

PROYECTO FIN DE GRADO

TÍTULO: Diseño y simulación del comportamiento biestable en una memoria MRAM

AUTOR/A: Carlos González Rodríguez

TITULACIÓN: Grado en Ingeniería Electrónica de Comunicaciones

DIRECTOR/A: Jesús M^a González Fernández

TUTOR/A: Marta Sánchez Agudo

DEPARTAMENTO: Electrónica Física, Ingeniería Eléctrica y Física Aplicada

Miembros del Tribunal Calificador:

PRESIDENTE/A: Pedro Cobos Arribas

TUTOR/A: Marta Sánchez Agudo

SECRETARIO/A: Pilar Ochoa Pérez

Fecha de lectura:

Calificación:

VºBº TUTOR/A

El Secretario/La Secretaria,

Agradecimientos

Mediante la realización y presentación de este proyecto doy por finalizada una de las etapas más duras y bonitas que he vivido hasta la fecha. Por ello, la recordaré durante toda mi vida como una de las mejores experiencias. Además, he conocido a muchas personas que en mayor o menor medida me han hecho crecer personal y profesionalmente, a varias de estas les puedo llamar amigos.

Me gustaría agradecer a mi tutora y al director de este proyecto su paciencia, apoyo y dedicación durante la realización del mismo.

Estas líneas no son suficientes para dar las gracias a mi familia, mi pareja y mis padres por su apoyo incondicional en este camino, desde que entré el primer día por la puerta de la universidad hasta la finalización a través de este proyecto. Gracias por estar siempre ahí, tanto en los momentos buenos como en los malos.

Las horas interminables que hemos estado en clase o en la biblioteca no habrían sido iguales sin “Los Chavales”, quiero agradecerlos haber hecho esta etapa inolvidable, amena y bonita.

En general, me gustaría agradecer a todas las personas que me han acompañado a lo largo de este camino.

Resumen

El uso de memorias magneto-resistivas de acceso aleatorio [1] o (MRAMs en su acrónimo inglés) presenta claras ventajas frente a las memorias dinámicas de acceso aleatorio [2] (DRAMs en su acrónimo inglés) que constituyen la tecnología de elección en el momento presente. La principal entre esas ventajas es el carácter no volátil de las MRAMs frente al volátil y necesitado de refresco periódico de las DRAMs. Sin embargo, y aunque el desarrollo de las MRAMs se inició a finales de la década de los 90 del siglo XX, la implementación de estas memorias no ha alcanzado un grado de madurez tecnológica suficiente como para conseguir su implantación masiva. De hecho, el único producto comercial disponible es el chip de 2^{20} bits de Freescale Semiconductors (actual NXP Semiconductors) fabricado con la obsoleta tecnología de 180 nm. La integración es pues el gran reto tecnológico del desarrollo de MRAMs. Además de este las memorias MRAMs se enfrentan también a los problemas ligados a las amortizaciones y elevados retornos comerciales de tecnologías a las que superan en prestaciones (principalmente, velocidad de conmutación) como la Flash (también no volátil).

El proyecto se encuadra dentro del campo de desarrollo de la implementación de MRAMs basadas en la aleación amorfa $Fe_{80}B_{20}$, una aleación cuyas propiedades de histéresis son modificables mediante irradiación local con rayos X [3] y que potencialmente puede ayudar a reducir significativamente la dimensión lateral de los elementos MRAM (basados en Permalloy).

Los elementos MRAM objeto de este trabajo están basados en una capa blanda, de $Fe_{80}B_{20}$, de espesor 10nm, un espaciador no metálico no magnético, de vacío con un espesor de 5 nm y una capa dura, de Co, con espesor de 5 nm. El conjunto tiene forma paralelepípedica con bases cuadradas de dimensiones variables entre los 500 nm x 500 nm y los 200 nm x 200 nm.

En particular, se han estudiado las propiedades de histéresis de dispositivos MRAM basados en $Fe_{80}B_{20}$ en función de las dimensiones de la base del dispositivo y, a partir de estos datos, se han identificado las dimensiones que mejor funcionalidad MRAM presenta (menor y mayor campos coercitivos de las capas blanda y dura, respectivamente).

Las simulaciones se han llevado a cabo considerando la aproximación micromagnética basada en elementos finitos y, más concretamente, los códigos Gmsh y Magpar [4].

Palabras Clave: MRAM, Válvula de espín, Magnetoresistencia, $Fe_{80}B_{20}$, Micromagnetismo, Magpar

Abstract

Design and simulation of the bistable performance in an MRAM memory

The use of magneto-resistive random access memories [1] (MRAMs) has clear advantages over dynamic random access memories [2] (DRAMs), which are the technology of choice at present. Chief among these advantages is the non-volatile nature of MRAMs as opposed to the volatile and periodically refreshing nature of DRAMs. However, although the development of MRAMs began in the late 1990s, the implementation of these memories has not reached a sufficient degree of technological maturity to achieve mass deployment. In fact, the only commercially available product is the 220-bit chip from Freescale Semiconductors (now NXP Semiconductors) manufactured with the obsolete 180 nm technology. Integration is therefore the major technological challenge in the development of MRAMs. In addition to this, MRAMs also face the problems linked to amortisation and high commercial returns of technologies they surpass in terms of performance (mainly switching speed) such as Flash (also non-volatile).

The project is in the field of developing the implementation of MRAMs based on the amorphous $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$ alloy, an alloy whose hysteresis properties are modifiable by local X-ray irradiation [3] and which can potentially help to significantly reduce the lateral dimension of MRAM elements (based on Permalloy).

The MRAM elements in this work are based on a 10 nm thick $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$ soft layer, a 5 nm thick non-metallic, non-magnetic vacuum spacer and a 5 nm thick Co hard layer. The assembly has a parallelepiped shape with square bases of variable dimensions between 500 nm x 500 nm and 200 nm x 200 nm.

In particular, the hysteresis properties of $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$ -based MRAM devices have been studied as a function of the device base dimensions and, from these data, the dimensions with the best MRAM functionality have been identified (lower and higher coercive fields of the soft and hard layers, respectively).

The simulations have been carried out considering the micromagnetic finite element approach and, more specifically, the Gmsh and Magpar [4] codes.

Keywords: MRAM, Spin Valve, Magnetoresistance, $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$, Micromagnetism, Magpar

Índice

Agradecimientos	iii
Resumen	v
Abstract	vii
Índice	ix
Lista de figuras	xi
Listado de Tablas	xiii
Listado de Acrónimos	xv
1. Introducción.....	1
2. Antecedentes o “Marco Tecnológico”	7
2.1. Válvulas de espín.....	7
2.2. Tricapas fase blanda – fase dura para MRAMs	8
2.3. Objetivos: Optimización de las MRAMs	9
3. Metodología	11
3.1. La aproximación micromagnética.....	11
3.2. Programas de discretización y Magpar	13
3.2.1. Programa de discretización (GMSH)	14
3.2.2. Programa Magpar.....	17
3.3. Distribuciones de momentos.....	17
4. Simulación de la histéresis de MRAMs basadas en Co y Fe ₈₀ B ₂₀	19
4.1. Histéresis y espesor de la capa de Fe ₈₀ B ₂₀	19
4.1.1. Tricapa de lado 500 nm: Proceso de desimanación global y a campos bajos.....	19
4.1.2. Tricapa de lado 500 nm: Configuraciones de momentos en el proceso de desimanación	22
4.1.3. Tricapa de lado 500 nm: Proceso de reimanación global y a campos bajos	26
4.1.4. Tricapa de lado 500 nm: Configuraciones de momentos en el proceso de reimanación.....	28
4.1.5. Tricapa de lado 300 nm: Proceso de desimanación global y a campos bajos.....	31
4.1.6. Tricapa de lado 300 nm: Configuraciones de momentos en el proceso de desimanación	33
4.1.7. Tricapa de lado 200 nm: Proceso de desimanación global y a campos bajos.....	36
4.1.8. Tricapa de lado 200 nm: Configuraciones de momentos en el proceso de desimanación	38
4.2. Resumen del comportamiento biestable de las tricapas	41
4.3. Comparación de las simulaciones.....	41
4.3.1. Comparación del proceso de desimanación y reimanación en la tricapa de 500 nm.....	41
4.3.2. Comparación del proceso de desimanación de las tricapas.....	44

5.	Optimización de MRAMs basadas en Co y Fe ₈₀ B ₂₀	49
6.	Presupuesto.....	51
6.1.	Costes humanos	51
6.2.	Costes materiales	51
6.3.	Costes de suministros.....	52
6.4.	Coste final del proyecto.....	53
7.	Impacto del Proyecto	55
8.	Conclusiones.....	57
9.	Líneas futuras de trabajo	59
10.	Referencias.....	61

Lista de figuras

Figura 1. Conjunto de ciclos de histéresis medidos [6] en un acero al carbono que ha experimentado distintas deformaciones plásticas. El esquema de la parte inferior de la parte izquierda de la figura muestra la imanación de saturación, M_s , alcanzada para un campo aplicado H_a ; la imanación remanente, M_R , y el campo coercitivo, H_c	2
Figura 2. Modelo de dos canales de espín para la magnetorresistencia de una tricapa dura-no magnética-blanda (no se muestran ni el sustrato ni los contactos).	5
Figura 3. Ciclo de histéresis experimental (azul) y simulación micromagnética (rojo) para nanoprismas triangulares de Fe monocristalino. Se incluyen las representaciones de momentos para distintos puntos del ciclo simulado (programa OOMMF) [15].	12
Figura 4. Morfología común a las tres tricapas simuladas.	14
Figura 5. Espesor de las capas acotado.	14
Figura 6. Código de definición de la tricapa de 500 nm (extensión “.geo”).	16
Figura 7. Detalle del mallado generado por GMSH en una región de la tricapa creada en GMSH.	16
Figura 8. Código de colores utilizado para representar la distribución de momentos locales. El color verde se utiliza para representar la ausencia de una componente.	18
Figura 9. Muestra de 500 nm. Imanación, M , frente a campo aplicado, H , para el proceso de desimanación global.	20
Figura 10. Muestra de 500 nm. Imanación, M , frente a campo aplicado, H , para el proceso de desimanación a campos aplicados bajos.	20
Figura 11. Muestra de 500 nm. dM/dH vs. H para el proceso de inversión global.	21
Figura 12. Muestra de 500 nm. dM/dH vs. H para el proceso de inversión que ocurre a campos desimanadores bajos.	22
Figura 13. Configuraciones de momentos magnéticos calculadas para la capa de Co en la tricapa de lado 500 nm.	23
Figura 14. Configuraciones de momentos magnéticos calculadas para campos desimanadores inferiores y superiores al de conmutación de la capa de FeB en la tricapa de lado 500 nm. El inserto muestra la orientación de la capa de Co durante todos los campos considerados para la capa de FeB.	24
Figura 15. Esquema de las pistas de escritura en la cara superior de una tricapa MRAM (para la lectura una de las pistas ha de conformarse en la cara opuesta de la tricapa).	25
Figura 16. Muestra de 500 nm. Reimanación, M , frente a campo aplicado, H , para el proceso de reimanación global.	26
Figura 17. Muestra de 500 nm. Reimanación, M , frente a campo aplicado, H , para el proceso de reimanación a campos aplicados bajos.	27
Figura 18. Muestra de 500 nm. dM/dH vs. H para el proceso de inversión global en el proceso de reimanación.	27
Figura 19. Muestra de 500 nm. dM/dH vs. H para el proceso de inversión que ocurre a campos imanadores bajos.	28
Figura 20. Configuraciones de momentos magnéticos calculados para campos imanadores de la capa de Co en la tricapa de lado 500 nm.	29

Figura 21. Configuraciones de momentos magnéticos calculadas para campos imanadores inferiores y superiores al de conmutación de la capa de FeB en la tricapa de lado 500 nm. El inserto muestra la orientación de la capa de Co durante todos los campos considerados para la capa de FeB..... 30

Figura 22. Muestra de 300 nm. Imanación, M, frente a campo aplicado, H, para el proceso de desimanación global..... 31

Figura 23. Muestra de 300 nm. Imanación, M, frente a campo aplicado, H, para el proceso de desimanación a campos aplicados bajos..... 32

Figura 24. Muestra de 300 nm. dM/dH respecto H para el proceso de inversión global. 32

Figura 25. Muestra de 300 nm. dM/dH vs. H para el proceso de inversión que ocurre a campos desimanadores bajos..... 33

Figura 26. Configuraciones de momentos magnéticos calculadas para la capa de Co en la tricapa de lado 300 nm..... 34

Figura 27. Configuraciones de momentos magnéticos calculadas para campos desimanadores inferiores y superiores al de conmutación de la capa de FeB en la tricapa de lado 300 nm. El inserto muestra la orientación de la capa de Co durante todos los campos considerados para la capa de Feb. 35

Figura 28. Muestra de 200 nm. Imanación, M, frente a campo aplicado, H, para el proceso de desimanación global..... 36

Figura 29. Muestra de 200 nm. Imanación, M, frente a campo aplicado, H para el proceso de desimanación a campos aplicados bajos..... 37

Figura 30. Muestra de 200 nm. dM/dH vs H para el proceso de inversión global..... 37

