm] de diámetro, 50[nm] de espesor

En el ciclo de histéresis presentado en la figura 3.14 se puede observar el proceso de formación del vórtice de manera muy bien definida, con dos coercitividads bien presentadas entre la saturación y la nucleación del disco. En lo que es la estructura magnética, en la figura 3.15 se ve que el disco presenta un solo dominio, con el vector magnético del vórtice apuntado fuera del plano en los puntos d) e i).

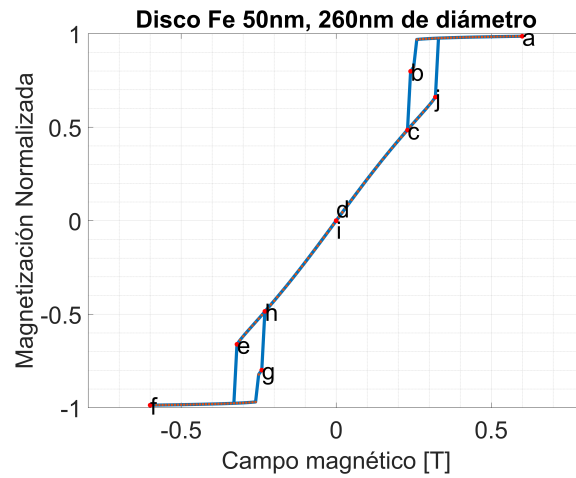


Figura 3.14: Ciclo de histéresis simulado en Mumax, disco de Fe 50[nm] de espesor, 260[nm] de diámetro.

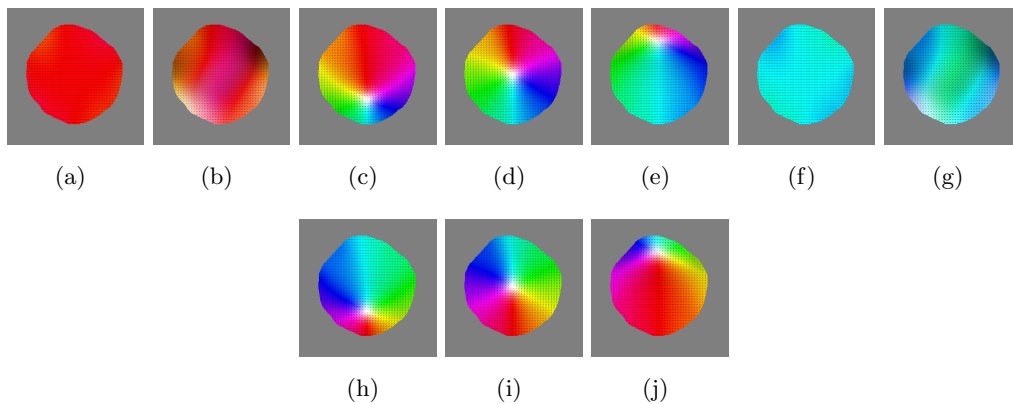


Figura 3.15: Seguimiento del proceso de magnetización en el ciclo de histéresis. Disco de Fe 50[nm] de espesor, 260[nm] de diámetro.

### 3.4.4. Fe 260[nm] de diámetro, 100[nm] de espesor

El ciclo de presentado en la figura 3.16 muestra una nucleación muy cercana a la saturación del material, mostrando coercitividads muy bajas. También es posible observar una disminución en la pendiente de la curva efecto del mayor espesor en el material. La estructura del vortex presenta un dominio simple con el vector magnético fuera del plano. Puntos d) e i) de la figura 3.17.

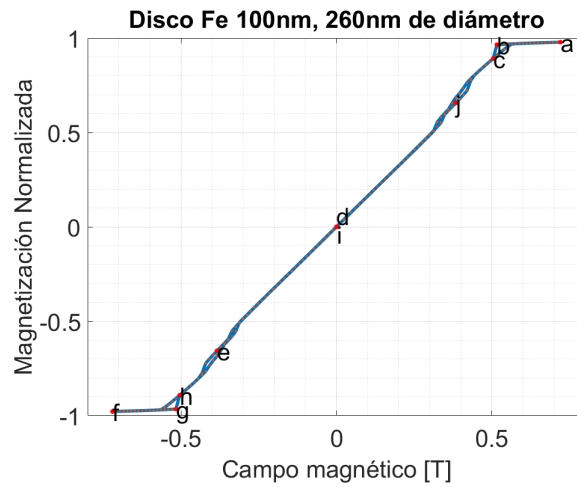


Figura 3.16: Ciclo de histéresis simulado en Mumax, disco de Fe 100[nm] de espesor, 260[nm] de diámetro.

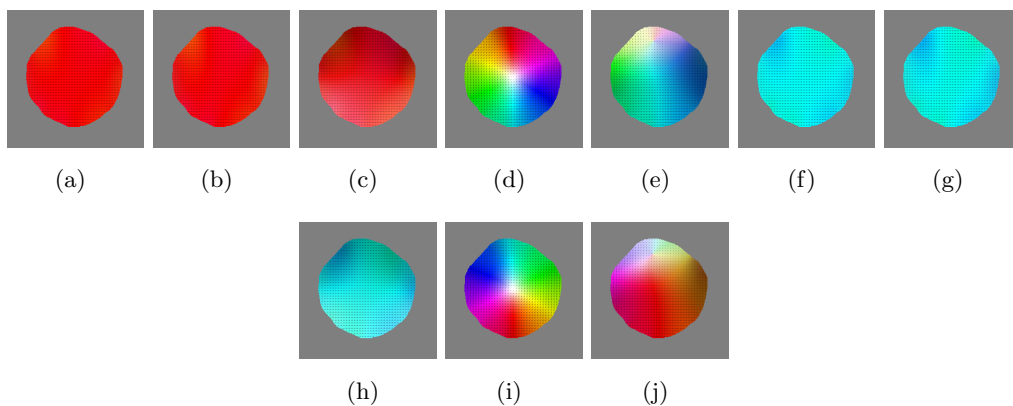


Figura 3.17: Seguimiento del proceso de magnetización en el ciclo de histéresis. Disco de Fe 100[nm] de espesor, 260[nm] de diámetro.

### 3.4.5. Fe 790[nm] de diámetro, 50[nm] de espesor

El aumento de diámetro y el cambio de geometría afecta el proceso de nucleación y la coercitividad en el ciclo de histéresis. La coercitividad disminuye hasta llegar a campo cero, donde se forma la nucleación. En los puntos c), d), h) e i) se puede observar la formación de multi dominios y dos vórtices con vectores magnéticos hacia adentro y hacia afuera del plano que luego decaen un un vórtice simple dentro del plano.

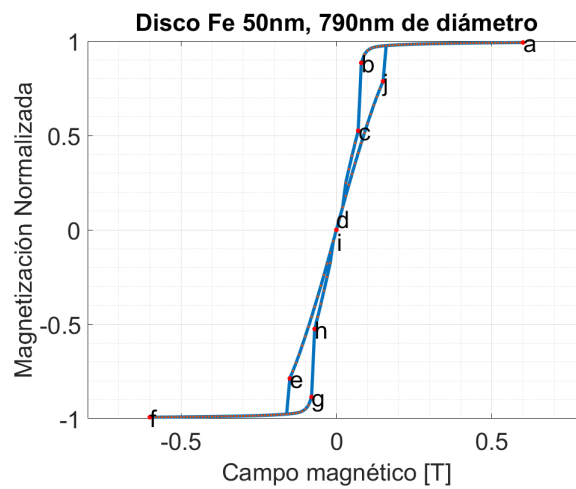


Figura 3.18: Ciclo de histéresis simulado en Mumax, disco de Fe 50[nm] de espesor, 790[nm] de diámetro.

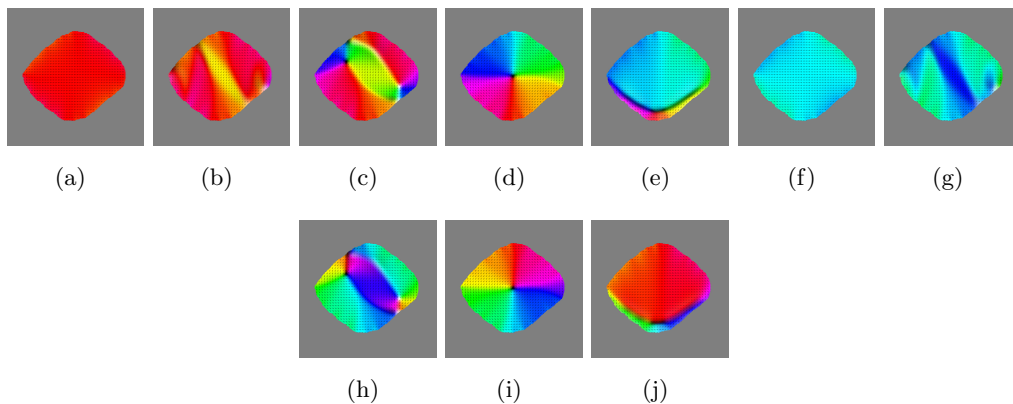


Figura 3.19: Seguimiento del proceso de magnetización en el ciclo de histéresis. Disco de Fe 50[nm] de espesor, 790[nm] de diámetro.

### 3.4.6. Fe 790[nm] de diámetro, 100[nm] de espesor

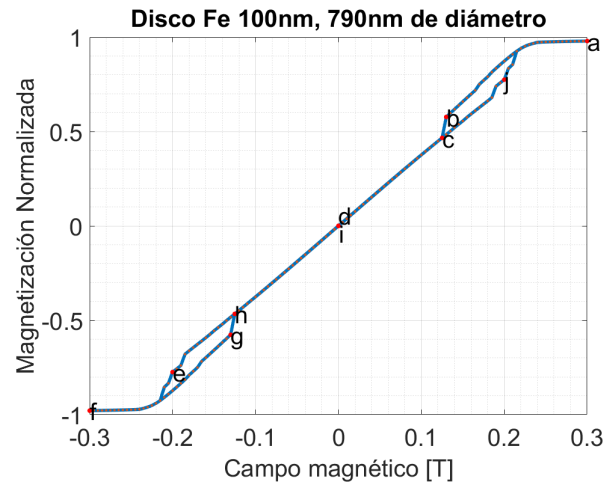


Figura 3.20: Ciclo de histéresis simulado en Mumax, disco de Fe 100[nm] de espesor, 790[nm] de diámetro.

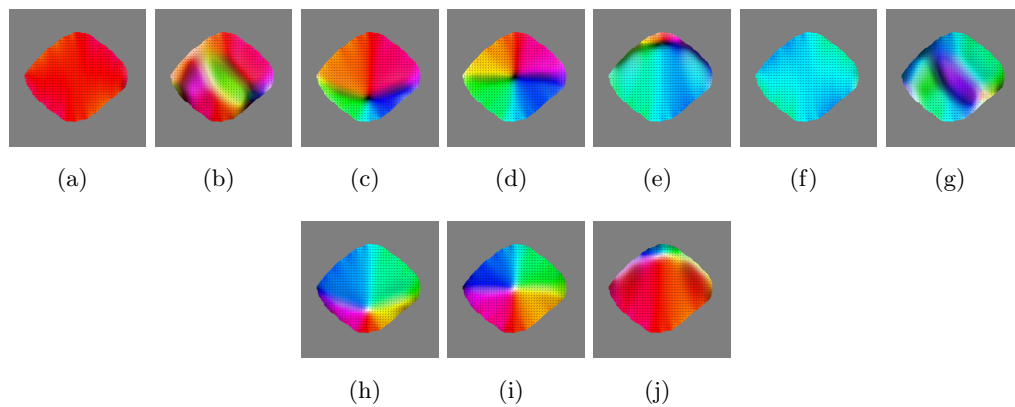


Figura 3.21: Seguimiento del proceso de magnetización en el ciclo de histéresis. Disco de Fe 100[nm] de espesor, 790[nm] de diámetro.

### 3.4.7. Py 260[nm] de diámetro, 50[nm] de espesor

El ciclo de histéresis presenta dos grandes coercitividads antes del proceso de nucleación. En las imágenes c) y h) de la figura 3.23, se puede observar el vortex formado y el cambio de polaridad al momento de invertir el campo magnético externo.

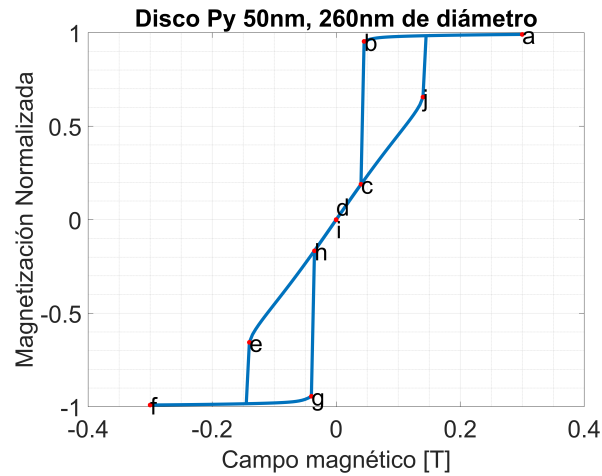


Figura 3.22: Ciclo de histéresis simulado en Mumax, disco de Py 50[nm] de espesor, 260[nm] de diámetro.

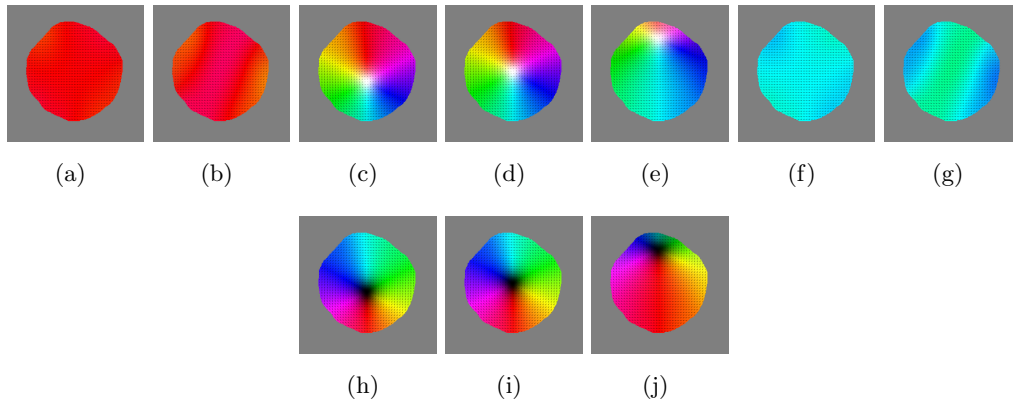


Figura 3.23: Seguimiento del proceso de magnetización en el ciclo de histéresis. Disco de Py 50[nm] de espesor, 260[nm] de diámetro.

### 3.4.8. Py 260[nm] de diámetro, 100[nm] de espesor

El aumento de espesor cambia de manera drástica el ciclo de histéresis. Las coercitividads disminuyen en gran medida, la pendiente disminuye y la nucleación ocurre casi de manera inmediata después de las saturaciones. En los puntos d) e i) de la figura 3.25 se observa el vórtice y su dirección fuera del plano.

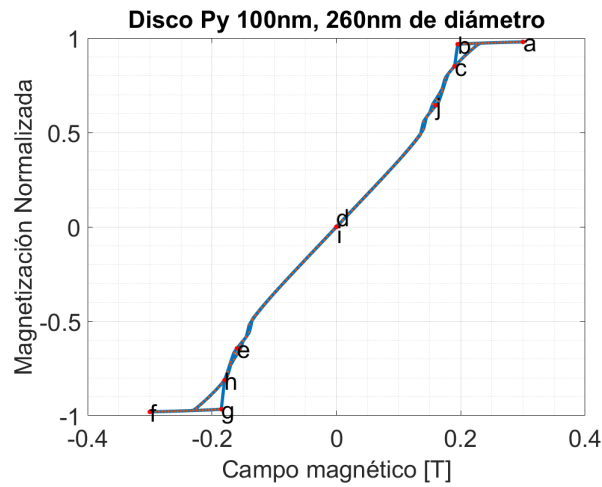


Figura 3.24: Ciclo de histéresis simulado en Mumax, disco de Py 100[nm] de espesor, 260[nm] de diámetro.

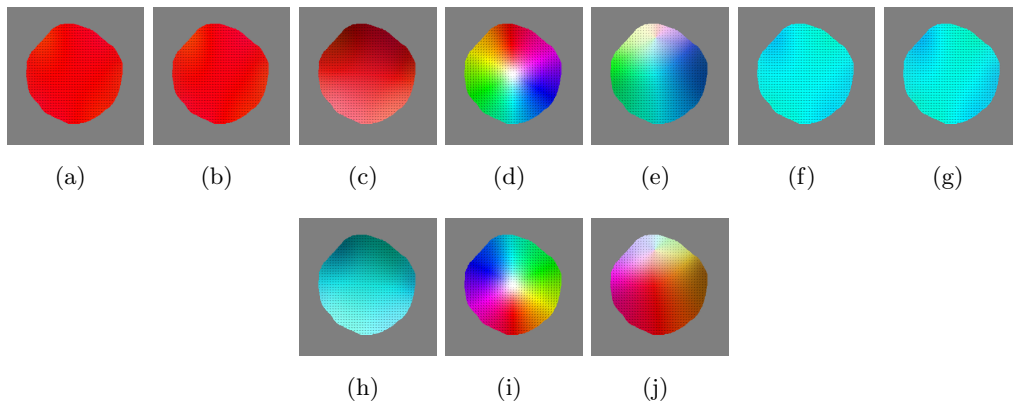


Figura 3.25: Seguimiento del proceso de magnetización en el ciclo de histéresis. Disco de Py 100[nm] de espesor, 260[nm] de diámetro.

### 3.4.9. Py 790[nm] de diámetro, 50[nm] de espesor

El ciclo de histéresis no logra una remanencia y una coercitividad cero a campo cero. La nucleación no se alcanza a cerrar completamente. En la figura 3.27 en los puntos c), d), e), h), i) y j) se puede observar que pasa de una configuración de vórtices múltiples a un vórtice simple, siendo estos vórtices hacia afuera del plano en los primeros puntos y luego una combinación hacia afuera y hacia adentro del plano una vez se invierte el campo aplicado.

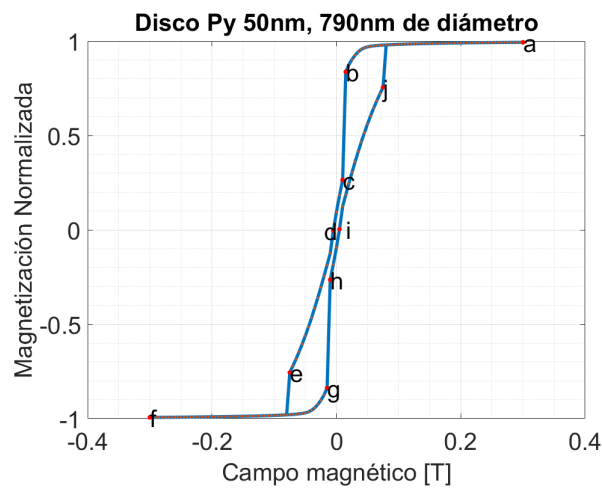


Figura 3.26: Ciclo de histéresis simulado en Mumax, disco de Py 50[nm] de espesor, 790[nm] de diámetro.

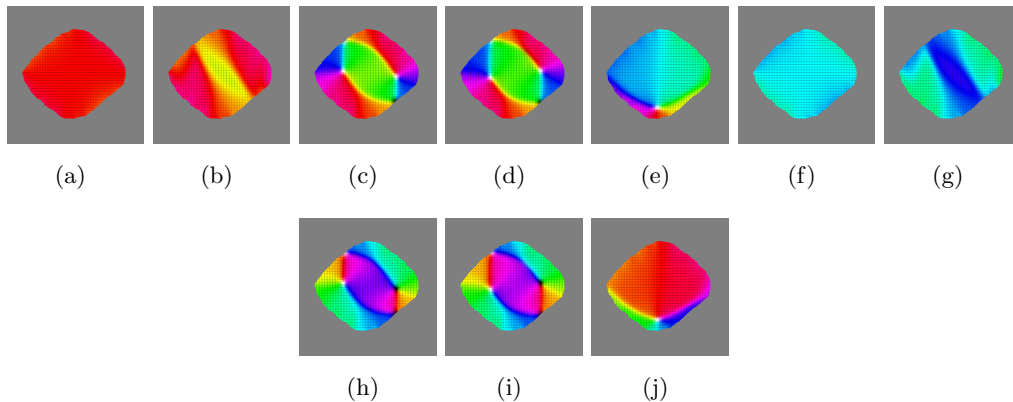


Figura 3.27: Seguimiento del proceso de magnetización en el ciclo de histéresis. Disco de Py 50[nm] de espesor, 790[nm] de diámetro.

### 3.4.10. Py 790[nm] de diámetro, 100[nm] de espesor

El ciclo de histéresis presenta una nucleación bastante rápida luego de las coercitvidades de los extremos. El vórtice se forma de manera muy definida como se ve en las imágenes c), d), h) e i), con un cambio de dirección al invertir el campo magnético aplicado, de fuera del plano hacia adentro del plano.

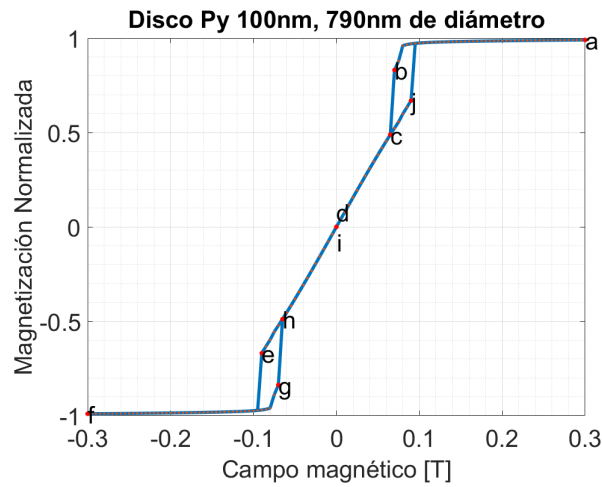


Figura 3.28: Ciclo de histéresis simulado en Mumax, disco de Py 100[nm] de espesor, 790[nm] de diámetro.

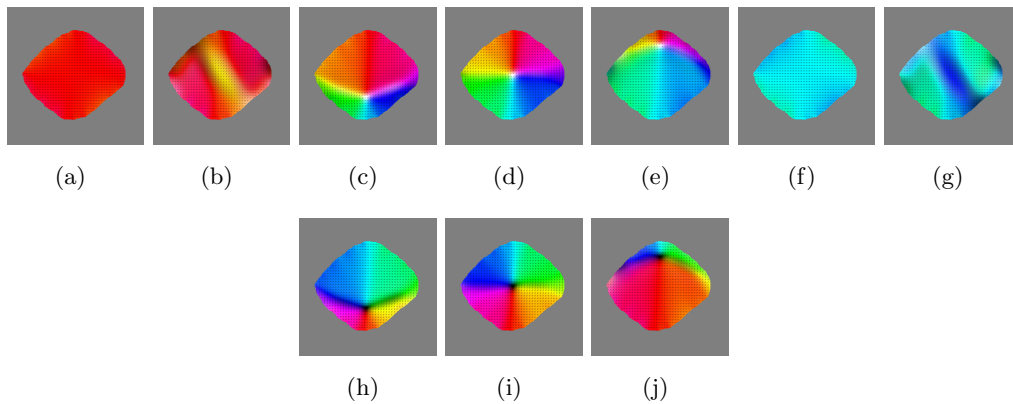


Figura 3.29: Seguimiento del proceso de magnetización en el ciclo de histéresis. Disco de Py 100[nm] de espesor, 790[nm] de diámetro.