Figura 31. Muestra de 200 nm. dM/dH vs. H para el proceso de inversión que ocurre a campos desimanadores bajos..... 38

Figura 32. Configuraciones de momentos magnéticos calculadas para la capa de Co en la tricapa de lado 200 nm..... 39

Figura 33. Configuraciones de momentos magnéticos calculadas para campos desimanadores inferiores y superiores al de conmutación de la capa de FeB en la tricapa de lado 200 nm. El inserto muestra la orientación de la capa de Co durante todos los campos considerados para la capa de Feb. 40

Figura 34. Curva de desimanación de la tricapa de 500 nm (representativa de las tres muestras simuladas)..... 41

Figura 35. Comparación de la desimanación e reimanación global (histéresis) en la tricapa de 500nm. 42

Figura 36. Comparación de los picos de la derivada global de la tricapa de 500nm. 42

Figura 37. Comparación entre la desimanación y la reimanación de la capa blanda de $Fe_{80}B_{20}$ en la tricapa de 500nm..... 43

Figura 38. Comparación de los picos de la derivada de la tricapa de 500nm (Capa Co)..... 43

Figura 39. Comparación de los picos de la derivada en la tricapa de lado 500nm (Capa $Fe_{80}B_{20}$)..... 44

Figura 40. Comparación de la desimanación global de las tres tricapas (capa de Co)..... 45

Figura 41. Comparación de los picos de la derivada de las tres tricapas (Capa Co)..... 45

Figura 42. Comparación de la desimanación del $Fe_{80}B_{20}$ en las tres tricapas 46

Figura 43. Comparación de los picos de la derivada de las tres tricapas (Capa $Fe_{80}B_{20}$)..... 47

Listado de Tablas

Tabla 1. Resumen de costes humanos	51
Tabla 2. Resumen de costes materiales	52
Tabla 3. Resumen de costes energético en el clúster	52
Tabla 4. Resumen en costes energéticos del trabajador	53
Tabla 5. Coste de la conexión a internet.....	53
Tabla 6. Coste final con IVA incluido	54

Listado de Acrónimos

CB – CD	Capa blanda / Capa dura (desacopladas)
DRAM	Dynamic Random Access Memory
MRAM	Magnetic Random Access Memory

1. Introducción

Los materiales con orden magnético se caracterizan por el hecho de que sus momentos magnéticos están orientados en una configuración que presenta periodicidad en distancias que pueden ser macroscópicas. Este comportamiento ordenado está basado en la existencia de una interacción entre los momentos que favorece, por ejemplo, su paralelismo (materiales ordenados ferromagnéticamente) o su antiparalelismo (materiales antiferromagnéticos) [5].

La interacción responsable del orden magnético se denomina canje y es una interacción de origen mecano-cuántico. Una medida del canje es la temperatura de orden magnético, llamada temperatura de Curie en los ferromagnéticos y temperatura de Néel en los antiferromagnéticos. El punto que hace interesante el comportamiento colectivo de los materiales ferromagnéticos es el hecho de que todos los momentos magnéticos que los integran pueden apuntar esencialmente en la misma dirección. De este modo, el material ferromagnético es capaz de crear un campo elevado en su exterior, que puede ser utilizado en aplicaciones que, clásicamente, involucran la inducción electromagnética (transformadores), la creación de pares (motores/generadores y brújula) y la creación de fuerzas (herramientas mecanomagnéticas) [5].

El comportamiento más relevante que ocurre en los materiales ordenados magnéticamente y en particular en los ferromagnéticos es la llamada histéresis magnética.

La histéresis magnética (*Figura 1*) se caracteriza por el hecho de que tras saturar (llevar al paralelismo completo) a los momentos de un material ferromagnético por la aplicación de un campo magnético externo adecuado, si ese campo magnético se disminuye en magnitud hasta anularse, el paralelismo de los momentos magnéticos, no se destruye por completo, sino que los momentos conservan un cierto grado de alineamiento a lo largo de la dirección del campo que se ha aplicado. Ese grado de paralelismo se corresponde con la existencia, en campo nulo, de un momento magnético neto distinto de cero en el material que se ha sometido al campo magnético saturante. Ese momento magnético se denomina momento magnético remanente o si se da por unidad de volumen del material, imanación remanente. Para anular la imanación remanente es necesario aplicar un campo en sentido contrario al campo saturante (denominado desimanador) cuya magnitud se corresponde con el valor del campo coercitivo [5].

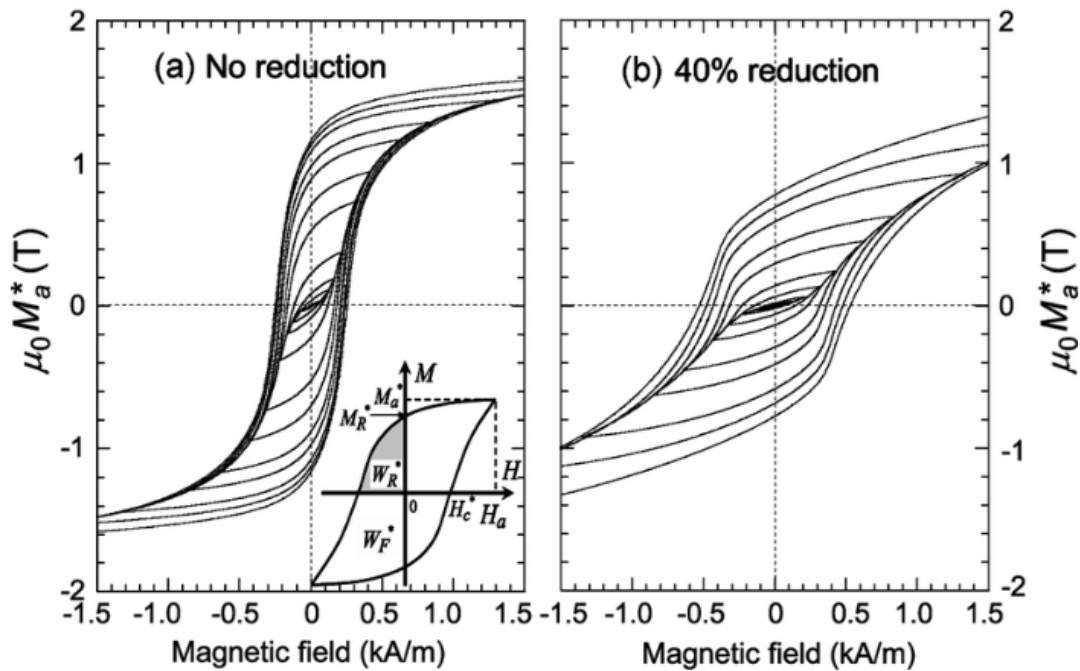


Figura 1. Conjunto de ciclos de histéresis medidos [6] en un acero al carbono que ha experimentado distintas deformaciones plásticas. El esquema de la parte inferior de la parte izquierda de la figura muestra la imanación de saturación, M_a , alcanzada para un campo aplicado H_a ; la imanación remanente, M_R , y el campo coercitivo, H_c .

Mientras el orden magnético está ligado a una interacción interatómica, la histéresis es una fenomenología extrínseca y cuya dependencia en la distribución de defectos, propiedades locales químicas, cristalográficas y morfológicas del material es extremadamente compleja. La primera consecuencia de esta complejidad es el hecho de que los momentos magnéticos del material magnéticamente ordenado no se mantienen paralelos en el proceso que va de la saturación al campo coercitivo. El desalineamiento de los momentos magnéticos locales puede ocurrir en distancias del orden de las decenas o los centenares de distancias interatómicas. Sería por tanto necesario para poder describir de un modo completamente realista, los procesos de histéresis, conocer las propiedades locales en la escala mencionada. Este es un objetivo que queda fuera del alcance, tanto de las técnicas de medida locales, que no pueden conocer la distribución de momentos con la precisión requerida, como de las técnicas de caracterización de propiedades en esa misma escala.

En la aproximación más simple, ese proceso de histéresis puede describirse, partiendo de la hipótesis de que todos los momentos magnéticos son paralelos y así se mantienen a lo largo de la inversión de la imanación desde un estado saturado. Esta aproximación desarrollada en los años 50 por Wohlfarth solo ha sido parcialmente exitosa en materiales con un campo coercitivo muy elevado del orden o superior a 8×10^5 A/m (1 T).

De un modo más general, puede entenderse que el proceso de inversión de la imanación o de histéresis en materiales ferromagnéticos, tiene lugar a través de una secuencia que incorpora las fases de nucleación, crecimiento, percolación y propagación. La nucleación comienza a partir de un estado saturado y consiste en la aparición de un pequeño volumen local de momentos magnéticos que, esencialmente, están dirigidos de modo antiparalelo a la dirección común correspondiente a los momentos saturados. Este volumen (muy a menudo nanométrico) aparece en campos desimanadores. La nucleación ocurre preferentemente en zonas de cristalinidad reducida, que presentan valores locales de las propiedades magnéticas deteriorados respecto a los del resto del material.

La siguiente fase, denominada crecimiento, se corresponde con el aumento de dimensiones del núcleo y el incremento del antiparalelismo respecto al estado saturado de los momentos contenidos en ese núcleo. El proceso de crecimiento de volumen del núcleo está favorecido por la disminución de energía asociada al hecho de que los momentos dentro del núcleo son paralelos al campo desimanador aplicado (el aumento de volumen disminuye la energía de acoplo de los momentos del núcleo con el campo magnético). El aumento de volumen del núcleo se ve contrarrestado por la necesidad de crear una zona de transición entre la zona invertida y la no invertida (denominada pared) donde los momentos cambian progresivamente de dirección desde su orientación en el núcleo a la dirección de la saturación. La formación de la pared que limita al núcleo requiere energía como también la requiere el aumento de su superficie producido al aumentar el volumen del núcleo. Esa energía debe ser proporcionada por el campo desimanador.

Tanto la nucleación como el crecimiento pueden estar ocurriendo en puntos diferentes del material que, para campos desimanadores ligeramente superiores al de nucleación, no llegan a interactuar entre ellos. Cuando, por aumento del campo desimanador aplicado, los núcleos invertidos/crecidos llegan a interactuar se puede desencadenar la fase de la inversión global denominada percolación, que se corresponde con la formación de zonas extensas (e incluso macroscópicas) de momentos invertidos.

En la zona límite entre la invertida y la no invertida se localiza también una pared que tiene, para campos suficientemente elevados, la posibilidad de crecer en superficie, haciendo crecer en volumen la zona invertida hasta llevar al material a la inversión total. Esta última fase se denomina propagación.

Alguna o varias de estas fases pueden estar ausentes en el proceso global. Por ejemplo, es posible observar qué en materiales con campo coercitivo muy reducido, la inversión de la imanación, involucra exclusivamente un proceso de nucleación y posteriormente a este uno de crecimiento, sin que se observen ni percolación ni propagación.

En resumen, la histéresis magnética, depende no solo de las propiedades magnéticas, intrínsecas macroscópicas, sino, muy especialmente en lo que se refiere a los procesos de nucleación y percolación, de la distribución de defectos que puede existir en el material y en concreto de la distribución de centros de nucleación presente. Por esta razón, es extremadamente difícil modelizar de un modo predictivo la histéresis de los materiales magnéticos utilizados en aplicaciones y se recurre, con propósitos de diseño y de modo general, a una exhaustiva caracterización fenomenológica experimental. Éste hecho tiene como consecuencia que el diseño de dispositivos magnéticos, sea posible de modo fiable solo a escala macroscópica. La dificultad del diseño a escalas mesoscópicas y especialmente nanométricas, es muy relevante cuando se considera la implementación de dispositivos en esas escalas de dimensiones.

La magneto-resistencia es el fenómeno por el cual varía la resistencia de un material magnético al variar su estado de imanación por medio de un campo aplicado externo. La magneto-resistencia varía pues con el campo de modo similar a cómo lo hace la imanación en la histéresis. En metales de transición o en sus aleaciones la magneto-resistencia puede alcanzar variaciones a lo largo de un ciclo del tipo de los de histéresis de hasta un 10 %. Esos valores, aunque son suficientes para aplicaciones convencionales (como las brújulas digitales y los sensores de campo y posición de ellas derivados) son pequeños si consideramos el problema del almacenamiento de información y la protección de los símbolos. La magneto-resistencia ha inducido un gran esfuerzo de investigación experimental en la última década del siglo XX y en la primera del siglo XXI, que ha permitido poner de manifiesto la posibilidad de obtener grandes variaciones de la magnitud asociadas, por ejemplo, a transiciones aislante-conductor originadas por la aplicación del campo magnético [7] [8].

Existen también nanotricapas heterogéneas artificiales, que presentan valores muy elevados de la magneto-resistencia (pudiendo llegar en porcentaje a varios centenares). Un ejemplo bien conocido es la nanotricapa formada por tres capas, una de ellas metálica con bajo campo coercitivo (capa blanda) [9]. La segunda capa, crecida sobre la capa blanda, es una capa que puede ser o no conductora pero que no es magnética (en el caso de que la segunda capa no fuese conductora, debería tener un espesor suficientemente pequeño, como para que electrones pudieran circular entre ambas por efecto túnel). La tercera capa es una capa

con campo coercitivo suficientemente elevado como para que la imanación de la capa no cambie de orientación durante la explotación del efecto magneto-resistivo. Esta tercera capa se denomina capa dura.

En esta tricapa se pueden observar magneto resistencias muy elevadas, al cambiar el estado global de imanación del paralelismo entre las capas, blanda y dura (estado saturado) al antiparalelismo entre esas dos capas (estado de baja imanación o estado desimanado). La variación de la magneto-resistencia se explica mediante el denominado modelo de dos canales de espín, basado en el hecho de que la dispersión de los espines por los momentos magnéticos domina la resistividad (el modelo se ilustra en la *Figura 2*).

Sí a través de la tricapa circula una corriente de electrones sin polarización de spin y dirigida perpendicularmente a las intercaras, los electrones de cada uno de los dos signos de espín (asociados cada uno a un canal) darán lugar a una contribución a la resistencia que dependerá fuertemente de la orientación relativa del espín del electrón circulante respecto a la imanación de la capa a través de la cual circulan. En concreto, la resistencia en una capa (asociada a procesos de difusión) será máxima (R_a) cuando la orientación del spin sea antiparalela a la orientación de la imanación y mínima (R_p) cuando ambas orientaciones coincidan.

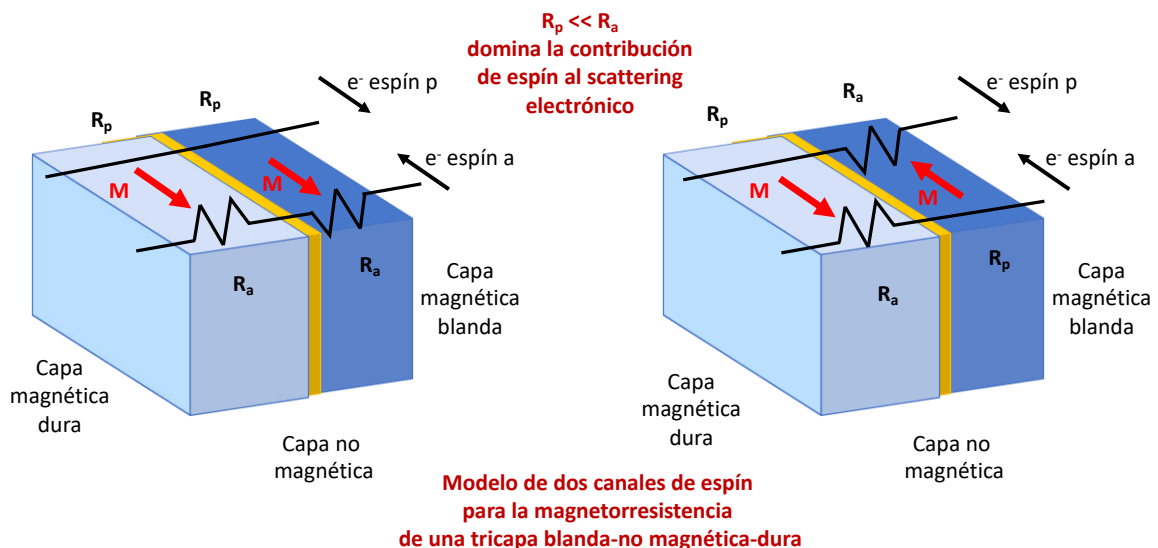


Figura 2. Modelo de dos canales de espín para la magnetorresistencia de una tricapa dura-no magnética-blanda (no se muestran ni el sustrato ni los contactos).

La resistencia global correspondiente al paralelismo de las imanaciones de las capas, R_{Gp} , se puede evaluar como la asociada a los dos canales de espín conectados en paralelo. El correspondiente a los electrones con espín paralelo a la imanación de las dos capas tendrá

una resistencia total correspondiente a $2R_p$ (dos resistores en serie cada uno de ellos con resistencia mínima, R_p , correspondiente a espín paralelo a la imanación de la capa) mientras que el canal correspondiente a los electrones con espín antiparalelo a la imanación de las capas tendrá una resistencia total de $2R_a$ (máxima y correspondiente a espín antiparalelo a la imanación de la capa), de modo que la resistencia de los dos canales en paralelo será la representada con la ecuación (1).

$$\frac{1}{RG_p} = \frac{1}{2 \cdot R_p} + \frac{1}{2 \cdot R_a} \quad (1)$$

De modo similar, cuando las imanaciones de ambas capas son antiparalelas, las resistencias de ambos canales serán $R_p + R_a$ y la resistencia global en esta configuración es la correspondiente a la ecuación (2).

$$\frac{1}{RG_a} = \frac{2}{R_p + R_a} \quad (2)$$

Por tanto, la diferencia porcentual de resistencia entre ambos casos (o magnetorresistencia asociada a un campo que permita el paso de una a otra) es la representada en la ecuación (3).

$$\frac{RG_a - RG_p}{RG_p} = \frac{(R_p - R_a)^2}{4 \cdot R_p \cdot R_a} \quad (3)$$

Si el campo necesario para transitar de la configuración de imanación de capa paralela a la de capas antiparalelas (o de esta a la paralela) es reducido (compatible con la optimización del consumo de corriente) y las imanaciones y espesores de las capas blanda y dura son similares, es posible alcanzar magnetorresistencias de varios cientos de puntos porcentuales que permiten, si el sistema se considera como un sistema biestable considerar a la tricapa (también denominada válvula de espín) como un medio potencial de almacenamiento de información. En este sentido, es interesante señalar que un requisito para esta aplicación es el hecho de que el espesor de la capa no magnética sea adecuado para, simultáneamente, reducir o eliminar el acoplo de canje entre la capa dura y la capa blanda y permitir el paso de electrones entre ambas capas sin que ello entrañe una resistencia global muy elevada.

2. Antecedentes o “Marco Tecnológico”

En este apartado se revisa el estado actual de la técnica correspondiente a la implementación de las memorias magnéticas de acceso aleatorio [1] [9] [10].

2.1. Válvulas de espín

Las válvulas de espín basadas en una capa dura y una capa blanda desacoplada de la primera (CB – CD) se consideran las candidatas más viables para la implementación de memorias MRAM por las siguientes razones:

- Frente a las válvulas de espín basadas en multicapas crecidas con espaciador no magnético y acoplamiento ferro-antiferromagnético entre dos capas magnéticas, en las que los símbolos están ligados a derivadas de las curvas de imanación leíbles mediante aplicación de campo magnético y medida de tensión inducida, la lectura de las válvulas de capa blanda-capas duras implica exclusivamente la medida de una tensión de origen resistivo.
- La escritura de ambos tipos de válvulas de espín involucra la creación de un campo magnético, pero mientras que en las válvulas de multicapas ese campo puede ser elevado en las válvulas (CB – CD) los campos utilizados se corresponden exclusivamente con los necesarios para invertir la capa blanda (que pueden ser controlados mediante una elección adecuada de la fase que implementa la capa correspondiente).
- Las válvulas (CB – CD) son, si su diseño es correcto y desde el punto de vista del comportamiento magnético, insensibles al espesor de la capa no magnética. Su funcionalidad solo se ve influida por esta capa en lo que se refiere a la medida de resistencia. Esta es una notable diferencia con las válvulas de multicapa en las que el espesor del espaciador no magnético es crucial para determinar el comportamiento global.
- Es posible implementar válvulas (CB – CD) mediante varios materiales duros metálicos (por ejemplo, usando intermetálicos de metal de transición).
- Las medidas de resistencia se ven facilitadas por el hecho de que la corriente ha de ser perpendicular a las intercaras (es posible diseñar capas de contactos sobre el sustrato y sobre la capa protectora).

Sin embargo, y tal como ya se ha comentado, las válvulas de espín aún no han encontrado un uso generalizado debido, fundamentalmente, a la no implementación de densidades competitivas. El factor clave para elevar la densidad superficial de información es la dimensión lateral de los elementos de memoria, objeto de simulación en el presente trabajo.

2.2. Tricapas fase blanda – fase dura para MRAMs

Para este trabajo se ha considerado una aproximación a las propiedades de las memorias magneto-resistivas MRAM basada en las simulaciones de su histéresis para elementos magneto-resistivos de distinto tamaño en el orden de los cientos de nm. Se podrá, por tanto, concluir sobre las propiedades de esos elementos de cara a su integración en densidades de registro competitivas con las de otras tecnologías.

El trabajo se centra en las propiedades de magneto-resistencia de una tricapa similar a la de la figura 2 en la que la capa blanda (crecida sobre el sustrato) se corresponde con una capa de $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$ (un material que presenta, en forma de película nanométrica, campos coercitivos inferiores a los 300 A/m [11]). Sobre la capa blanda se crece una capa no magnética (de imanación nula para nuestras simulaciones) y, sobre la capa no magnética, se crece una capa de Co (un material que presenta valores de campo coercitivo cuando se crece como película nanométrica de algunos centenares de kA/m). El propósito funcional de la capa no magnética es el de aislar la capa dura de un acoplo por canje con la capa blanda e impedir su inversión en campos desimanadores del orden o ligeramente superiores a los correspondientes a la inversión de la capa blanda. De este modo, se consigue, en principio, la protección de los símbolos para el registro de información: el 0 corresponde al paralelismo de la imanación de las capas dura y blanda mientras que el 1 se asocia al antiparalelismo de esas imanaciones una configuración que se consigue en campos moderados y con bajo consumo si alcanza exclusivamente por inversión de la imanación de la capa blanda.

En este trabajo se consideran las propiedades del $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$ amorfo para implementar la capa blanda. Se trata de un material con una imanación cercana a los 1.2 MA/m y que posee una anisotropía magnética del orden de 1 kJ/m³. Su principal ventaja “a priori” es su buen comportamiento en condiciones de campo magnético rápidamente variable: posee una constante de amortiguamiento de 10^{-3} que permitiría la inversión de

la imanación en tiempos del orden del centenar de picosegundos (es este un aspecto no examinado en nuestras simulaciones, que son cuasi-estáticas) [11] [12].

2.3. Objetivos: Optimización de las MRAMs

El objetivo de este proyecto consiste en estudiar, mediante una aproximación simulacional las propiedades de histéresis de dispositivos MRAM basados en una tricapa ($\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$, Cobalto), explorando dos puntos fundamentales:

- La viabilidad de la reducción de las dimensiones laterales de los elementos MRAM desde el punto de vista de la protección de los símbolos.
- Las características del proceso de desimanación de la capa blanda y, en particular, la influencia en este proceso de la dimensión lateral del elemento MRAM.

3. Metodología

En este apartado se van a abordar los procedimientos llevados a cabo para el desarrollo y posterior análisis de las simulaciones durante el desarrollo de este proyecto de fin de grado.

3.1. La aproximación micromagnética

La mayoría de las aplicaciones de sistemas magnéticos de tamaño nanométrico están basadas en sus procesos de imanación o histéresis. Estos procesos dependen de la geometría del sistema (tamaño y forma), de la estructura cristalina y de las interacciones. La descripción de los procesos de imanación basada en los momentos magnéticos atómicos individuales requiere el uso de la teoría mecano cuántica y, además, no resulta posible para los sistemas con tamaños apropiados para las aplicaciones descritas en este PFG, ya que el problema excedería las capacidades de cálculo actuales. Por otro lado, una descripción macroscópica del sistema tampoco es apropiada ya que no proporcionaría información sobre la formación de estructuras magnéticas como son los dominios (regiones en las que los momentos magnéticos se encuentran alineados) o los vórtices (regiones en las que la dirección de los momentos magnéticos rota en espiral en torno a un centro), entre otras. Conocer la formación de estas estructuras resulta indispensable para predecir y describir el comportamiento del sistema.

El micromagnetismo constituye una aproximación semiclásica a este problema, en el que se considera la imanación como una función continua de las variables espaciales [13]. Esta descripción, por tanto, no considera los momentos magnéticos atómicos, pero permite el estudio de la formación de estructuras magnéticas como dominios y vórtices (véase *Figura 3*). Para la realización de los cálculos, la muestra se divide en elementos cuyo tamaño está determinado por la longitud de discretización. Los métodos de discretización utilizados de forma habitual en los cálculos micromagnéticos son dos: diferencias finitas y elementos finitos.

El método basado en diferencias finitas divide el sistema a estudiar en elementos con forma de cubo cuyo tamaño está caracterizado por la longitud de discretización y el número de grados de libertad está asociado al centro de los elementos. Por otro lado, el método de elementos finitos permite utilizar elementos con forma de cubos o tetraedros lo que permite describir con mayor precisión geometrías más complejas. En este caso, el número de grados de libertad está asociado con los vértices

(nodos). El programa Magpar utilizado para la realización de los cálculos en el este trabajo, utiliza el método de elementos finitos [14]. La elección de un mallado (descripción de la geometría en función de los elementos característicos del proceso de discretización) apropiado es fundamental para asegurar la fiabilidad de los resultados obtenidos. La longitud de discretización debe definirse teniendo en cuenta las longitudes características del sistema como son sus dimensiones, la longitud de canje, la anchura de pared, etc. y debe asegurar que la variación del vector imanación de un nodo a otro es suave y puede ser descrita por una función continua. Evidentemente, el uso de un mallado con un gran número de elementos permite una mejor descripción de la geometría y la obtención de resultados más precisos pero las exigencias de memoria y tiempo de cálculo se verán significativamente incrementados.