	Coercitividad [Oe]	Remanencia [%]	Nucleación [Oe]	Susceptibilidad [-]	Estado magnético
Fe 260[nm] 50[nm]	5.2	0.06	2300	4.7	Vórtice
Fe 260[nm] 100[nm]	4.8	0.04	5039	3.4	Vórtice
Fe 790[nm] 50[nm]	0.5	0.02	700	12.0	Doble vórtice
Fe 790[nm] 100[nm]	2.2	0.04	1250	8.1	Vórtice
Py 260[nm] 50[nm]	3.1	0.07	400	4.6	Vórtice
Py 260[nm] 100[nm]	3.3	0.06	1900	3.9	Vórtice
Py 790[nm] 50[nm]	96	9.42	100	17.7	Doble vórtice
Py 790[nm] 100[nm]	0.5	0.02	650	7.2	Vórtice

Tabla 3.10: Resumen de resultados de las simulaciones micromagnéticas de los discos de Fe y de Py.

### 3.4.11. Comparación de resultados de VSM en película nanoestructurada con simulaciones micromagnéticas

Tras completar las simulaciones de los discos micromagnéticos, se realizó una comparativa de los resultados reales de VSM con las simulaciones en Mumax. Los discos que se compararon fueron los mismos que los de la sección 3.3.4, los discos de Fe de 260[nm] de diámetro y 50[nm] de espesor y los discos de Py de 790[nm] de diámetro y 50[nm] de espesor.

En la figura 3.30 a), se pueden observar las dos curvas de histéresis de los discos de Fe de 260[nm] de diámetro y 50[nm] de espesor, el gráfico a) del lado izquierdo con los resultados en VSM y el gráfico b) del lado derecho con los resultados simulados. Las dos curvas presentan formas muy diferentes una de la otra, la histéresis real tiene una nucleación muy ligera que no decae completamente a campo cero y una saturación a los 2749[Oe], mientras que la simulación presenta una nucleación completa una vez alcanza los 2300[Oe] y una saturación a los 3300[Oe].

En la figura 3.30 b), se observan las curvas de histéresis de los discos de Py de 790[nm] de diámetro y 50[m] de espesor. Para este caso las curvas de histéresis presentan una forma más parecida una de la otra. La curva obtenida en VSM, presenta una nucleación casi completa a los 74[Oe] y una saturación a los 720[Oe], mientras que la curva simulada presenta una nucleación a los 100[Oe] y una saturación a los 800[Oe], valores muy cercanos unos de los otros.

La diferencia en las curvas medidas en VSM con la simuladas, es debido al mismo error experimental del VSM como también al hecho de que la caracterización se realiza a una muestra en donde los nanodiscos no son todos exactamente iguales uno de los otros. Recordar que las interacciones con los segundos vecinos son casi nulas, por lo que este efecto no afecta en mayor manera la comparativa entre los

gráficos de histéresis del VSM y las simulaciones. Las diferencias en la rugosidad de la superficie, en los bordes y la uniformidad en la deposición producen cambios significativos cuando se comparan a las mediciones de un disco simple como se realizó en la simulación. Esto queda demostrado en la comparativa de las curvas de histéresis mencionadas.

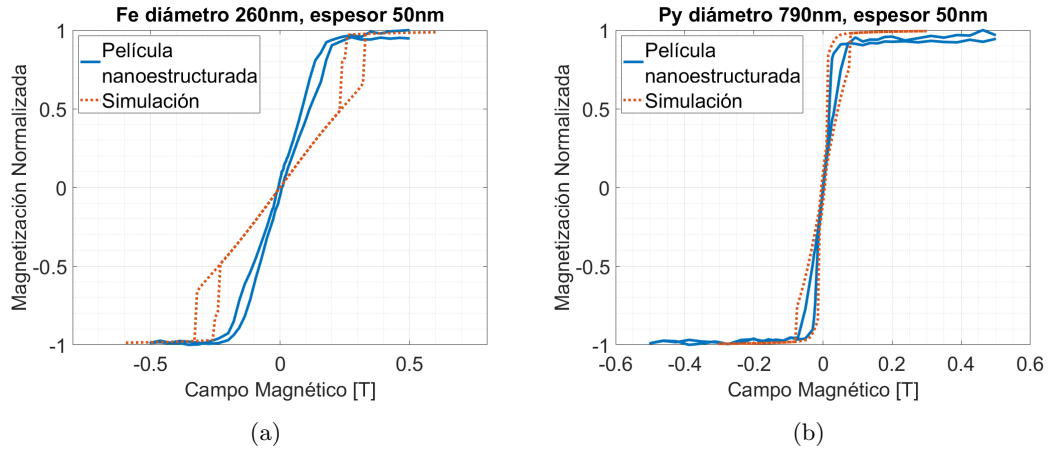


Figura 3.30: Comparación de forma en las curvas de histéresis medidas en VSM como película nanoestructurada y en simulación. a) Fe 260[nm] de diámetro 50[nm] de espesor. b) Py 790[nm] de diámetro, 50[nm] de espesor.

Otro punto importante es la energía disipada por los discos al realizar un ciclo de histéresis, punto crítico para las terapias de hipertermia. Para calcular la energía disipada por ciclo 3.4.1, simplemente se integra el área encerrada por ciclo de histéresis desnormalizado, entregando como resultado la energía disipada por metro cúbico [8].

$$E = \mu_0 \oint H_a \cdot dM \quad (3.4.1)$$

Para los discos de Fe de la figura 3.31, para el caso de las medidas en VSM, estas presentan una disipación de energía de  $37.06 \left[ \frac{kJ}{m^3} \right]$  y la simulación una disipación de  $108.84 \left[ \frac{kJ}{m^3} \right]$ , un incremento del 193.7% de las medidas simuladas frente a las experimentales.

Por su parte, los discos de Py de la figura 3.32, las medidas en VSM presentan una disipación de energía de  $25.55 \left[ \frac{kJ}{m^3} \right]$ , mientras que el ciclo de histéresis simulado tiene una disipación total de  $49.64 \left[ \frac{kJ}{m^3} \right]$ , un incremento del 94.3% de las medidas simuladas frente a las experimentales.

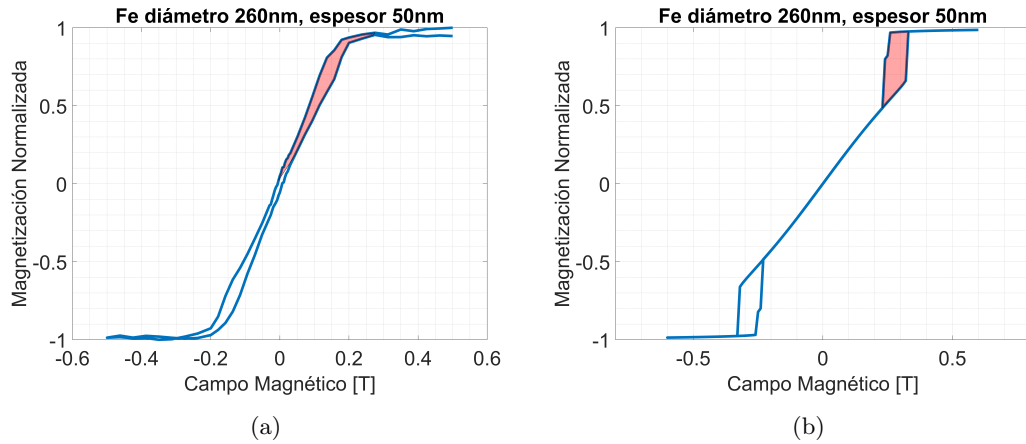


Figura 3.31: Comparación de áreas dentro de las curvas de histéresis para el cálculo de energía disipada en discos de Fe de 260[nm] de diámetro y 50[nm] de espesor. Área sombreada, media integral de la histéresis. a) Histéresis obtenida mediante VSM, b) histéresis por simulación.

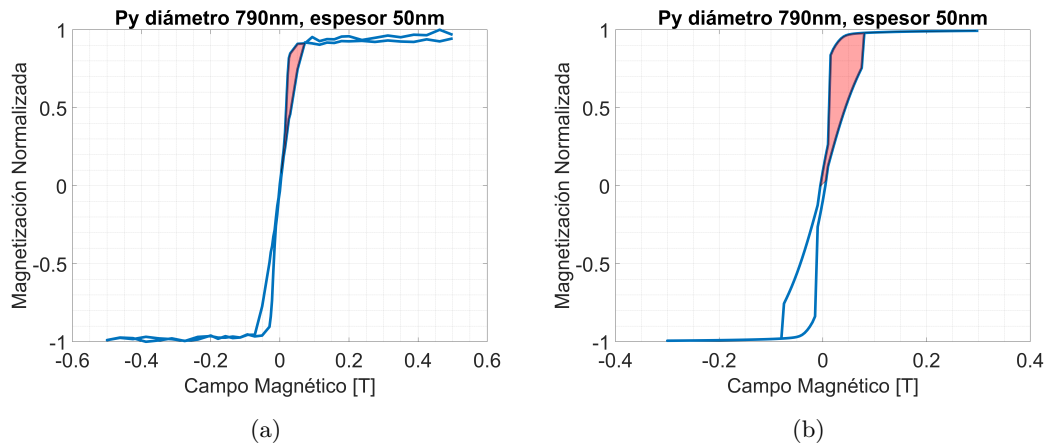


Figura 3.32: Comparación de áreas dentro de las curvas de histéresis para el cálculo de energía disipada en discos de Py de 790[nm] de diámetro y 50[nm] de espesor. Área sombreada, media integral de la histéresis. a) Histéresis obtenida mediante VSM, b) histéresis por simulación.

Con los resultados obtenidos se puede concluir que para terapias de hipertermia los discos de Fe presentan mejores características, con una disipación de energía de  $37.06[\frac{kJ}{m^3}]$  frente a los  $25.55[\frac{kJ}{m^3}]$  de los discos de Py, una diferencia del 68.94 %. En tabla 3.4.11 se puede observar un resumen de los resultados obtenidos.

	Medida en VSM	Simulación micromagnética	Incremento
Fe 260[nm] diámetro, 50[nm] de espesor	$37.06[\frac{kJ}{m^3}]$	$108.84[\frac{kJ}{m^3}]$	193.7 %
Py 790[nm] diámetro, 50[nm] de espesor	$25.55[\frac{kJ}{m^3}]$	$49.64[\frac{kJ}{m^3}]$	94.3 %
Diferencia entre discos	68.94 %	45.61 %	

Tabla 3.11: Cálculos de capacidad de disipación de energía de discos de Fe de 260[nm] de diámetro 50[nm] de espesor y de discos de Py de 790[nm] de diámetro 50[nm] de espesor. Comparación de cálculos hechos con datos de VSM y de simulación micromagnética.

Para lo que es la terapia magnetomecánica, los cálculos de torque serán discutidos en la secciones A y B del capítulo 4 donde se observaron los comportamientos de los discos en solución acuosa.

### 3.4.12. Observación de la estructura magnética de discos de Py de $1.6[\mu m]$ de diámetro $50[nm]$ de espesor con el uso de MFM

Para mostrar el estado vórtice en nanodiscos fabricados, muestras de discos de Py con un diámetro de  $1.6[\mu m]$  y  $50[nm]$  de espesor son vistas en MFM. En las figuras 3.33 y 3.34 se observan las medidas.

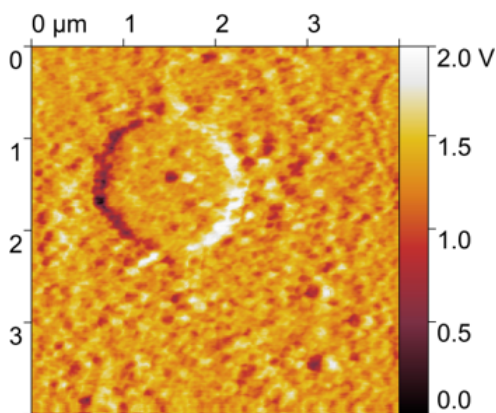


Figura 3.33: Imagen de amplitud MFM, disco de Py  $1.6[\mu m]$  de diámetro  $50[nm]$  de espesor.