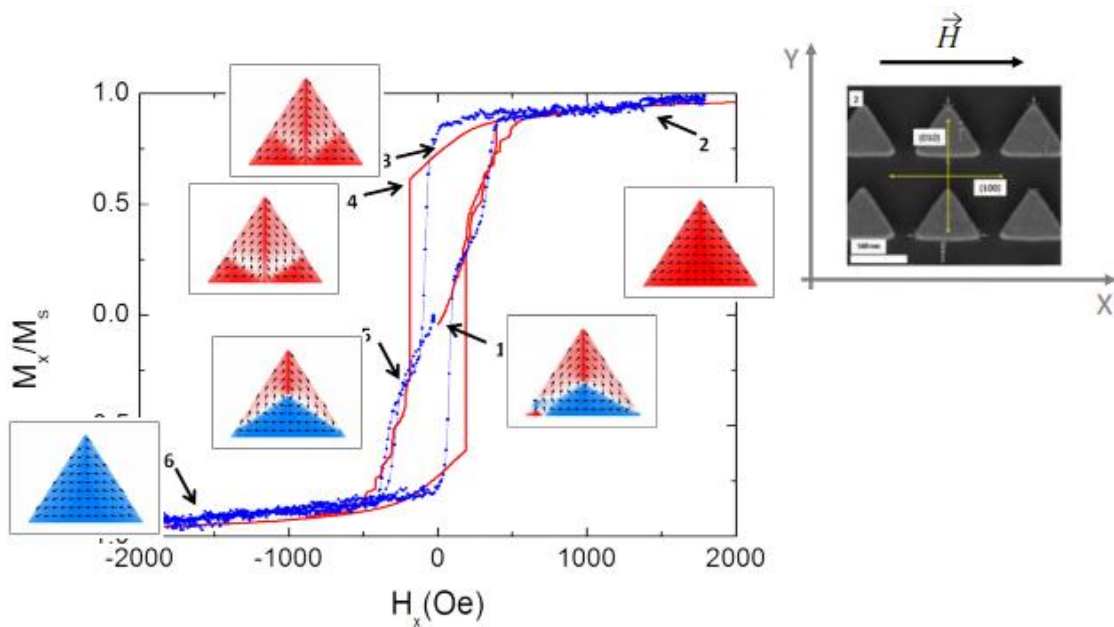


Figura 3. Ciclo de histéresis experimental (azul) y simulación micromagnética (rojo) para nanoprismas triangulares de Fe monocristalino. Se incluyen las representaciones de momentos para distintos puntos del ciclo simulado (programa OOMMF) [15].

Una vez definido el mallado del sistema, el proceso de cálculo que permite describir la dinámica de los procesos de imanación está ligado a la ecuación de Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG). En esta ecuación fenomenológica la imanación está ligada no al campo externo aplicado sino a un campo efectivo que incluye las contribuciones definidas abajo. Cuando se aplica un campo externo al sistema, la configuración de momentos final es el resultado de un proceso competitivo entre distintos términos de energía y, por tanto, responde a un proceso de minimización de la energía. Los términos más significativos a tener en cuenta son:

- Energía Zeeman. Describe la tendencia de los momentos magnéticos a alinearse con el campo externo aplicado.
- Energía de canje. Describe la tendencia de los momentos magnéticos a estar alineados con los vecinos más cercanos.
- Energía de anisotropía. Describe la preferencia de los momentos magnéticos por orientarse a lo largo de determinados ejes cristalográficos, morfológicos (morfologías elipsoidales de revolución) o definidos por las tensiones mecánicas actuantes sobre el material.
- Energía magnetostática. Mientras que las contribuciones mencionadas más arriba son contribuciones energéticas locales, este término describe la energía asociada a la interacción entre cada uno de los momentos asociados a las unidades de discretización y el campo magnético creado en el punto correspondiente por todos los demás momentos magnéticos del sistema. Es pues un término no local y, aunque permite describir el efecto en el proceso de imanación de morfologías no elipsoidales, su inclusión en el cálculo de la energía total sin simplificaciones adecuadas es inabordable.

Determinar aquellas configuraciones de momentos que alcanzan el equilibrio siguiendo en su movimiento hacia ese equilibrio la ecuación LLG supone realizar un cálculo numérico basado en la linealización de la ecuación y en la discretización considerada. Se considera que el cálculo ha terminado cuando las variaciones de la energía total del sistema introducidas por variaciones pequeñas al azar de la orientación de los momentos que lo constituyen son inferiores a una tolerancia definida “a priori”.

3.2. Programas de discretización y Magpar

El programa con el que se realizan las simulaciones es Magpar [4]. Este es un programa de distribución libre creado y mantenido por una comunidad de desarrolladores. Dicho programa ha sido ejecutado en un clúster de tres servidores propiedad del CSIC en el cual se corrían las simulaciones en remoto mediante una conexión SSL a este.

En el desarrollo de este apartado se va dar una visión general del proceso llevado a cabo para la simulación de las tres tricapas, una introducción a los programas utilizados.

3.2.1. Programa de discretización (GMSH)

En primer lugar, se define la forma, las medidas y el espesor de cada uno de los materiales que componen la tricapa sobre la que se realizan cada una de las simulaciones. En este caso, todas las tricapas a simular tienen sección en plano de depósito cuadrada con tres capas de diferentes materiales y espesores como se observa en la *Figura 4* representada a continuación.

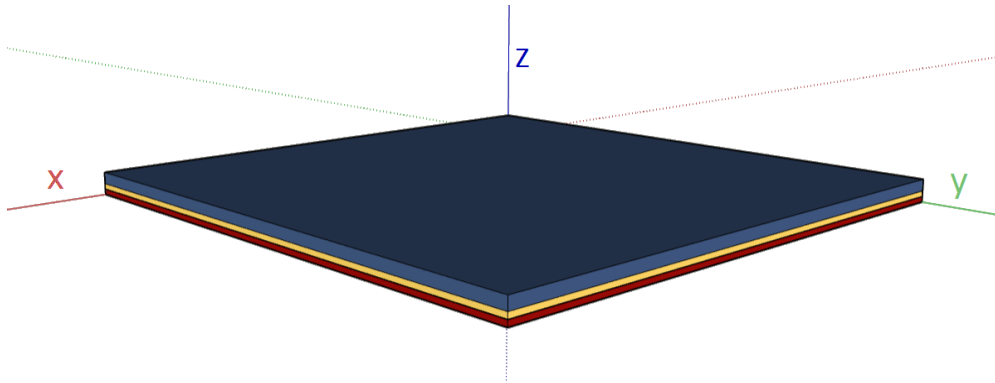


Figura 4. Morfología común a las tres tricapas simuladas.

La dimensión de los lados de las tricapas varía entre 500 nm y 200 nm. El espesor de cada una de las capas ha sido el mismo en las tres tricapas simuladas durante la realización de este proyecto. La composición, de arriba a abajo, es una primera capa es de hierro-boro (FeB), la segunda es de vacío y la tercera y última de cobalto (Co). Siendo los espesores de 10 nanómetros, 5 nanómetros y 5 nanómetros, respectivamente. En la *Figura 5*, se puede ver en detalle el espesor de cada una de las capas.

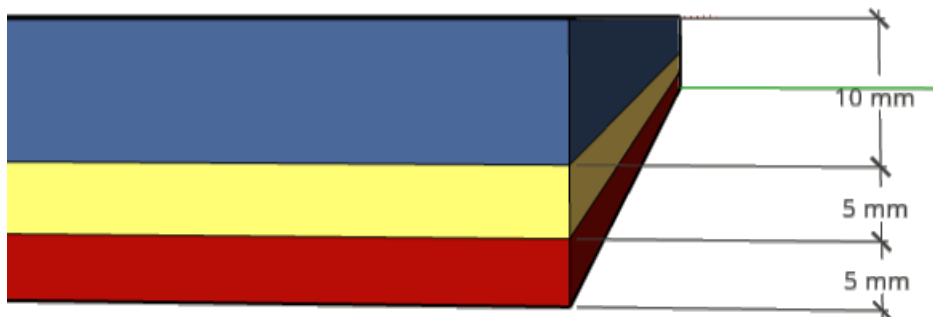


Figura 5. Espesor de las capas acotado.

El programa de discretización utilizado es el recomendado en la página web de Magpar. El nombre de este programa es GMSH [16] y al igual que Magpar es de distribución libre. Este programa de discretización permite el diseño de las tricapas mediante la interfaz gráfica o mediante código escrito en un fichero de extensión “.geo” que interpreta el propio programa, convirtiéndolo en una figura en tres dimensiones. Una vez creada la figura, se genera el mallado de esta. En la *Figura 6* se puede consultar el código utilizado para generar las tricapas, correspondiente a la tricapa de lado 500 nm.

Una vez generada la tricapa mediante el código representado en la *Figura 6* se genera el mallado como el de la *Figura 7* para seguidamente guardarlo en un fichero con extensión “.msh”. Dicho fichero se debe convertir a un formato admitido por el programa Magpar para ello se utilizará un script escrito en el lenguaje de programación Python publicado en la web oficial de Magpar. Este script genera un archivo con extensión “.inp” a partir de un fichero de entrada con extensión “.msh”.

Después de generar el fichero con extensión “.inp” se da por finalizado el proceso de discretización de la tricapa y el siguiente paso es configurar la simulación en Magpar.

```

ladobase = 500;
lc = 10;
hierroboro = 10;
vacio = 5;
cobalto = 5;

Point(1) = {0, 0, (hierroboro+vacio+cobalto), lc};
Point(2) = {0, 0, (vacio+cobalto), lc};
Point(3) = {0, 0, cobalto, lc};
Point(4) = {0, 0, 0, lc};
Point(5) = {ladobase, 0, 0, lc};
Point(6) = {ladobase, 0, cobalto, lc};
Point(7) = {ladobase, 0, (vacio+cobalto), lc};
Point(8) = {ladobase, 0, (hierroboro+vacio+cobalto), lc};

// Capa FeB
Line(1) = {1, 2};
Line(2) = {2, 7};
Line(3) = {7, 8};
Line(4) = {8, 1};

// Capa Vacío
//Line(2) = {2, 7};
Line(5) = {7, 6};
Line(6) = {6, 3};
Line(7) = {3, 2};

// Capa Co
Line(8) = {3, 4};
Line(9) = {4, 5};
Line(10) = {5, 6};
//Line(6) = {6, 3};

// Capa FeB
Line Loop(11) = {4, 1, 2, 3};
// Capa Vacío
Line Loop(12) = {7, 2, 5, 6};
// Capa Co
Line Loop(13) = {6, 8, 9, 10};

Plane Surface(14) = {11}; // FeB
Plane Surface(15) = {12}; // Vacío
Plane Surface(16) = {13}; // Co

Extrude {0, ladobase, 0} {
    Surface {14, 15, 16};
}

Physical Volume (1) = {1}; // FeB
Physical Volume (2) = {2}; // Vacío
Physical Volume (3) = {3}; // Co

```

Figura 6. Código de definición de la tricapa de 500 nm (extensión “.geo”).

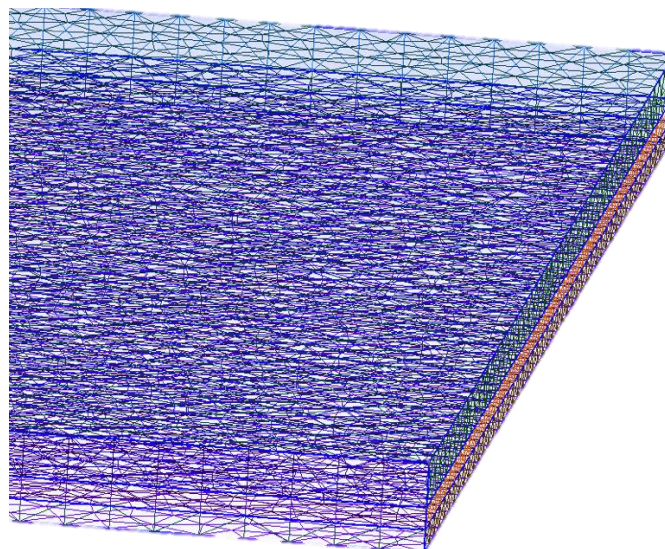


Figura 7. Detalle del mallado generado por GMSH en una región de la tricapa creada en GMSH.

3.2.2. Programa Magpar

La configuración de las simulaciones en el programa para el desarrollo de este proyecto se hace mediante tres ficheros “allop.txt”, “ejemplo.krn”, “ejemplo.inp”. En el primero de estos, se definen los parámetros de la simulación. En el segundo, se definen las características físicas de los materiales de cada una de las capas de la tricapa a simular. El tercero, contiene la descripción del mallado de la tricapa generado en GMSH en formato “.inp”. Excepto el tercer fichero, que es diferente para cada tricapa puesto que cada una tiene una longitud de lado diferente, el resto de los ficheros de configuración son iguales para las tres simulaciones pudiendo obtener la respuesta de cada una de las tricapas a las mismas condiciones.

Sobre el fichero de nombre “allop.txt” con la configuración estándar facilitado en la página web oficial de Magpar se realizan varias modificaciones para definir la simulación de la tricapa deseada. La más relevante es la relativa a la identificación de los planos de la tricapa, para el cual Magpar representará mediante gráficos codificados en colores la configuración local de momentos magnéticos resultante de la simulación. Además, en este fichero se define la dirección del campo externo aplicado, así como su sentido y módulo en el punto inicial y el paso con el que el módulo del campo variará a lo largo de la simulación.

Al finalizar la simulación, el programa Magpar genera varios ficheros con diferentes extensiones a través de los cuales se estudia el comportamiento de la tricapa. Los ficheros generados que se han utilizados para el análisis de las simulaciones son los que tienen extensión “.png”, “.log”. Los ficheros con extensión “.png”, son imágenes que muestran la distribución de momentos en las capas de Co y de FeB. En los ficheros con extensión “.log” se registran los resultados de los valores obtenidos en las simulaciones de las tricapas. Los datos contenidos en estos ficheros se tratan mediante el programa OriginPro. Con él se estudia el comportamiento de las tricapas durante la simulación generando varios gráficos para realizar el análisis de los resultados obtenidos.

3.3. Distribuciones de momentos

Utilizando los datos grabados en el fichero con extensión “.log” se generan mediante el programa OriginPro las gráficas descriptivas del comportamiento magnético de las tres tricapas.

En primer lugar, se representa la curva de desimanciación (variación de la imanación global de la tricapla con el campo aplicado externamente desde la saturación a la inversión completa). El segundo tipo de gráfico generado para cada una de las tricaplas se corresponde con la evolución de la derivada de la imanación con respecto al campo como función del campo aplicado (calculada a lo largo de toda la curva de desimanciación). Esta gráfica nos permite identificar de modo objetivo los rangos de campo involucrados en los procesos desimancadores de mayor magnitud. Para cada uno de los campos considerados en la simulación, Magpar representa mediante un código de colores la configuración de momentos magnéticos obtenida en un plano definido en el input de la simulación (y en la práctica situado bien en la capa de FeB o bien en la de Co).

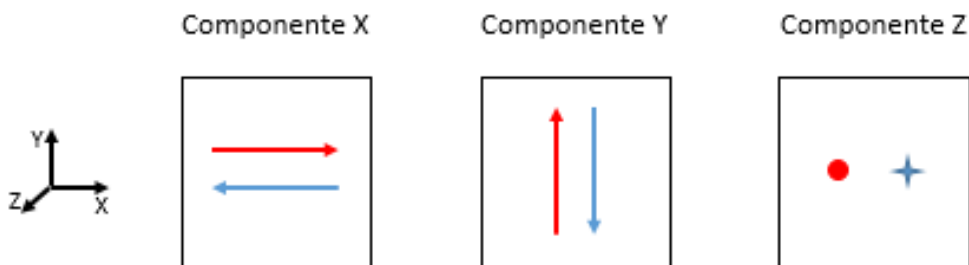


Figura 8. Código de colores utilizado para representar la distribución de momentos locales. El color verde se utiliza para representar la ausencia de una componente.

Para cada campo existen tres de estos gráficos codificados en colores correspondientes cada uno a uno de los ejes 'X', 'Y' y 'Z' identificados con los números 0, 1 y 2 respectivamente. Estos gráficos utilizan tres colores básicos (y algunas de sus mezclas). El color rojo se corresponde con la componente positiva de la imanación local paralela a uno de los ejes (en el caso del eje X esta componente positiva es la asociada a la saturación a campos elevados). El color azul se utiliza cuando la componente local de la imanación a lo largo del eje considerado es negativa. Por último, el color verde representa orientaciones locales de la imanación con componentes nulas o próximas a cero (por ejemplo, orientaciones de los momentos perpendiculares al eje de referencia).

4. Simulación de la histéresis de MRAMs basadas en Co y Fe₈₀B₂₀

Se han realizado simulaciones del proceso completo de desimanación de tres tricapas manteniendo fijo el material que constituye cada una de las capas y su espesor, pero con diferentes dimensiones laterales (500nm, 300nm y 200nm). En todas las tricapas se consideran las mismas propiedades físicas de capa. Las mismas condiciones iniciales y los mismos parámetros de control de las simulaciones (por ejemplo, el parámetro I_c y condiciones de contorno libres).

Como se ha descrito en el apartado “Metodología”, uno de los ficheros a configurar para iniciar las simulaciones es el archivo con el nombre “allop.txt”. En las simulaciones se ha utilizado un campo magnético inicial de 1600 kA/m y un campo magnético final de -1600 kA/m con un decremento uniforme de, aproximadamente, 0.4 kA/m. Este rango de campos cubre, tal como veremos en la exposición de los resultados, el proceso completo de desimanación de las tricapas.

4.1. Histéresis y espesor de la capa de Fe₈₀B₂₀

El orden elegido para la presentación y discusión de los resultados obtenidos en cada una de las tricapas es el de mayor a menor dimensión lateral.

4.1.1. Tricapa de lado 500 nm: Proceso de desimanación global y a campos bajos

La curva de desimanación completa de la tricapa de 500 nm de lado muestra la presencia de dos procesos de desimanación bien diferenciados (ver *Figura 9*). Uno de ellos tiene lugar a campos desimanadores moderados (inferiores a 10 kA/m) mientras que el segundo ocurre de forma muy abrupta a campos del orden de -360 kA/m (0.45 T, un campo 4.5×10^4 veces mayor que el magnético terrestre). Este es el comportamiento esperado a partir del diseño de la tricapa pues la información queda protegida en el sentido de que con campos inferiores a los 10 kA/m solo es posible conmutar la capa más blanda y la capa, más dura, de Co queda siempre fija en dirección y sentido hasta campos inalcanzables en dispositivos prácticos de registro.

Es, de todos modos, necesario identificar a que capa están ligados los dos procesos de desimanación y cuál es el estado de la otra capa cuando una de ellas se

invierte. Este objetivo se pretende alcanzar a partir del análisis de las configuraciones de momentos presentes en cada proceso de desimanación.

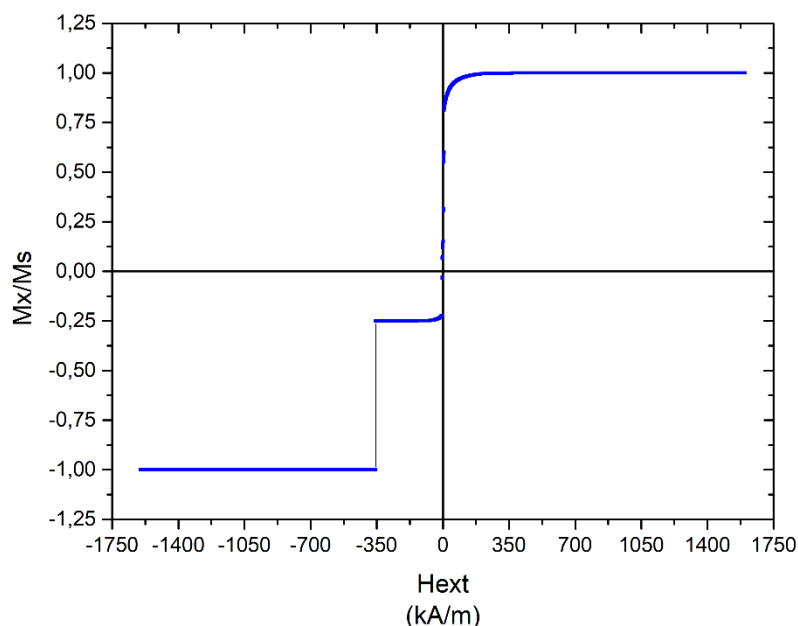


Figura 9. Muestra de 500 nm. Imanación, M , frente a campo aplicado, H , para el proceso de desimanación global.

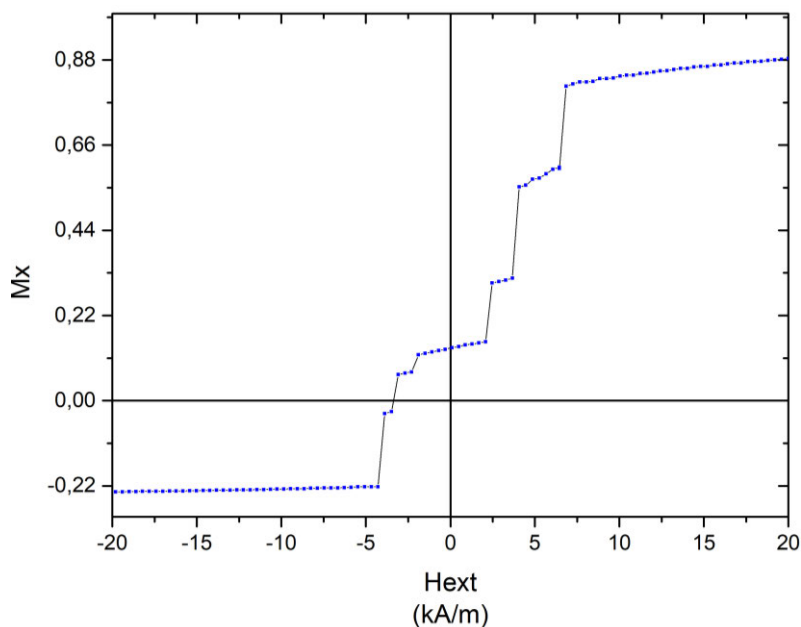


Figura 10. Muestra de 500 nm. Imanación, M , frente a campo aplicado, H , para el proceso de desimanación a campos aplicados bajos.

De la Figura 10, se puede observar el hecho de que el proceso de desimanación que se completa en campos menores tiene lugar, en realidad, a través de varios eventos de inversión a cada uno de los cuales le corresponde un ritmo de variación de la inversión

de la imanación elevado y diferente (los eventos de inversión empiezan a campos positivos pequeños y finalizan en campos desimanadores).

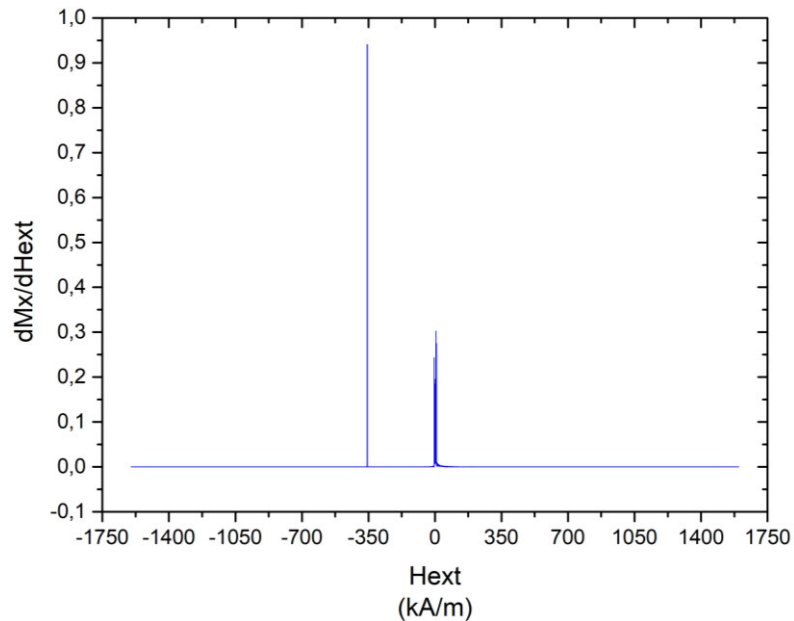


Figura 11. Muestra de 500 nm. dM/dH vs. H para el proceso de inversión global.

La Figura 11, presenta para el proceso de desimanación completo y mediante la dependencia de la derivada de la imanación respecto al campo aplicado mostrada en función del campo aplicado, lo abrupto de los eventos de desimanación observados en el proceso global (tanto los de campo reducido como el que ocurre a campos desimanadores elevados). Esta información nos permitirá conocer los intervalos de campo en los cuales hemos de identificar y discutir los procesos de inversión de imanación ligados a cada capa.

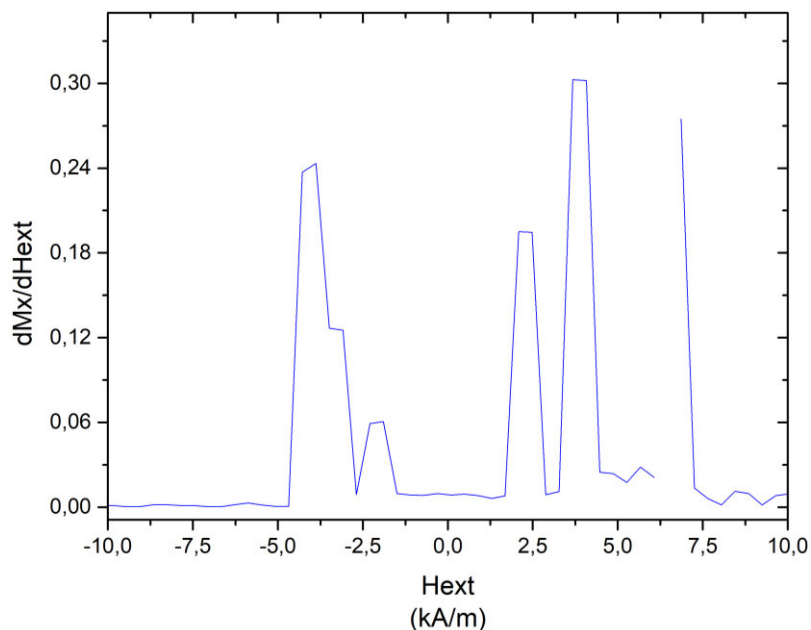


Figura 12. Muestra de 500 nm. dM/dH vs. H para el proceso de inversión que ocurre a campos desimanadores bajos.