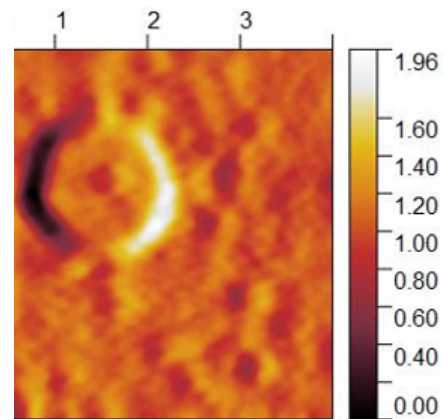


Figura 3.34: Imagen de amplitud MFM, filtro promedio 20 píxeles más cercanos, disco de Py  $1.6[\mu m]$  de diámetro  $50[nm]$  de espesor.

Como se puede apreciar, el disco presenta dos lados bien demarcados, un lado oscuro, uno claro y un punto central. Estas tres partes connotan la estructura magnética del disco. Al igual las imágenes vistas en la figura 3.35 del artículo [40], la dirección de los momentos magnéticos formarán estos sectores sombreados, siendo los lados laterales los vectores verticales y los superior e inferior los vectores horizontales, todos estos en el plano.

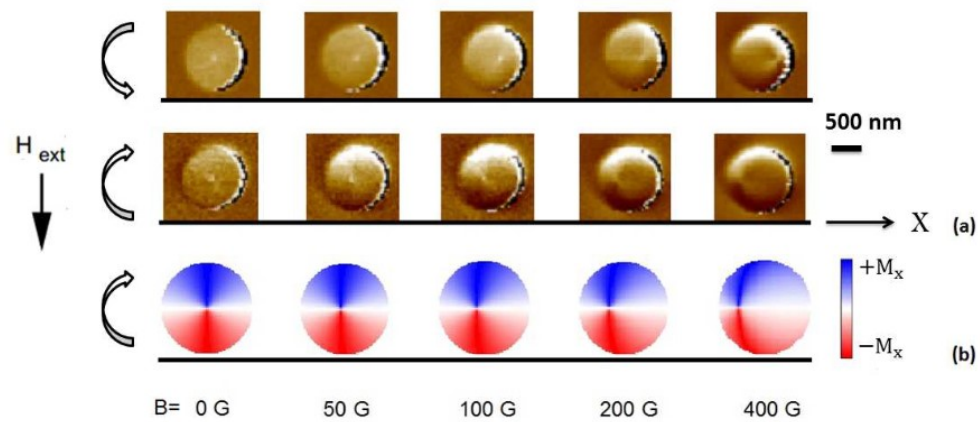


Figura 3.35: Simulación y observación experimental del estado vórtice de discos de  $1[\mu\text{m}]$  de diámetro y  $50[\text{nm}]$  de espesor. a) Imágenes de MFM mostrando el desplazamiento del vórtice al aplicar campo magnético, primera fila contra reloj, segunda fila a favor de reloj. b) Imágenes del estado de magnetización de los discos obtenida mediante simulación OOMMF. [40].

# COMPORTAMIENTO DE LOS DISCOS EN SOLUCIÓN ACUOSA

Con los discos ya fabricados y caracterizados magnéticamente, se realizan experimentos en solución acuosa para observar el comportamiento de los discos frente a un campo magnético externo. El sistema consiste en un láser que incide en el *eppendorf* con los nanodiscos suspendidos en agua y un fotoreceptor para adquirir la señal.

La configuración del sistema utilizado se puede observar en la figura 4.1. Un láser es guiado a través de espejos hasta un lente focal, el área del láser es disminuida para enfocar de mejor manera en el *eppendorf* y así obtener una mejor señal. Una vez que pasa el *eppendorf*, el haz de luz se expande por lo que es necesario un lente que tome esa señal y la concentre nuevamente. Este último lente toma la señal y luego pasa nuevamente por otro lente focal el cual se encuentra a una distancia necesaria para luego enfocar el haz de luz en el área efectiva del fotodetector.

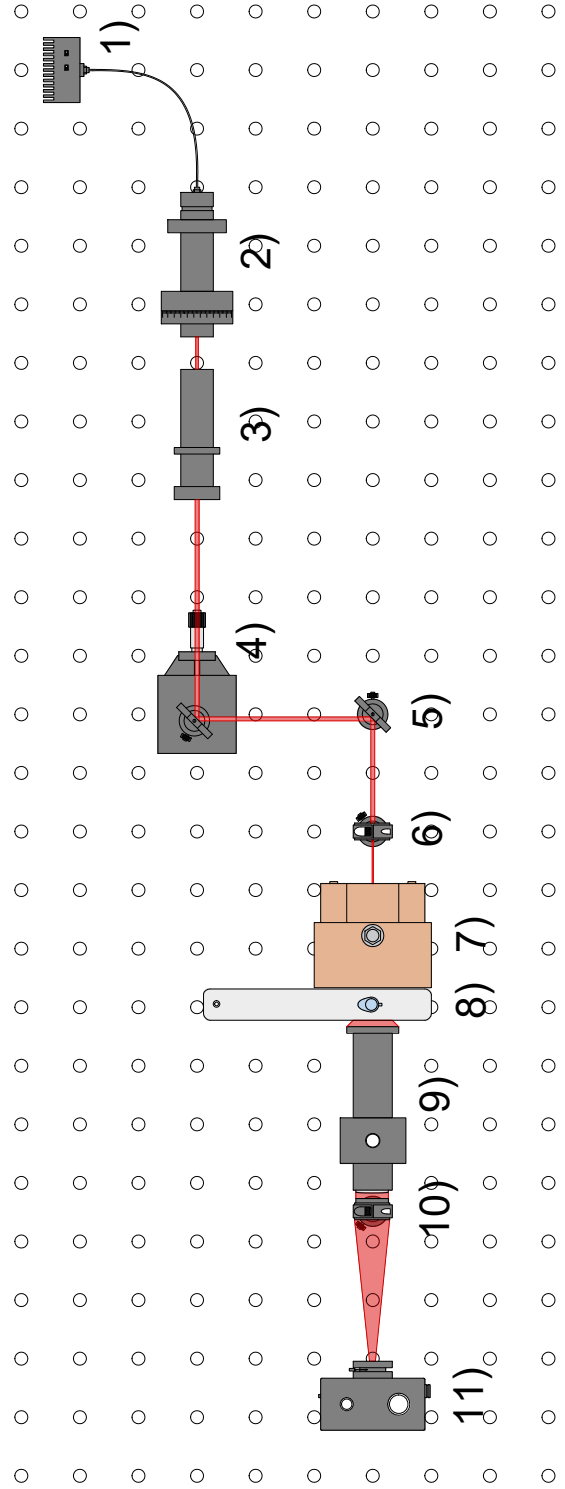


Figura 4.1: Esquemático del experimento para la observación del comportamiento de los discos en solución acuosa. Un láser es dirigido y focalizado hacia el *eppendorf* con los discos en suspensión para observar su comportamiento frente a campo magnéticos externos. Una vez pasado el *eppendorf* la señal es focalizada en el foto detector. 1) Fuente láser, 2) Apertura, 3) Colimador, 4) Espejo reflector, 5) Espejo reflector, 6) Lente focal, 7) Bobina, 8) Porta muestras, 9) Colimador, 10) Lente focal, 10) Fotodetector.

En las figuras 4.2 y 4.3 se puede observar de manera general el comportamiento de los discos frente a un campo magnético externo y como estos afectan a la intensidad del láser. Al aplicar un campo magnético con una forma de onda cuadrada al sistema, los discos van a alinearse con el campo. Esto hará que el área efectiva que bloquea la luz disminuya, dejando pasar más luz y por lo tanto, se obtendrá una mayor señal en el foto detector.

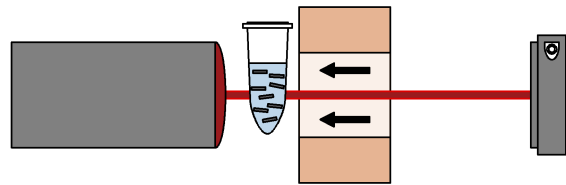


Figura 4.2: Alineación de los discos frente a un campo magnético externo. El haz pasa libremente, aumentando la señal del fotoreceptor.

Cuando se deja de aplicar campo, es decir en la parte inferior de la onda cuadrada, los discos ya no estarán sometidos al campo magnético, haciendo que los discos se dispersen en el líquido, aumentando el área efectiva y disminuyendo la intensidad del láser.

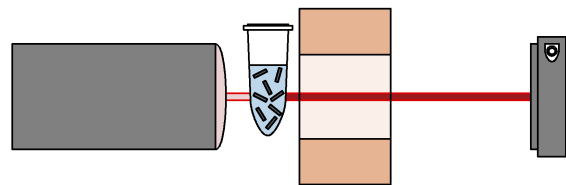


Figura 4.3: Discos dispersos sin aplicar campo magnético. El haz choca contra los discos, disminuyendo la señal que llega al foto detector.

La alineación de los discos frente al campo magnético ocurre debido al torque producido. El torque depende simplemente del campo aplicado, el ángulo formado respecto al campo, el volumen del disco y su susceptibilidad magnética [9]. En la figura 4.4 se puede observar el esquema que lo representa y en la ecuación 4.0.1 la fórmula para calcular el torque máximo posible.

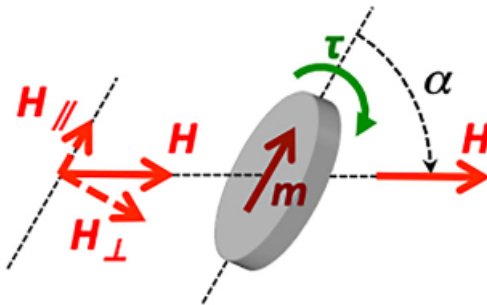


Figura 4.4: Esquema de producción del torque en los discos nano magnéticos. El torque es máximo cuando el ángulo de incidencia es de  $45^\circ$  [9].

$$\tau_m = \frac{1}{2} \cdot V[m^3] \cdot \chi \cdot H[A/m] \quad (4.0.1)$$

Un tema importante a tomar en cuenta es el factor de viscosidad en los ambientes biológicos. El cálculo de torque que se realizó en las secciones siguientes no tiene agregado este factor. La viscosidad encontrada en ambientes celulares limita la aplicación de frecuencia hasta solo decenas de hertz, frecuencias más altas no producen movimiento rotacional en los discos haciendo solo posible movimientos traslaciones [20]. Un resumen con los resultados se presenta en la tabla 4.1.

**A. Cálculo de susceptibilidad y torque de los discos de Fe de 260[nm] de diámetro y 50[nm] de espesor**

Para hacer el cálculo de susceptibilidad, simplemente hay que calcular la pendiente de la curva de histéresis (desnormalizada) de la muestra, esto se hace tomando en cuenta el gráfico a) de la figura 3.1. Para ello se toman dos puntos y se calcula la pendiente.

$$\chi_m = \frac{0.504 - 0.429}{0.115 - 0.094} * 1.357 \quad (4.0.2)$$

$$\chi_m = 4.8464$$

Tras obtener este valor, se utiliza la ecuación de torque máximo y se calcula.

$$\tau_{max} = \frac{1}{2} * 4.8464 * 2.6946 * 10^{-21} * 12732 \quad (4.0.3)$$

$$\tau_{max} = 8.3 * 10^{-17} [N \cdot m]$$

**B. Cálculo de susceptibilidad y torque de los discos de Py de 790[nm] de diámetro y 50[nm] de espesor**

Se repite el mismo proceso que en la subsección anterior. Se toma en cuenta la histéresis del gráfico c) de la figura 3.2 para el cálculo de la susceptibilidad.

$$\chi_m = \frac{0.910 - 0.052}{0.051 - 0.004} * 1.294 \quad (4.0.4)$$

$$\chi_m = 23.6223$$

Torque máximo.

$$\tau_{max} = \frac{1}{2} * 23.6223 * 2.4633 * 10^{-20} * 12732 \quad (4.0.5)$$

$$\tau_{max} = 3.7 * 10^{-15} [N \cdot m]$$

	Susceptibilidad $\chi$	Torque Máximo $[N \cdot m]$
Fe 260[nm] 50[nm] de espesor	4.8464	$8.3 * 10^{-17}$
Py 790[nm] 50[nm] de espesor	23.3493	$3.7 * 10^{-15}$

Tabla 4.1: Torques máximos producidos en los discos seleccionados previamente por sus características magnéticas.

## 4.1. Medidas de dinámica de discos en agua

A continuación se presentan las medidas realizadas de los discos suspendidos en agua dentro de los *ependorf*. Las medidas presentadas corresponden a los discos de Py de 790[nm] de diámetro 50[nm] de espesor.

Se realizaron medidas a 0.2[Hz] y 1[Hz] aplicando un campo externo con forma de onda cuadrada de 160[Oe] durante veinte minutos de manera constante. Los discos previo a la mediciones, se les aplicaron cuatro veces un proceso de ultra sonido durante un minuto seguido de treinta segundos de agitador vortex de manera intercalada para garantizar su dispersión en los *ependorf*.

En las medidas de 0.2[Hz], los datos son adquiridos cada cinco minutos durante veinte minutos, dando un total de cinco medidas por discos. Para las medidas de 1[Hz], los datos son adquiridos de la misma manera. Las medidas de 0.2[Hz] corresponden a dos oscilaciones completas usando un muestreo de 100[Hz] y las medidas de 1[Hz] son diez oscilaciones completas usando un muestreo de 100[Hz].

En los gráficos de las figuras 4.5, se muestran las medidas a 0.2[Hz] y 1[Hz] realizadas a los nanodiscos.

## 4.1.1. Medidas de 0.2[Hz] y 1[Hz]

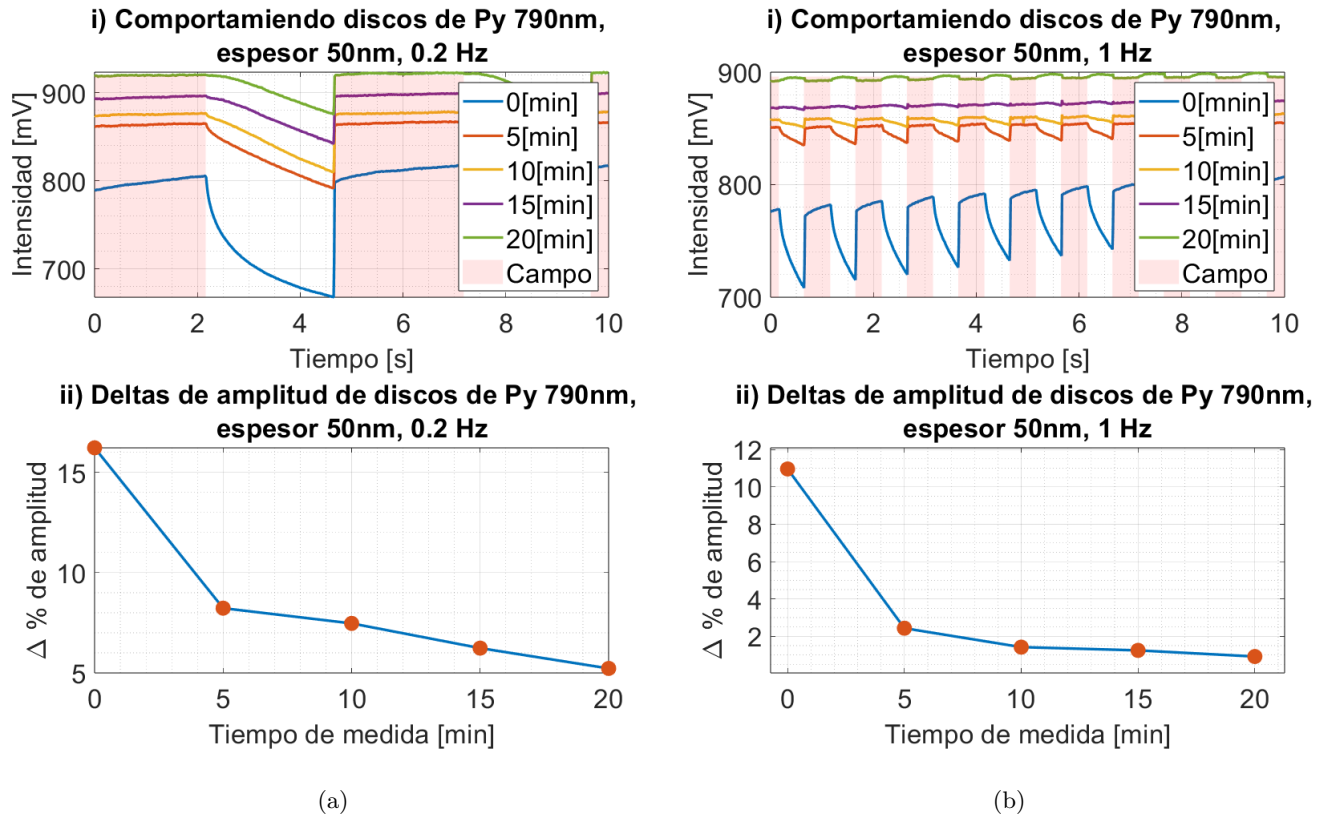


Figura 4.5: Medidas de intensidad de láser capturada con el fotodetector a 1 [Hz] y a 0.2[Hz]. Gráfico a), discos de Py de 790[nm] de diámetro, 50[nm] de espesor medidas a 0.2[Hz], gráfico b) discos de Py de 790[nm] de diámetro, 50[nm] de espesor medidas a 1[Hz]. Gráficos i) Cambio de intensidad luminosa a través del tiempo, gráficos ii) deltas de amplitud a través del tiempo.

El proceso de amortiguamiento en la intensidad luminosa observado en los gráficos 4.5, se atribuye por la formación de cadenas en los nanodiscos debido a la descomposición espectral de la señal aplicada. Cuando el campo magnético es aplicado, los nanodiscos se alinean con el campo dejando pasar mayor intensidad luminosa, pero al mismo tiempo, van juntándose de a poco formando cadenas. La componente continua de la señal impide que las cadenas se dispersen, favoreciendo el crecimiento de las mismas. Cuando la señal no se encuentra en régimen de trabajo (campo en cero) las cadenas se dispersan en el líquido y por efectos del crecimiento de las cadenas la dispersión es cada vez mas lenta . Este fenómeno es reportado en el artículo [9].

Como se puede ver en los gráficos i), una primera medida a tiempo cero presenta mayores fluctuaciones de intensidad en el fotodetector. Los discos están dispersos bloqueando en mayor medida el láser y cuando se alinean dejan pasar mayor cantidad de luz. Con el paso del tiempo las cadenas se van formando y el efecto entre bloqueo de luz y paso de luz cada vez se observa en menor medida, disminuyendo los delta de intensidad como se pueden ver en los gráficos ii). En el minuto veinte, las cadenas se encuentran formadas y estas ya no son capaces de dispersarse cuando el campo magnético esta fuera de régimen de trabajo, observando un pequeño *ripple* en la señal del fotodetector. La frecuencia solamente aumenta este efecto, dejándose ver con mayor facilidad en las medidas de 1[Hz] a comparación de las medidas a 0.2[Hz]

Para ver de mejor manera el proceso de formación de cadenas, discos de Py de 1.6[ $\mu m$ ] de diámetro y 50[nm] de espesor son observados bajo un microscopio óptico y sometidos bajo campo magnético para ver el fenómeno de formación de cadenas. Las imágenes de la figura 4.6 muestran la formación de cadenas de los discos con el campo aplicado a través del plano y las imágenes de la figura 4.7 muestra la formación de cadenas aplicando el campo dentro del plano.

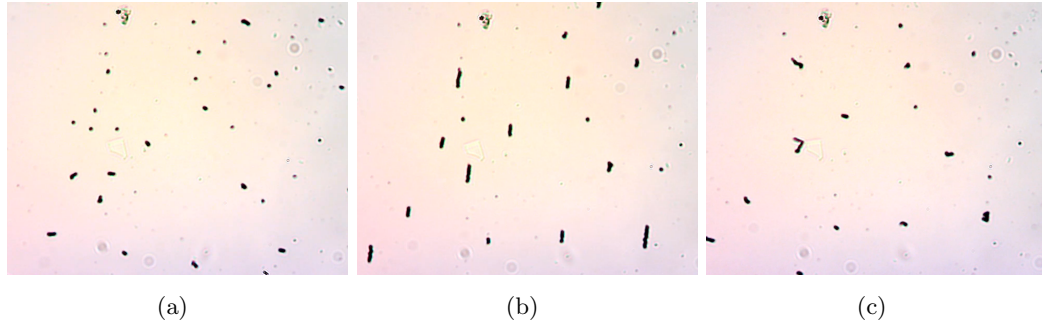


Figura 4.6: Formación de cadenas de discos de Py de  $[\mu m]$  aplicando un campo de  $40[Oe]$  a través del plano. a) Discos libres sin aplicación de campo magnético externo. b) Alineación y producción de cadenas frente a un campo magnético externo de  $40 [Oe]$ . c) Campo magnético apagado, desalineación de discos y doblamiento de cadenas

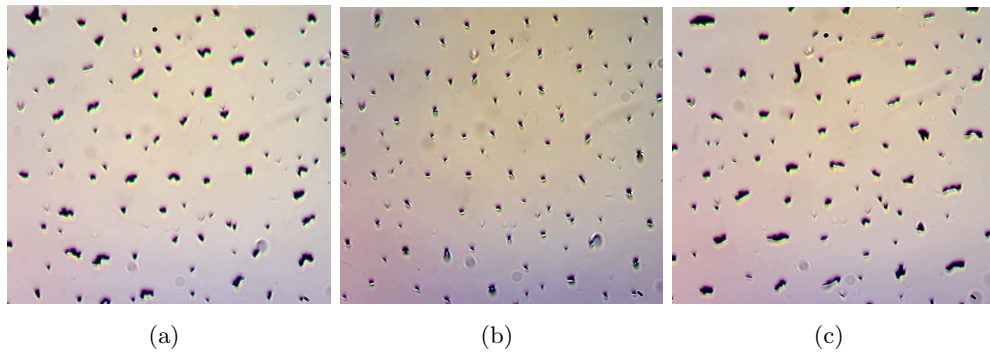


Figura 4.7: Formación de cadenas de discos de Py de  $[\mu m]$  aplicando un campo de  $40[Oe]$  dentro del plano. a) Discos dispersos sin campo magnético externo. b) Aplicación de campo magnético en el plano. Los discos se alinean en dirección del plano formando cadenas. c) Campo magnético apagado. Dispersión de los discos y de cadenas remanentes.

# CONCLUSIONES

Nanodiscos de Py y de Fe de 790[nm] y 260[nm] de diámetro de 50[nm] y 100[nm] de espesor en estado vórtice, fueron exitosamente fabricados bajo el uso de las técnicas de litografía por interferencia para el patronaje y evaporación por haz de electrones para la deposición.

El proceso de caracterización magnética fué realizado con el uso de VSM donde se observó la coercitividad, campo de saturación, remanencia y forma de onda de la curva de histéresis. La caracterización se realizó en dos diferentes instancias. Una primera con los discos como película nanoestructurada y una segunda con los discos liberados en los *ependorf*.