La Figura 12, muestra los máximos agudos (picos) de la derivada de la imanación respecto al campo aplicado que están asociados a los procesos de desimanación a campo bajo. Se trata de seis procesos para los que la magnitud del pico se liga a la del salto en imanación correspondiente¹.

4.1.2. Tricapa de lado 500 nm: Configuraciones de momentos en el proceso de desimanación

En la Figura 13, se representa la evolución con el incremento del campo desimanador y en el intervalo de campos centrado en el pico de inversión observado a campos desimanadores elevados (Figura 9) de las configuraciones de momentos calculadas por Magpar y correspondientes a un plano dentro de la capa de Co. Es posible observar como para campos inferiores en magnitud al del pico, la configuración de momentos es uniforme y está asociada a imanación paralela al eje X positivo (dirección y sentido del campo de saturación). En un solo incremento de campo desimanador (0.4 kA/m) se puede observar la conmutación completa de la capa hacia una configuración también uniforme, pero en la que la imanación apunta según el eje X negativo (saturación negativa). El representado en la Figura 13 es el único proceso

¹ El pico observado, aproximadamente, a un campo de 7 kA/m no se ha podido definir por completo pues Magpar no ha podido alcanzar, en el número máximo de iteraciones aceptado y para al menos un campo dentro del pico, una variación de la energía entre iteraciones sucesivas menor que el error predefinido. Se trata pues de estado(s) para los que Magpar no garantiza el haber alcanzado un estado de equilibrio.

de variación de imanación observado en esta capa en todo el intervalo de campos considerado lo que muestra que la capa de Co solo es conmutable a campos elevados.

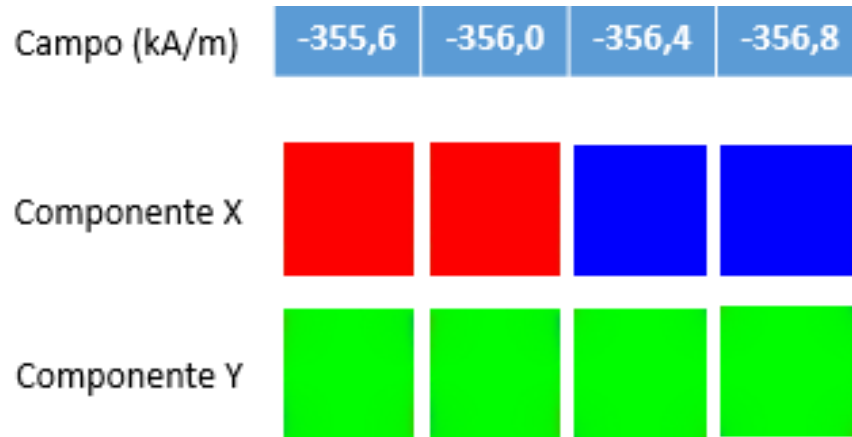


Figura 13. Configuraciones de momentos magnéticos calculadas para la capa de Co en la tricapa de lado 500 nm.

En la *Figura 14*, se ha representado la evolución, con la disminución y anulación del campo imanador y el incremento del desimanador, de los gráficos codificados en colores que muestran el proceso de desimanación en campos bajos correspondiente a un plano situado dentro de la capa de FeB. Se presentan las evoluciones correspondientes a las componentes X e Y de la imanación de la capa FeB (la componente Z obtenida es aproximadamente nula independientemente del campo y la posición). Para hacer posible la comparación con la capa de Co se muestra también la distribución de imanación calculada en dicha capa a campo cero que, como ya se mencionado, se corresponde con la saturación completa según el eje X positivo. Y coincide con la observable en cualquier otro campo en la zona del proceso de desimanación de campos bajos.

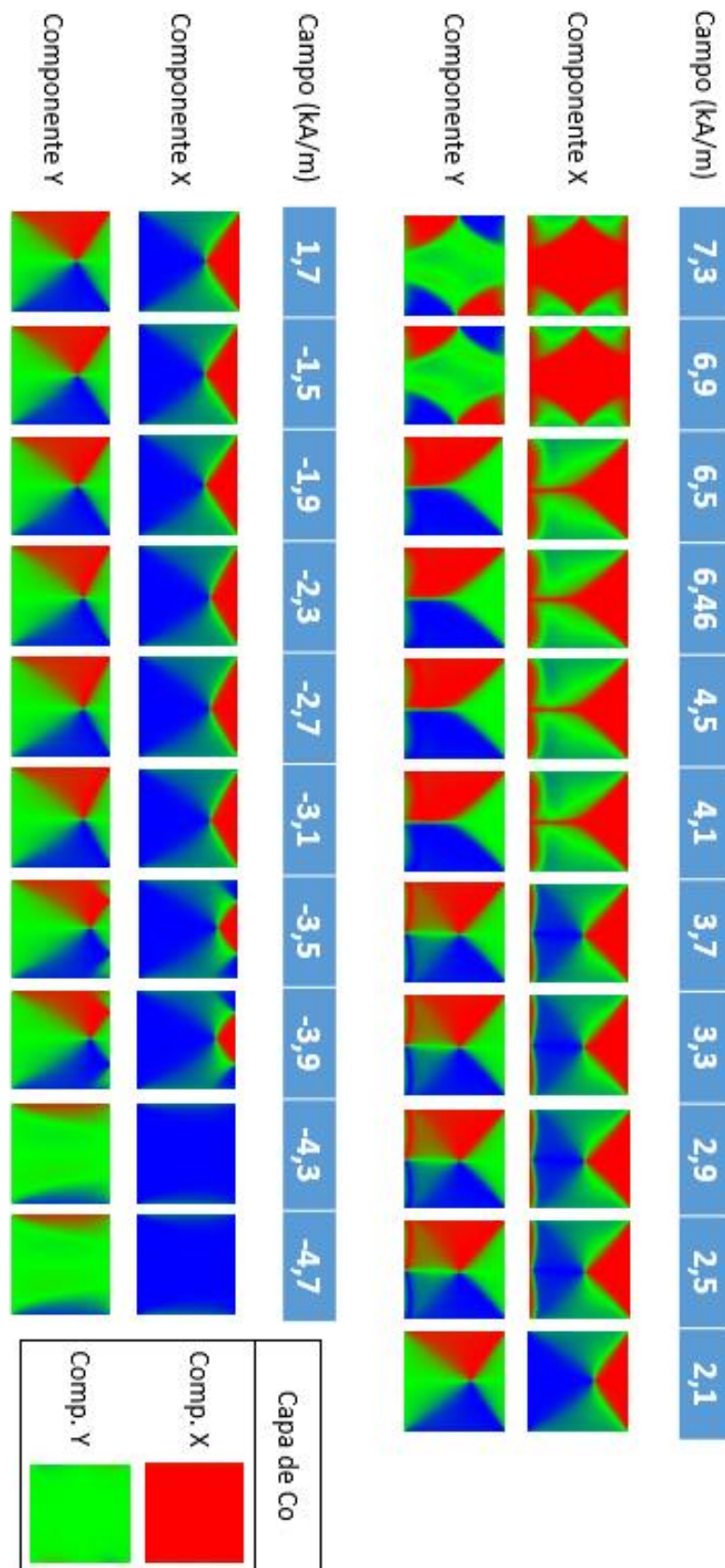


Figura 14. Configuraciones de momentos magnéticos calculadas para campos desimanadores inferiores y superiores al de conmutación de la capa de FeB en la tricapa de lado 500 nm. El inserto muestra la orientación de la capa de Co durante todos los campos considerados para la capa de FeB.

La evolución de la configuración de momentos en la capa de FeB permite observar (tanto en la componente X como en la Y) como, para el mayor campo presentado, la distribución de momentos se corresponde con una configuración cuadrupolar localizada en los cuatro vértices del plano representado y resultante (de modo reversible) de la disminución del campo desimanador desde los valores saturantes hasta el mayor de los presentados en la *Figura 14*. Cuando el campo imanador disminuye se puede observar como el cuadrupolo se deforma evolucionando hacia la nucleación de un vórtice horario² y centrado en un punto ligeramente por encima del centro de la capa de FeB representada. El proceso de desimanación se completa por desplazamiento del centro del vórtice hacia el centro del lado superior de la capa de FeB. Cuando el vórtice abandona (irreversiblemente) la capa de FeB por el lado mencionado la configuración de momentos pasa a corresponderse con la saturada (negativa).

De estas distribuciones de momentos se concluye que mientras la capa de FeB puede transitar de la distribución uniforme con sentido positivo a la correspondiente negativa en un intervalo de campos del orden de unas pocas unidades de kA/m, la capa de Co permanece completamente saturada hasta campos desimanadores mucho mayores (por un factor cercano a 40) garantizándose así la protección de los símbolos frente a la inversión de la capa dura y la posibilidad de invertir la imanación en campos que aun estando claramente por encima de los campos ambientales (por un factor cercano a 10^2) no suponen una inversión energética elevada. Como ejemplo de esto último, para pistas imanadoras lineales con longitudes del orden de los 100 nm los campos de conmutación pueden crearse mediante corrientes de unas pocas unidades de miliamperios) (ver *Figura 15*).

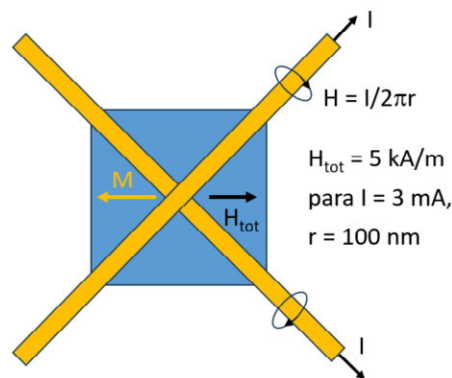


Figura 15. Esquema de las pistas de escritura en la cara superior de una tricapa MRAM (para la lectura una de las pistas ha de conformarse en la cara opuesta de la tricapa).

² El vórtice horario y el vórtice antihorario tienen la misma energía por lo que al ser Magpar un código que utiliza números aleatorios generará ambos sentidos de giro con igual probabilidad.

4.1.3. Tricapa de lado 500 nm: Proceso de reimanación global y a campos bajos

En la representación de la curva del proceso global de reimanación en la tricapa de lado 500nm (Figura 16), se puede observar que este se ha producido en dos fases diferenciadas. La primera, en torno a los 8 kA/m de una manera escalonada y la segunda, de una forma más brusca alrededor de los 360 kA/m. Siendo la primera fase la correspondiente a la capa blanda (FeB) y la segunda la conmutación de la capa dura (Co). Al igual que en la simulación de la desimanación de esta tricapa de lado 500nm, se consigue proteger la información almacenada en la capa blanda a campos inferiores a 8 kA/m y quedaría protegida la configuración de momentos en la capa dura.

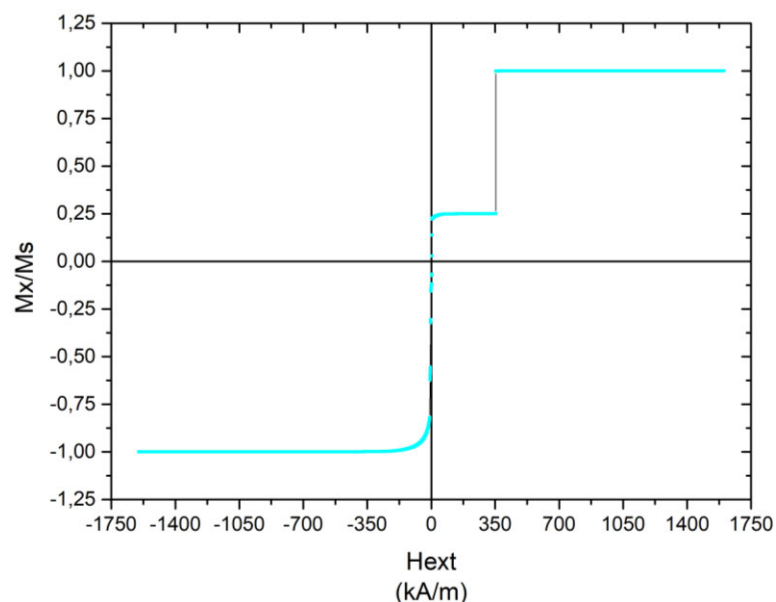


Figura 16. Muestra de 500 nm. Reimanación, M , frente a campo aplicado, H , para el proceso de reimanación global.