Como película nanoestructurada, los discos que presentaron menor remanencia y coercitividad fueron los de Py de 790[nm] de diámetro y 50[nm] de espesor, con unos valores de coercitividad de 20 [Oe] y una remanencia del 1 %.

Liberados en los *ependorf*, los discos que presentaron menor remanencia y menor coercitividad fueron los de Fe de 260[nm] de diámetro y 50[nm] de espesor, con unos valores de coercitividad de 30[Oe] y una remanencia del 3 %.

Los cambios observados en las medidas desde película nanoestructurada a *ependorf* para el caso de los discos de Py de 790[nm] de diámetro y 50[nm] de espesor, fueron de un aumento del 50 % de la coercitividad, de 20[Oe] a 30[Oe] y un aumento de la remanencia del 6 %, del 1 % al 7 %. Por su parte los cambios observados de película nanoestructurada a *ependorf* de los discos de Fe de 260[nm] de diámetro y 50[nm] de espesor, fueron una disminución de la coercitividad del 400 %, de 100[Oe] a 30[Oe], y una baja en la remanencia del 2 %, del 5 % al 3 %.

En paralelo a las mediciones en VSM, con las simulaciones micromagnéticas se observaron las propiedades y el comportamiento ideal de los discos fabricados. Toda

la serie de discos simulados presentaron el estado vórtice como el estado fundamental. En particular, el disco de Fe de 260[nm] de diámetro y 50[nm] de espesor, presentó un vórtice fuera del plano con una nucleación de 2300[Oe] y una coercitividad de 5.2[Oe] y remanencia del 0.02%. Por su parte, el disco de Py de 790[nm] de diámetro y 50[nm] de espesor, presentó dos vórtices fuera del plano y luego decayeron a un vórtice simple fuera del plano. Luego en el proceso de remagnetización, el disco presentó dos vórtices, uno fuera del plano y otro dentro del plano, que luego decayeron a un vórtice simple fuera del plano.

Con las simulaciones ya realizadas, se compararon las capacidades de disipación de energía de los discos simulados y de los fabricados. Para los resultados de VSM, los discos de Fe de 260[nm] de diámetro y de 50[nm] de espesor presentan una capacidad de disipación de energía de  $37.06[\frac{kJ}{m^3}]$  y en la simulación micromagnética de  $108.84[\frac{kJ}{m^3}]$ . Para los discos de Py de 790[nm] de diámetro y 50[nm] de espesor, en las medidas de VSM estos presentaron una disipación de energía de  $25.55[\frac{kJ}{m^3}]$  y en la simulación de  $49.64[\frac{kJ}{m^3}]$ .

En las medidas de MFM, se observó el vórtice como estado fundamental en los nanodiscos de Py de 1.6[ $\mu m$ ].

Finalmente para observar el comportamiento de los discos bajo un campo magnético en una solución acuosa, se montó un equipo que consistió en un láser incidente a los *ependorf* capaz de medir cambios de intensidad luminosa. Estos cambios en la intensidad reflejaron el comportamiento que tenían.

Teniendo en cuenta que los discos experimentan torque frente al campo magnético, son calculados los valores para los discos de Fe de 260[nm] de diámetro y 50[nm] de espesor y para los discos de Py de 790[nm] de diámetro y 50[nm] de espesor. Los discos de Fe presentaron un torque de  $8.3 \cdot 10^{-17}[N \cdot m]$  y los de Py de  $3.7 \cdot 10^{-15}[N \cdot m]$ .

En las medidas de comportamiento de solución acuosa, para 0.2[Hz] y 1[Hz] los discos de Py de 790[nm] de diámetro y 50[nm] de espesor, presentaron un decrecimiento amortiguado en la intensidad de láser a medida que pasa el tiempo. Este decrecimiento en la intensidad es debido a la formación de cadenas por efectos del campo magnético aplicado, fenómeno que se dejó visto de mejor manera en las observaciones con microscopio óptico a discos de Py 1.6[ $\mu m$ ] de diámetro y 50[nm] de espesor.

# TRABAJOS FUTUROS

Queda por explorar la fabricación de discos de diferentes diámetro y espesores para tener un diagrama completo de la naturaleza magnética de los nanodiscos. También abarcar los diferentes efectos de los cambios de geometría al momento de realizar la litografía, efectos que pueden provocar cambios en las curvas de histéresis. Un diagrama completo ayudaría a separar el uso de los discos dependiendo de la susceptibilidad observada y de su potencial de liberación de energía.

Un trabajo completo de medidas de MFM de los discos anteriormente mencionados, ayudaría a corroborar de manera experimental la formación y comportamiento de los vórtices, completando las características magnéticas de las muestras.

También se necesita explorar el comportamiento de nanodiscos en ambientes biológicos, adaptando el sistema de medición láser para otro tipos de líquidos. La formación de cadenas, o la capacidad de agrupamiento puede ser afectada por estas propiedades debido a la capacidad de los nanodiscos de moverse en estos diferentes líquidos.

Finalmente experimentar directamente con células cancerígenas con los discos fabricados y realizar estudios sobre los efectos de la hipertermia celular y los torques aplicados.

**CÓDIGOS MUMAX PARA  
SIMULACIÓN MICRO  
MAGNÉTICA Y CÁLCULO DE  
NÚMERO DE DISCOS**

## A.1. Parámetros de deposición

191022.5	15/11/2022			
	$Al_{50}$	$Ti_5$	$Fe_{50/100}$	$Ti_5$
$\rho$ [ $gr/cm^3$ ]	2,7	4,5	7,86	4,5
TF (Tooling Factor)	1,73	1,37	1,6	1,37
Corriente [mA]	30	75	65-74	75
Presión Base [mbar]	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$3,4 \cdot 10^{-6}$	$5,4 \cdot 10^{-6}$
Presión de deposición [mbar]	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$5,4 \cdot 10^{-6}$
Velocidad promedio de deposición [ $nm/min$ ]	4,76	2,73	4,16	2,85

Tabla A.1: Parámetros de deposición para los discos de Fe de 790 nm de diámetro, espesores 50 nm y 100 nm.

191022.5	16/11/2022			
	$Al_{50}$	$Ti_5$	$Py_{50/100}$	$Ti_5$
$\rho$ [ $gr/cm^3$ ]	2,7	4,5	8,7	4,5
TF (Tooling Factor)	1,73	1,37	1,27	1,37
Corriente [mA]	30	75	85-97	76
Presión Base [mbar]	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$5,5 \cdot 10^{-6}$	$4,6 \cdot 10^{-6}$
Presión de deposición [mbar]	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$3,4 \cdot 10^{-6}$
Velocidad promedio de deposición [ $nm/min$ ]	4,76	2,38	3,93	3

Tabla A.2: Parámetros de deposición para los discos de Py de 790nm de diámetro, espesores 50 nm y 100 nm.

100920.2	23/11/2022			
	$Al_{50}$	$Ti_5$	$Fe_{50/100}$	$Ti_5$
$\rho$ [ $gr/cm^3$ ]	2,7	4,5	7,86	4,5
TF (Tooling Factor)	1,73	1,37	1,6	1,37
Corriente [mA]	30	75	70-77	79
Presión Base [mbar]	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$6,3 \cdot 10^{-6}$
Presión de deposición [mbar]	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$6,3 \cdot 10^{-6}$
Velocidad promedio de deposición [ $nm/min$ ]	5,78	3,54	3,65	3

Tabla A.3: Parámetros de deposición para los discos de Fe de 260 nm de diámetro, espesores 50 nm y 100 nm.

100920.2	23/11/2022			
	$Al_{50}$	$Ti_5$	$Py_{50/100}$	$Ti_5$
$\rho$ [ $gr/cm^3$ ]	2,7	4,5	7,86	4,5
TF (Tooling Factor)	1,73	1,37	1,6	1,37
Corriente [mA]	30	75	70-77	79
Presión Base [mbar]	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$6,3 \cdot 10^{-6}$
Presión de deposición [mbar]	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$6,3 \cdot 10^{-6}$
Velocidad promedio de deposición [ $nm/min$ ]	5,78	3,54	3,65	3

Tabla A.4: Parámetros de deposición para los discos de Py de 260 nm de diámetro, espesores 50 nm y 100 nm.

## A.2. Códigos Mumax

### A.2.1. 191022\_50nm\_Fe

```
SetGridsize(384, 384, 25)
SetCellsize(2.75e-9, 2.75e-9, 2e-9)

EdgeSmooth = 8

setgeom( imageShape("191022.png"). inverse() )
saveas(geom, "0")

Msat = 1700e3
Aex = 2.1e-11
alpha = 0.1

m = randomMag()
relax()

Bmax := 300.0e-3
Bstep := 5e-3
MinimizerStop = 1e-6
TableAdd(B_ext)

for B:=Bmax; B>=Bmax; B-=Bstep{
    B_ext = vector(B, 0, 0)
    minimize()
    tablesave()
    save(m)
}

for B :=-Bmax; B<=Bmax; B+=Bstep{
    B_ext = vector(B, 0, 0)
    minimize()
    tablesave()
    save(m)
}
```

**A.2.2. 191022\_100nm\_Fe**

```
SetGridsize(384, 384, 50)
SetCellsize(2.75e-9, 2.75e-9, 2e-9)

EdgeSmooth = 8

setgeom( imageShape("191022.png"). inverse() )
saveas(geom, "0")

Msat = 1700e3
Aex = 2.1e-11
alpha = 0.1

m = randomMag()
relax()

Bmax := 300.0e-3
Bstep := 5e-3
MinimizerStop = 1e-6
TableAdd(B_ext)

for B:=Bmax; B>Bmax; B-=Bstep{
    B_ext = vector(B, 0, 0)
    minimize()
    tablesave()
    save(m)
}

for B :=-Bmax; B<=Bmax; B+=Bstep{
    B_ext = vector(B, 0, 0)
    minimize()
    tablesave()
    save(m)
}
```

**A.2.3. 191022\_50nm\_Py**

```
SetGridsize(384, 384, 25)
SetCellsize(2.75e-9, 2.75e-9, 2e-9)

EdgeSmooth = 8

setgeom( imageShape("191022.png") .inverse() )
saveas(geom, "0")

Msat = 800e3
Aex = 13e-12
alpha = 0.02

m = randomMag()
relax()

Bmax := 300.0e-3
Bstep := 5e-3
MinimizerStop = 1e-6
TableAdd(B_ext)

for B:=Bmax; B>Bmax; B-=Bstep{
    B_ext = vector(B, 0, 0)
    minimize()
    tablesave()
    save(m)
}

for B :=-Bmax; B<=Bmax; B+=Bstep{
    B_ext = vector(B, 0, 0)
    minimize()
    tablesave()
    save(m)
}
```

**A.2.4. 191022\_100nm\_Py**

```
SetGridsize(384, 384, 50)
SetCellsize(2.75e-9, 2.75e-9, 2e-9)

EdgeSmooth = 8

setgeom( imageShape("191022.png") .inverse() )
saveas(geom, "0")

Msat = 800e3
Aex = 13e-12
alpha = 0.02

m = randomMag()
relax()

Bmax := 300.0e-3
Bstep := 5e-3
MinimizerStop = 1e-6
TableAdd(B_ext)

for B:=Bmax; B>Bmax; B-=Bstep{
    B_ext = vector(B, 0, 0)
    minimize()
    tablesave()
    save(m)
}

for B :=-Bmax; B<=Bmax; B+=Bstep{
    B_ext = vector(B, 0, 0)
    minimize()
    tablesave()
    save(m)
}
```

**A.2.5. 100920\_50nm\_Fe**

```
SetGridsize(256, 256, 25)
SetCellsize(1.455e-9, 1.455e-9, 2e-9)

EdgeSmooth = 8

setgeom( imageShape("100920.png"). inverse() )
saveas(geom, "0")

Msat = 1700e3
Aex = 2.1e-11
alpha = 0.1

m = randomMag()
relax()

Bmax := 300.0e-3
Bstep := 5e-3
MinimizerStop = 1e-6
TableAdd(B_ext)

for B:=Bmax; B>Bmax; B-=Bstep{
    B_ext = vector(B, 0, 0)
    minimize()
    tablesave()
    save(m)
}

for B :=-Bmax; B<=Bmax; B+=Bstep{
    B_ext = vector(B, 0, 0)
    minimize()
    tablesave()
    save(m)
}
```

**A.2.6. 100920\_100nm\_Fe**

```
SetGridsize(256, 256, 50)
SetCellsize(1.455e-9, 1.455e-9, 2e-9)

EdgeSmooth = 8

setgeom( imageShape("100920.png"). inverse() )
saveas(geom, "0")

Msat = 1700e3
Aex = 2.1e-11
alpha = 0.1

m = randomMag()
relax()

Bmax := 300.0e-3
Bstep := 5e-3
MinimizerStop = 1e-6
TableAdd(B_ext)

for B:=Bmax; B>Bmax; B-=Bstep{
    B_ext = vector(B, 0, 0)
    minimize()
    tablesave()
    save(m)
}

for B :=-Bmax; B<=Bmax; B+=Bstep{
    B_ext = vector(B, 0, 0)
    minimize()
    tablesave()
    save(m)
}
```

**A.2.7. 100920\_50nm\_Py**

```
SetGridsize(256, 256, 25)
SetCellsize(1.455e-9, 1.455e-9, 2e-9)

EdgeSmooth = 8

setgeom( imageShape("100920.png") .inverse() )
saveas(geom, "0")

Msat = 800e3
Aex = 13e-12
alpha = 0.02

m = randomMag()
relax()

Bmax := 300.0e-3
Bstep := 5e-3
MinimizerStop = 1e-6
TableAdd(B_ext)

for B:=Bmax; B>Bmax; B-=Bstep{
    B_ext = vector(B, 0, 0)
    minimize()
    tablesave()
    save(m)
}

for B :=-Bmax; B<=Bmax; B+=Bstep{
    B_ext = vector(B, 0, 0)
    minimize()
    tablesave()
    save(m)
}
```

**A.2.8. 100920\_100nm\_Py**

```
SetGridsize(256, 256, 50)
SetCellsize(1.455e-9, 1.455e-9, 2e-9)

EdgeSmooth = 8

setgeom( imageShape("100920.png") .inverse() )
saveas(geom, "0")

Msat = 800e3
Aex = 13e-12
alpha = 0.02

m = randomMag()
relax()

Bmax := 300.0e-3
Bstep := 50e-3
MinimizerStop = 1e-6
TableAdd(B_ext)

for B:=Bmax; B>Bmax; B-=Bstep{
    B_ext = vector(B, 0, 0)
    minimize()
    tablesave()
    save(m)
}

for B :=-Bmax; B<=Bmax; B+=Bstep{
    B_ext = vector(B, 0, 0)
    minimize()
    tablesave()
    save(m)
}
```

## A.3. Cálculo de discos

### A.3.1. Fe 790[nm] de diámetro, 50[nm] de espesor

Discos de Hierro, 790[nm] diámetro, 50[nm] espesor	
	Resultados de VSM en película nanoestructurada
Momento de saturación	$2.3 * 10^{-3} [emu]$
Área de la muestra	85.04925 [ $mm^2$ ]
Periodicidad de los discos	1.251 [ $\mu m$ ]
Número de discos	$5.43 * 10^7$
Momento magnético por disco	$4.23 * 10^{-11} [emu]$
Diámetro de los discos	790 [ $nm$ ]
Área de los discos	0.492651 [ $\mu m^2$ ]
Espesor de los discos	50 [ $nm$ ]
Volumen de los discos	0.0246326 [ $\mu m^3$ ]
Magnetización	$1.72 * 10^3 [\frac{emu}{cm^3}]$
	Discos en el sustrato
Área de la muestra (discos)	85.04925 [ $mm^2$ ]
Periodicidad de los discos	1251 [ $\mu m$ ]
Número de discos	$5.43 * 10^7$
	Discos en solución acuosa
Momento Magnético	$1.4 * 10^{-3}$
Volumen acuoso	1 [ $ml$ ]
Número de discos	$3.31 * 10^7$
Eficiencia	60.87%

**A.3.2. Fe 790[nm] de diámetro, 100[nm] de espesor**

Discos de Hierro, 790[nm] diámetro, 100[nm] espesor	
	Resultados de VSM en película nanoestructurada
Momento de saturación	$4.3 * 10^{-3} [emu]$
Área de la muestra	$87.839 [mm^2]$
Periodicidad de los discos	$1.264 [\mu m]$
Número de discos	$5.5 * 10^7$
Momento magnético por disco	$7.82 * 10^{-11} [emu]$
Diámetro de los discos	$790 [nm]$
Área de los discos	$0.492651 [\mu m^2]$
Espesor de los discos	$50 [nm]$
Volumen de los discos	$0.049265199 [\mu m^3]$
Magnetización	$1.59 * 10^3 [\frac{emu}{cm^3}]$
	Discos en el sustrato
Área de la muestra (discos)	$87.839 [mm^2]$
Periodicidad de los discos	$1.264 [\mu m]$
Número de discos	$5.5 * 10^7$
	Discos en solución acuosa
Momento Magnético	$2.66 * 10^{-3}$
Volumen acuoso	$1 [ml]$
Número de discos	$3.4 * 10^7$
Eficiencia	61.86 %

**A.3.3. Fe 260[nm] de diámetro, 50[nm] de espesor**

Discos de Hierro, 260[nm] diámetro, 50[nm] espesor	
	Resultados de VSM en película nanoestructurada
Momento de saturación	$1.3 * 10^{-3} [emu]$
Área de la muestra	104.9186667 [ $mm^2$ ]
Periodicidad de los discos	0.462 [ $\mu m$ ]
Número de discos	$4.92 * 10^8$
Momento magnético por disco	$2.64 * 10^{-12} [emu]$
Díametro de los discos	260 [ $nm$ ]
Área de los discos	0.053912872 [ $\mu m^2$ ]
Espesor de los discos	50 [ $nm$ ]
Volumen de los discos	0.002694644 [ $\mu m^3$ ]
Magnetización	$9.81 * 10^2 [\frac{emu}{cm^3}]$
	Discos en el sustrato
Área de la muestra (discos)	104.9186667 [ $mm^2$ ]
Periodicidad de los discos	0.462 [ $\mu m$ ]
Número de discos	$4.92 * 10^8$
	Discos en solución acuosa
Momento Magnético	$7.28 * 10^{-4}$
Volumen acuoso	1 [ $ml$ ]
Número de discos	$2.75 * 10^8$
Eficiencia	56 %

**A.3.4. Fe 260[nm] de diámetro, 100[nm] de espesor**

Discos de Hierro, 260[nm] diámetro, 100[nm] espesor	
	Resultados de VSM en película nanoestructurada
Momento de saturación	$2 * 10^{-3} [emu]$
Área de la muestra	$84.05266667 [mm^2]$
Periodicidad de los discos	$0.462 [\mu m]$
Número de discos	$3.94 * 10^8$
Momento magnético por disco	$4.87 * 10^{-12} [emu]$
Diámetro de los discos	$260 [nm]$
Área de los discos	$0.053912872 [\mu m^2]$
Espesor de los discos	$100 [nm]$
Volumen de los discos	$0.005391287 [\mu m^3]$
Magnetización	$9.04 * 10^2 [\frac{emu}{cm^3}]$
	Discos en el sustrato
Área de la muestra (discos)	$84.05266667 [mm^2]$
Periodicidad de los discos	$0.462 [\mu m]$
Número de discos	$3.94 * 10^8$
	Discos en solución acuosa
Momento Magnético	$1.25 * 10^{-3}$
Volumen acuoso	$1 [ml]$
Número de discos	$2.57 * 10^8$
Eficiencia	65.15 %

**A.3.5. Py 790[nm] de diámetro, 50[nm] de espesor**

Discos de Permalloy, 790[nm] diámetro, 50[nm] espesor	Resultados de VSM en película nanoestructurada
Momento de saturación	$1.29 * 10^{-3} [emu]$
Área de la muestra	$93.75333333 [mm^2]$
Periodicidad de los discos	$1.288 [\mu m]$
Número de discos	$5.65 * 10^7$
Momento magnético por disco	$2.29 * 10^{-11} [emu]$
Diámetro de los discos	$790 [nm]$
Área de los discos	$0.492651994 [\mu m^2]$
Espesor de los discos	$50 [nm]$
Volumen de los discos	$0.0246326 [\mu m^3]$
Magnetización	$9.29 * 10^2 [\frac{emu}{cm^3}]$
	Discos en el sustrato
Área de la muestra (discos)	$93.75333333 [mm^2]$
Periodicidad de los discos	$1.288 [\mu m]$
Número de discos	$5.65 * 10^7$
	Discos en solución acuosa
Momento Magnético	$8 * 10^{-4}$
Volumen acuoso	$1 [ml]$
Número de discos	$3.5 * 10^7$
Eficiencia	61.87 %

**A.3.6. Py 790[nm] de diámetro, 50[nm] de espesor**

Discos de Py, 790[nm] diámetro, 50[nm] espesor	
	Resultados de VSM en película nanoestructurada
Momento de saturación	$2.6 * 10^{-3} [emu]$
Área de la muestra	$101.7583333 [mm^2]$
Periodicidad de los discos	$1.286 [\mu m]$
Número de discos	$6.15 * 10^7$
Momento magnético por disco	$3.35 * 10^{-11} [emu]$
Diámetro de los discos	$790 [nm]$
Área de los discos	$0.492651994 [\mu m^2]$
Espesor de los discos	$100 [nm]$
Volumen de los discos	$0.049265199 [\mu m^3]$
Magnetización	$6.8 * 10^2 [\frac{emu}{cm^3}]$
	Discos en el sustrato
Área de la muestra (discos)	$101.7583333 [mm^2]$
Periodicidad de los discos	$1.286 [\mu m]$
Número de discos	$6.15 * 10^7$
	Discos en solución acuosa
Momento Magnético	$1 * 10^{-3}$
Volumen acuoso	$1 [ml]$
Número de discos	$2.99 * 10^7$
Eficiencia	48.52 %

**A.3.7. Py 260[nm] de diámetro, 100[nm] de espesor**

Discos de Py, 260[nm] diámetro, 100[nm] espesor	
	Resultados de VSM en película nanoestructurada
Momento de saturación	$5.9 * 10^{-4} [emu]$
Área de la muestra	$77.33266667 [mm^2]$
Periodicidad de los discos	$0.469 [\mu m]$
Número de discos	$3.52 * 10^8$
Momento magnético por disco	$1.68 * 10^{-12} [emu]$
Diámetro de los discos	$260 [nm]$
Área de los discos	$0.0053912872 [\mu m^2]$
Espesor de los discos	$50 [nm]$
Volumen de los discos	$0.002695644 [\mu m^3]$
Magnetización	$6.23 * 10^2 [\frac{emu}{cm^3}]$
	Discos en el sustrato
Área de la muestra (discos)	$77.33266667 [mm^2]$
Periodicidad de los discos	$0.469 [\mu m]$
Número de discos	$3.52 * 10^8$
	Discos en solución acuosa
Momento Magnético	$2 * 10^{-4}$
Volumen acuoso	$1 [ml]$
Número de discos	$1.19 * 10^8$
Eficiencia	33.9%

**A.3.8. Py 260[nm] de diámetro, 100[nm] de espesor**

Discos de Py, 260[nm] diámetro, 100[nm] espesor	
	Resultados de VSM en película nanoestructurada
Momento de saturación	$1.42 * 10^{-3} [emu]$
Área de la muestra	$121.013 [mm^2]$
Periodicidad de los discos	$0.449 [\mu m]$
Número de discos	$6 * 10^8$
Momento magnético por disco	$2.37 * 10^{-12} [emu]$
Diámetro de los discos	$260 [nm]$
Área de los discos	$0.0053912872 [\mu m^2]$
Espesor de los discos	$100 [nm]$
Volumen de los discos	$0.005391287 [\mu m^3]$
Magnetización	$4.39 * 10^2 [\frac{emu}{cm^3}]$
	Discos en el sustrato
Área de la muestra (discos)	$121.013 [mm^2]$
Periodicidad de los discos	$0.449 [\mu m]$
Número de discos	$6 * 10^8$
	Discos en solución acuosa
Momento Magnético	$1.42 * 10^{-3}$
Volumen acuoso	$1 [ml]$
Número de discos	$2.05 * 10^8$
Eficiencia	34.23 %