Analizando en detalle el proceso de reimanación de la capa blanda (FeB) (véase Figura 17), se puede observar que este proceso de desimanación ha sido menos abrupto que el de la capa dura porque se ha producido en varios eventos. El proceso de inversión de la capa blanda, se produce alrededor de los -8 kA/m y finaliza en campos imanadores bajos.

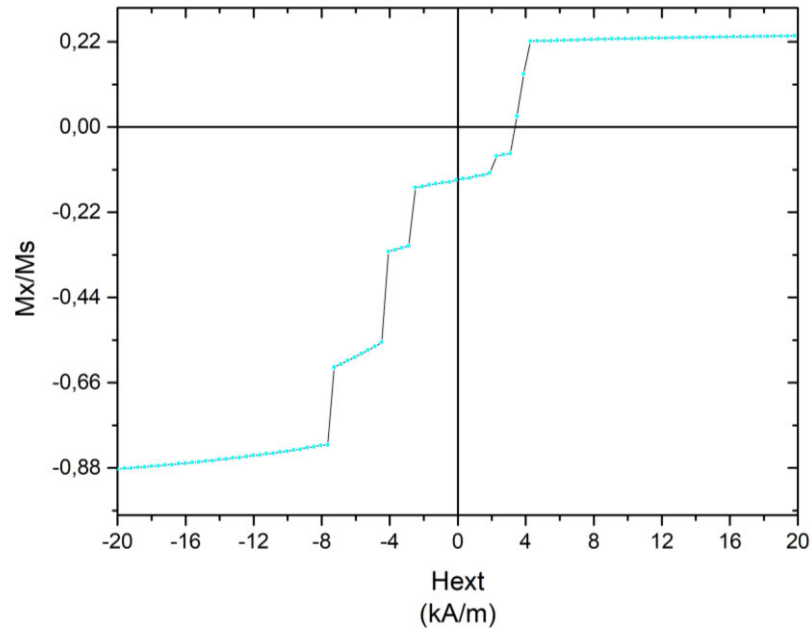


Figura 17. Muestra de 500 nm. Reimanación, M , frente a campo aplicado, H , para el proceso de reimanación a campos aplicados bajos.

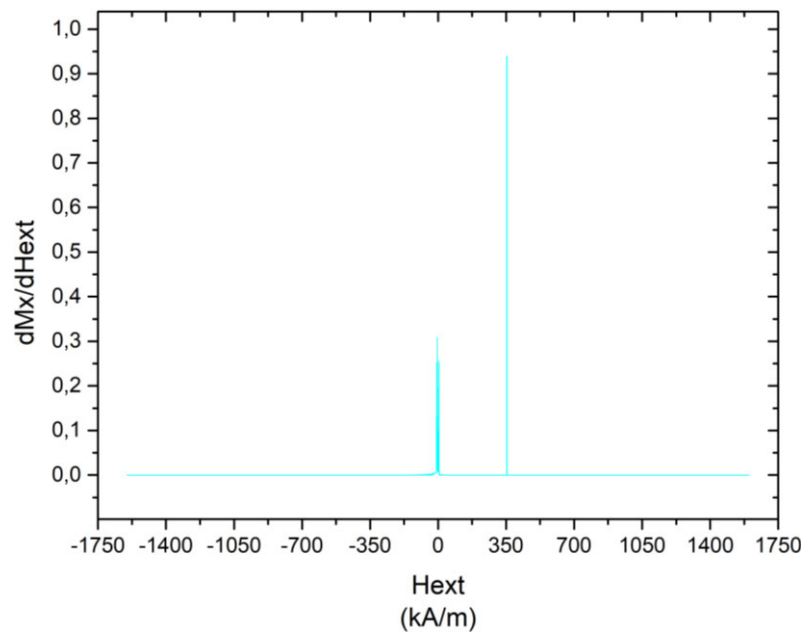


Figura 18. Muestra de 500 nm. dM/dH vs. H para el proceso de inversión global en el proceso de reimanación.

En la *Figura 18*, se representa la derivada de la imanación respecto al campo aplicado en función del campo aplicado. Se pueden observar los procesos de reimanación de la capa blanda y de la capa dura producidos a campos bajos y altos respectivamente.

Tras el análisis de la anterior imagen, en la *Figura 19* se reduce la escala de campos al intervalo entre -10 kA/m y 10 kA/m para analizar los máximos localizados en esta región, correspondientes a la capa blanda, de FeB. El proceso de inversión de esta capa blanda se produce a través de los cinco eventos asociados a los máximos.

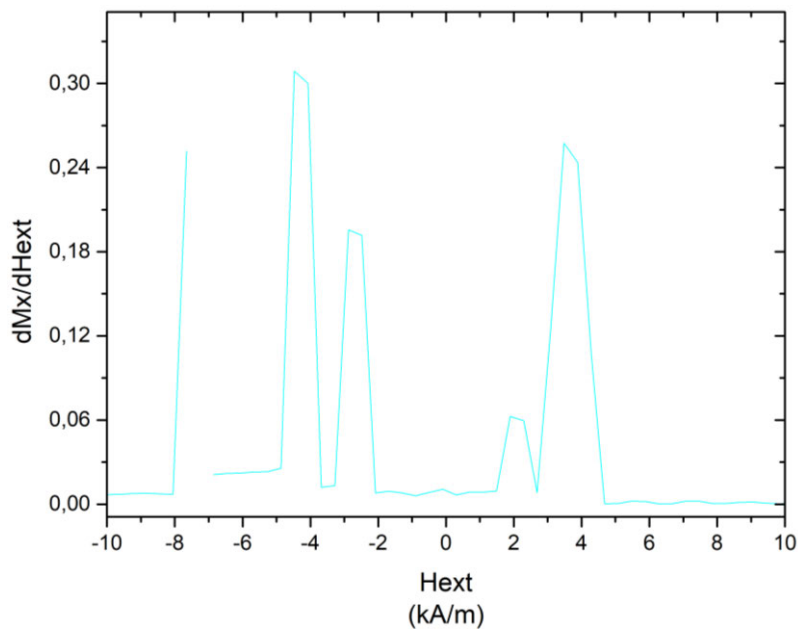


Figura 19. Muestra de 500 nm. dM/dH vs. H para el proceso de inversión que ocurre a campos imanadores bajos.

4.1.4. Tricapa de lado 500 nm: Configuraciones de momentos en el proceso de reimanación

La evolución de la configuración de momentos en la capa de Co, representada en la *Figura 20*, se reproduce en el mismo orden que las obtenidas del proceso de desimanación. Como corresponde al proceso global, tiene lugar en campos imanadores elevados. La capa dura mantiene su configuración de momentos uniforme durante toda la simulación hasta llegar alrededor de los 360 kA/m, campo en el cuál se produce la conmutación completa de la configuración de momentos en un único incremento de campo de 0.4 kA/m. Mantiene esta configuración en la capa dura hasta el campo final de la simulación.

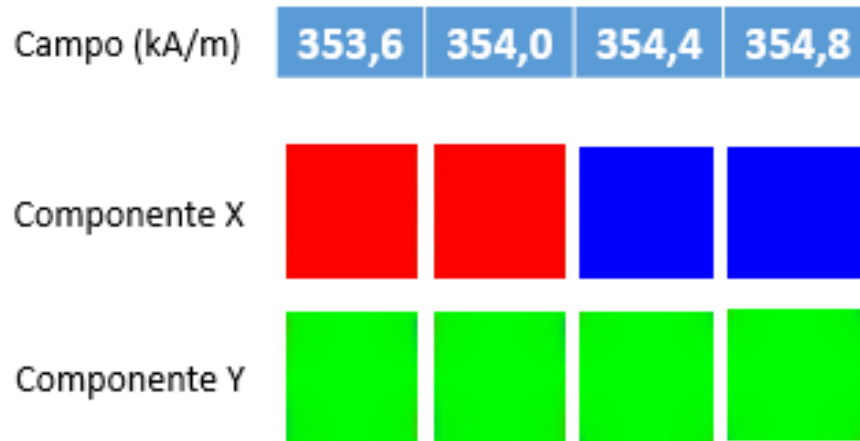


Figura 20. Configuraciones de momentos magnéticos calculados para campos imanadores de la capa de Co en la tricapa de lado 500 nm.

Como en la anterior imagen, en la *Figura 20*, se ha utilizado la misma representación que en el proceso de desimanación. En esta imagen, se representa la evolución en la configuración de momentos durante el proceso de reimanación en la capa blanda, la de FeB, y la capa dura, la de Co, a campos bajos. Se han incluido únicamente los gráficos de color correspondientes a la componente X e Y de ambas capas puesto que en la componente Z no se han observado cambios relevantes. En un lateral de esta imagen se puede observar la configuración de momentos que mantiene la capa dura entre los valores representados.

En la configuración de momentos representada en la *Figura 20* se puede percibir que esta inversión se produce por medio de varios eventos hasta la inversión de la capa blanda. En primer lugar, para el menor campo representado se distingue una configuración cuadrupolar en las cuatro aristas del plano de la capa. Según va aumentando el campo imanador la configuración evoluciona hasta generar un vórtice con sentido antihorario (levemente desplazado hacia la parte superior) en el plano representado. Esta configuración de momentos se mantiene hasta la inversión total de la capa blanda en el proceso de reimanación que se produce mediante el movimiento del centro del vórtice hacia la parte superior de la capa. Cuando el vórtice abandona la capa esta queda invertida, lo que corresponde a una configuración de momentos de saturación positiva.

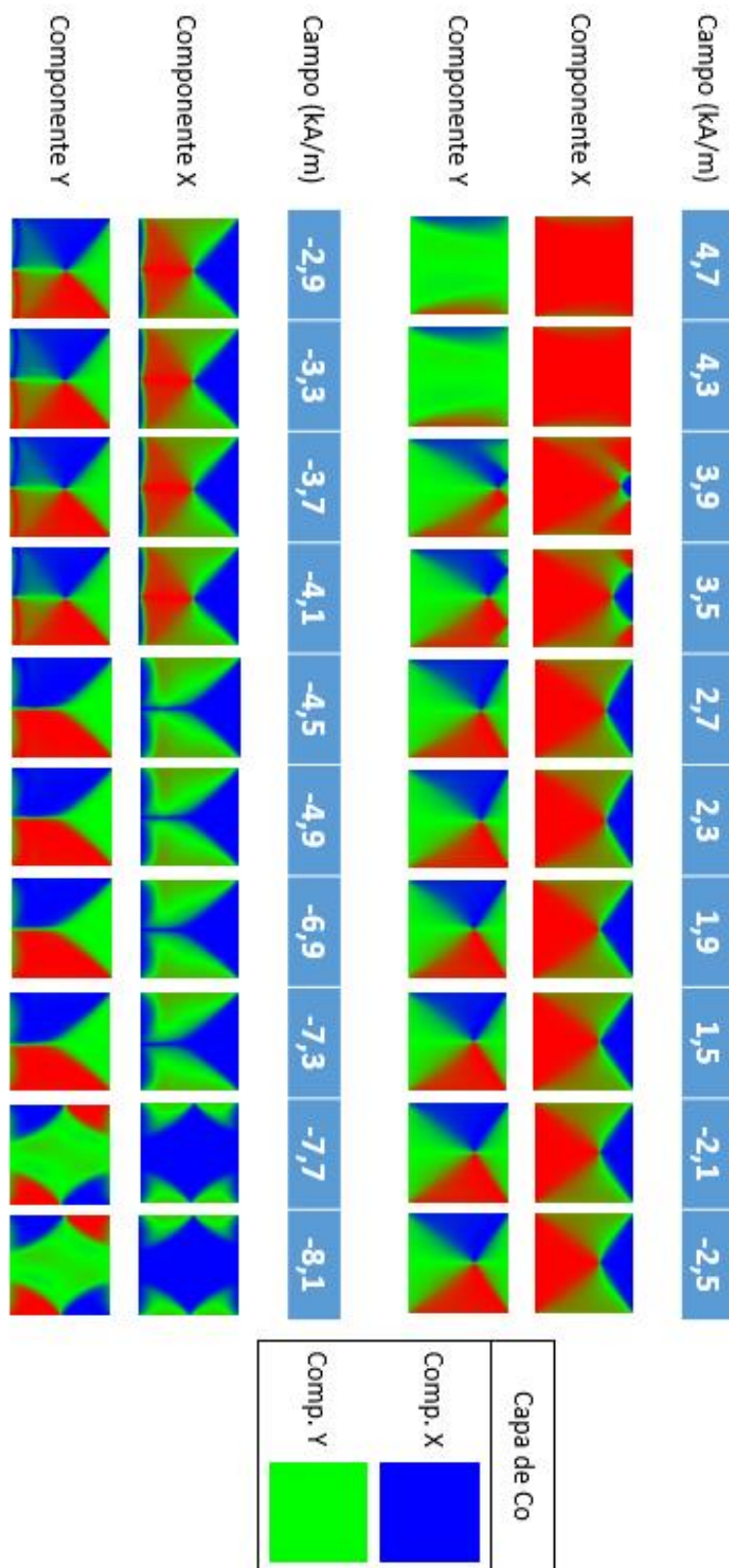


Figura 21. Configuraciones de momentos magnéticos calculadas para campos imanadores inferiores y superiores al de conmutación de la capa de FeB en la tricapa de lado 500 nm. El inserto muestra la orientación de la capa de Co durante todos los campos considerados para la capa de FeB.