---

---

## REFERENCIAS

- [1] D.-H. Kim, E. A. Rozhkova, I. V. Ulasov, S. D. Bader, T. Rajh, M. S. Lesniak, and V. Novosad, “Biofunctionalized magnetic-vortex microdiscs for targeted cancer-cell destruction,” *Nature Materials*, vol. 9, pp. 165–171, Feb 2010.
- [2] T. N. Zamay, V. S. Prokopenko, S. S. Zamay, K. A. Lukyanenko, O. S. Kolovskaya, V. A. Orlov, G. S. Zamay, R. G. Galeev, A. A. Narodov, and A. S. Kichkailo, “Magnetic nanodiscs—a new promising tool for microsurgery of malignant neoplasms,” *Nanomaterials*, vol. 11, no. 6, 2021.
- [3] L. Peixoto, R. Magalhães, D. Navas, S. Moraes, C. Redondo, R. Morales, J. P. Araújo, and C. T. Sousa, “Magnetic nanostructures for emerging biomedical applications,” *Applied Physics Reviews*, vol. 7, p. 011310, Jan 2020.
- [4] J. Dulińska-Litewka, A. Łazarczyk, P. Hałubiec, O. Szafranski, K. Karnas, and A. Karewicz, “Superparamagnetic iron oxide nanoparticles—current and prospective medical applications,” *Materials*, vol. 12, no. 4, 2019.
- [5] T. N. Zamay, G. S. Zamay, I. V. Belyanina, S. S. Zamay, V. V. Denisenko, O. S. Kolovskaya, T. I. Ivanchenko, V. L. Grigorieva, I. V. Garanzha, D. V. Veprintsev, Y. E. Glazyrin, A. V. Shabanov, V. Y. Prinz, V. A. Seleznev, A. E. Sokolov, V. S. Prokopenko, P. D. Kim, A. Gargaun, M. V. Berezovski, and A. S. Zamay, “Noninvasive microsurgery using aptamer-functionalized magnetic microdisks for tumor cell eradication,” *Nucleic Acid Therapeutics*, vol. 27, pp. 105–114, Apr 2017.
- [6] A. Koh, W. Hu, R. Wilson, S. Wang, and R. Sinclair, “Preparation, structural and magnetic characterization of synthetic anti-ferromagnetic (saf) nanoparticles,” *Philosophical Magazine*, vol. 88, no. 36, pp. 4225–4241, 2008.
- [7] G. Varvaro, S. Laureti, D. Peddis, M. Hassan, G. Barucca, P. Mengucci, A. Gerardino, E. Giovine, O. Lik, D. Nissen, and M. Albrecht, “Co/pd-based synthetic antiferromagnetic thin films on au/resist underlayers: towards biomedical applications,” *Nanoscale*, vol. 11, pp. 21891–21899, 2019.

- [8] A. Manzin, R. Ferrero, and M. Vicentini, “From micromagnetic to in silico modeling of magnetic nanodisks for hyperthermia applications,” *Advanced Theory and Simulations*, vol. 4, no. 5, p. 2100013, 2021.
- [9] M. Goiriena-Goikoetxea, D. Muñoz, I. Orue, M. L. Fernández-Gubieda, J. Bokor, A. Muela, and A. García-Arribas, “Disk-shaped magnetic particles for cancer therapy,” *Applied Physics Reviews*, vol. 7, p. 011306, 01 2020.
- [10] P. Naulleau, “2.17 - optical lithography,” in *Comprehensive Nanoscience and Nanotechnology (Second Edition)* (D. L. Andrews, R. H. Lipson, and T. Nann, eds.), pp. 387–398, Oxford: Academic Press, second edition ed., 2019.
- [11] N. Pala and M. Karabiyik, *Electron Beam Lithography (EBL)*, pp. 1033–1057. Dordrecht: Springer Netherlands, 2016.
- [12] S. Franssila and S. Tuomikoski, “Chapter 20 - mems lithography,” in *Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies (Second Edition)* (M. Tilli, T. Motooka, V.-M. Airaksinen, S. Franssila, M. Paulasto-Kröckel, and V. Lindroos, eds.), Micro and Nano Technologies, pp. 427–443, Boston: William Andrew Publishing, second edition ed., 2015.
- [13] D. Resnick, “9 - nanoimprint lithography,” in *Nanolithography* (M. Feldman, ed.), pp. 315–347, Woodhead Publishing, 2014.
- [14] H. Fredriksson, Y. Alaverdyan, A. Dmitriev, C. Langhammer, D. Sutherland, M. Zäch, and B. Kasemo, “Hole-mask colloidal lithography,” *Advanced Materials*, vol. 19, no. 23, pp. 4297–4302, 2007.
- [15] P. Kelly and R. Arnell, “Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications,” *Vacuum*, vol. 56, no. 3, pp. 159–172, 2000.
- [16] J. Koskinen, “4.02 - cathodic-arc and thermal-evaporation deposition,” in *Comprehensive Materials Processing* (S. Hashmi, G. F. Batalha, C. J. Van Tyne, and B. Yilbas, eds.), pp. 3–55, Oxford: Elsevier, 2014.
- [17] A. Bashir, T. I. Awan, A. Tehseen, M. B. Tahir, and M. Ijaz, “Chapter 3 - interfaces and surfaces,” in *Chemistry of Nanomaterials* (T. I. Awan, A. Bashir, and A. Tehseen, eds.), pp. 51–87, Elsevier, 2020.
- [18] K. Alavi, “Molecular beam epitaxy,” in *Encyclopedia of Materials: Science and Technology* (K. J. Buschow, R. W. Cahn, M. C. Flemings, B. Ilshner, E. J. Kramer, S. Mahajan, and P. Veyssi ere, eds.), pp. 5765–5780, Oxford: Elsevier, 2001.

- [19] S. F. Shaikh, M. Ubaidullah, R. S. Mane, and A. M. Al-Enizi, "Chapter 4 - types, synthesis methods and applications of ferrites," in *Spinel Ferrite Nanostructures for Energy Storage Devices* (R. S. Mane and V. V. Jadhav, eds.), Micro and Nano Technologies, pp. 51–82, Elsevier, 2020.
- [20] C. Naud, C. Thébault, M. Carrière, Y. Hou, R. Morel, F. Berger, B. Diény, and H. Joisten, "Cancer treatment by magneto-mechanical effect of particles, a review," *Nanoscale Adv.*, vol. 2, pp. 3632–3655, 2020.
- [21] B. Mora, A. Perez-Valle, C. Redondo, M. D. Boyano, and R. Morales, "Cost-effective design of high-magnetic moment nanostructures for biotechnological applications," *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 10, pp. 8165–8172, Mar 2018.
- [22] M. Goirienea-Goikoetxea, A. García-Arribas, M. Rouco, A. V. Svalov, and J. M. Barandiaran, "High-yield fabrication of 60 nm permalloy nanodiscs in well-defined magnetic vortex state for biomedical applications," *Nanotechnology*, vol. 27, p. 175302, mar 2016.
- [23] W. Hu, M. Zhang, R. J. Wilson, A. L. Koh, J.-S. Wi, M. Tang, R. Sinclair, and S. X. Wang, "Fabrication of planar, layered nanoparticles using tri-layer resist templates," *Nanotechnology*, vol. 22, p. 185302, mar 2011.
- [24] D. Gregurec, A. W. Senko, A. Chuvilin, P. D. Reddy, A. Sankararaman, D. Rosenfeld, P.-H. Chiang, F. Garcia, I. Tafel, G. Varnavides, E. Ciocan, and P. Anikeeva, "Magnetic vortex nanodiscs enable remote magnetomechanical neural stimulation," *ACS Nano*, vol. 14, pp. 8036–8045, Jul 2020.
- [25] M. Mansuripur, *The magneto-optical Kerr effect*, p. 166–181. Cambridge University Press, 2 ed., 2009.
- [26] A. Vansteenkiste and B. Van de Wiele, "Mumax: A new high-performance micro-magnetic simulation tool," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 323, no. 21, pp. 2585–2591, 2011.
- [27] I. Byun and J. Kim, "Cost-effective laser interference lithography using a 405 nm alingan semiconductor laser," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 20, p. 055024, apr 2010.
- [28] F. S. Ma, H. S. Lim, V. L. Zhang, S. C. Ng, and M. H. Kuok, "Magnonic band structure investigation of one-dimensional bi-component magnonic crystal waveguides," *Nanoscale Research Letters*, vol. 7, p. 498, Sep 2012.

- [29] “Magnetic vortex state stability, reversal and dynamics in restricted geometries,” *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, vol. 8, no. 6, 2008.
- [30] M.-Y. Im, P. Fischer, K. Yamada, T. Sato, S. Kasai, Y. Nakatani, and T. Ono, “Symmetry breaking in the formation of magnetic vortex states in a permalloy nanodisk,” *Nature Communications*, vol. 3, p. 983, Jul 2012.
- [31] V. Novosad, M. Grimsditch, K. Y. Guslienko, P. Vavassori, Y. Otani, and S. D. Bader, “Spin excitations of magnetic vortices in ferromagnetic nanodots,” *Physical Review B*, vol. 66, p. 052407, Aug 2002.
- [32] K. Y. Guslienko, V. Novosad, Y. Otani, H. Shima, and K. Fukamichi, “Magnetization reversal due to vortex nucleation, displacement, and annihilation in submicron ferromagnetic dot arrays,” *Physical Review B*, vol. 65, p. 024414, Dec 2001.
- [33] F. G. Aliev, D. Dieleman, A. A. Awad, A. Asenjo, O. Iglesias-Freire, M. García-Hernández, and V. Metlushko, “Probing ground state in circular magnetic dots: Single vs. double magnetic vortex,” in *2010 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications*, 2010 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, pp. 160–163, 2010.
- [34] A. Ehrmann and T. Blachowicz, “Vortex and double-vortex nucleation during magnetization reversal in fe nanodots of different dimensions,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 475, pp. 727–733, Apr 2019.
- [35] I. L. Prejbeanu, M. Natali, L. D. Buda, U. Ebels, A. Lebib, Y. Chen, and K. Ounadjela, “In-plane reversal mechanisms in circular co dots,” *Journal of Applied Physics*, vol. 91, pp. 7343–7345, May 2002.
- [36] M. Rahm, M. Schneider, J. Biberger, R. Pulwey, J. Zweck, D. Weiss, and V. Umansky, “Vortex nucleation in submicrometer ferromagnetic disks,” *Applied Physics Letters*, vol. 82, pp. 4110–4112, Jun 2003.
- [37] S. Prosandeev and L. Bellaiche, “Controlling double vortex states in low-dimensional dipolar systems,” *Physical Review Letters*, vol. 101, p. 097203, Aug 2008.
- [38] W. Rave, K. Fabian, and A. Hubert, “Magnetic states of small cubic particles with uniaxial anisotropy,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 190, pp. 332–348, Dec 1998.
- [39] P. Vavassori, N. Zaluzec, V. Metlushko, V. Novosad, B. Ilic, and M. Grimsditch, “Magnetization reversal via single and double vortex states in submicron permalloy ellipses,” *Physical Review B*, vol. 69, p. 214404, Jun 2004.

- 
- [40] W.-M. Ju, M. Tuominen, N. Pradhan, J. Bickel, and K. Aidala, “Reverse magnetic vortex curling direction of ferromagnetic nanodisk,” *arXiv preprint arXiv:1411.7444*, 2014.