4.1.5. Tricapa de lado 300 nm: Proceso de desimanación global y a campos bajos

La simulación de la tricapa de lado 300 nm en el proceso de imanación ha mostrado un comportamiento similar al de la anterior tricapa con una curva de desimanación en la que se pueden observar dos procesos diferenciados como está aparece representado en la *Figura 22*. Estos dos procesos ocurren en campos desimanadores bajos, en torno a 10 kA/m para el proceso de inversión de la capa blanda y a campos altos, sobre los 360 kA/m para la capa dura. Al estar tan separados los procesos de inversión de ambas capas se consigue proteger la información al conmutar solo la capa blanda.

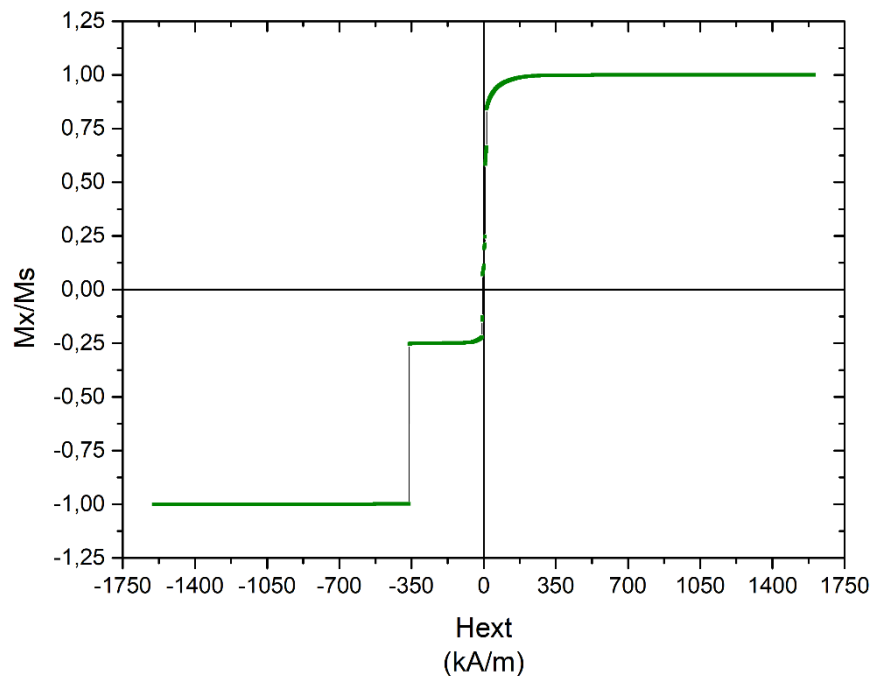


Figura 22. Muestra de 300 nm. Imanación, M , frente a campo aplicado, H , para el proceso de desimanación global.

Al poner el foco en los campos bajos para el proceso de desimanación en esta tricapa (véase *Figura 23*) se puede observar como la inversión de la capa blanda se produce en seis eventos.

En el proceso de desimanación completo, la derivada de la imanación respecto al campo aplicado como función del campo aplicado representada en la *Figura 24* muestra, en correspondencia con cada máximo representado, los eventos observados en el proceso de inversión de cada capa.

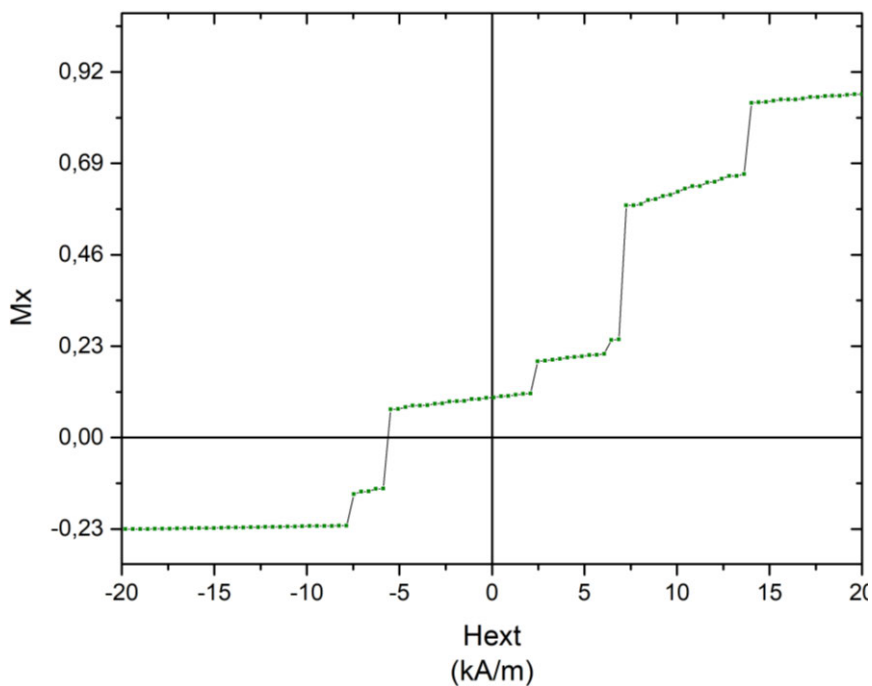


Figura 23. Muestra de 300 nm. Imanación, M , frente a campo aplicado, H , para el proceso de desimanación a campos aplicados bajos.

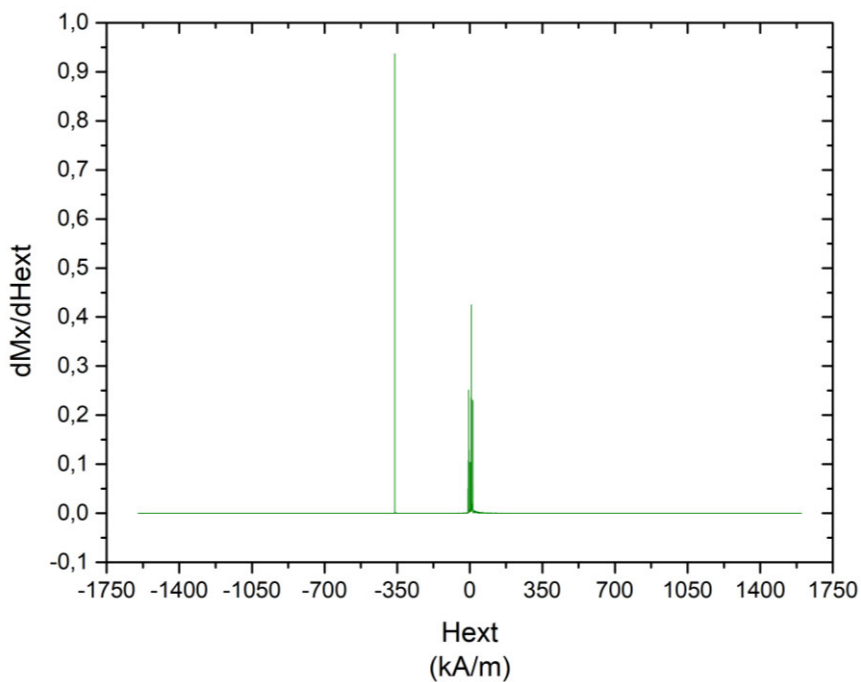


Figura 24. Muestra de 300 nm. dM/dH respecto H para el proceso de inversión global.

Ampliando la escala en la gráfica anterior en la región de campos bajos, se obtiene el comportamiento en la capa blanda de esta tricapa durante el proceso de desimanación a través de la derivada de la imanación respecto al campo aplicado en

función del campo aplicado (*Figura 25*). En esta, se puede observar que cada máximo representado corresponde a uno de los eventos vistos con anterioridad en la *Figura 23*, concretamente los seis eventos mediante los cuales se produce la inversión de esta capa.

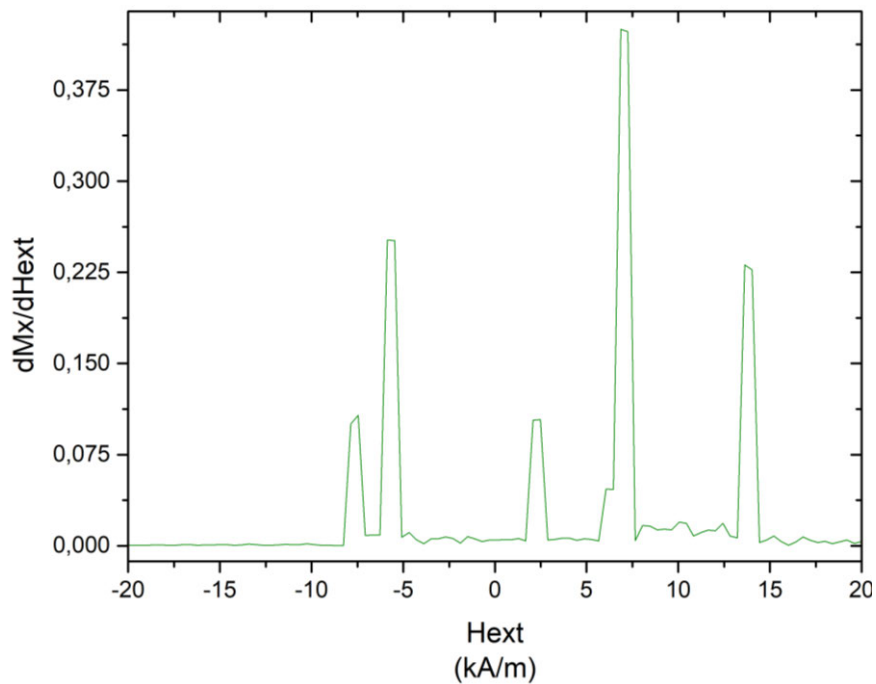


Figura 25. Muestra de 300 nm. dM/dH vs. H para el proceso de inversión que ocurre a campos desimanadores bajos.

4.1.6. Tricapa de lado 300 nm: Configuraciones de momentos en el proceso de desimanación

En la evolución de la configuración de momentos de la capa dura representada en la *Figura 26* se puede observar cómo se produce la inversión de esta a campos desimanadores elevados. En dicha imagen, se muestran las componentes X e Y de cuatro capturas contiguas en campo aplicado obtenidas en la simulación de esta tricapa y que se producen con un intervalo de 0.4 kA/m . Se puede observar que la inversión de esta capa se produce en la componente X, entorno a los 360 kA/m , pasando de estar la configuración de momentos paralelos, en dirección y sentido, en esta componente a la inversión del sentido de los momentos, pasando de sentido positivo (color rojo) a negativo (color azul) en un solo incremento de la simulación. Esta capa sólo presenta este proceso de inversión como se pudo observar anteriormente en la *Figura 22* y en la *Figura 24*.

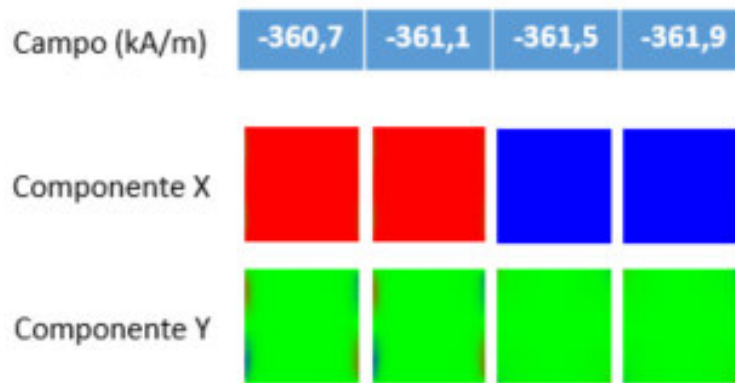


Figura 26. Configuraciones de momentos magnéticos calculadas para la capa de Co en la tricapa de lado 300 nm.

En la capa blanda, la de FeB, como se pudo ver en la Figura 23 y la Figura 25 la inversión se produce mediante seis eventos. Estos eventos se pueden observar en la representación de la *Figura 27*, en la cual solo se presentan las componentes X e Y de ambas capas, puesto que en la componente Z no se producen cambios significativos durante toda la simulación. En la imagen, se ha incluido en un recuadro la configuración de momentos que mantiene la capa dura, la de Co, a campos bajos mientras se produce la inversión de la capa de FeB.

En el gráfico de colores (véase *Figura 27*) se puede observar la configuración de momentos de la capa blanda que se produce hasta la inversión de la misma durante el proceso de desimanciación de la tricapa de lado 300 nm. Siguiendo el proceso de la simulación se empezará a analizar desde los campos más elevados hasta los más bajos, los negativos. En los campos más elevados se puede observar que presenta una configuración cuadrupolar con los polos cercanos a las esquinas de la capa. Según va aumentando el campo desimanador aplicado a la tricapa se altera la configuración cuadrupolar derivando en un vórtice con sentido horario y centrado en el plano representado, ligeramente desviado hacia arriba. Para concluir, en la configuración de momentos se puede observar como al aumentar el campo aplicado el centro del vórtice se desplaza hacia la parte superior del plano hasta desaparecer, quedando la configuración de la capa de FeB saturada negativamente, estado representado en color azul.

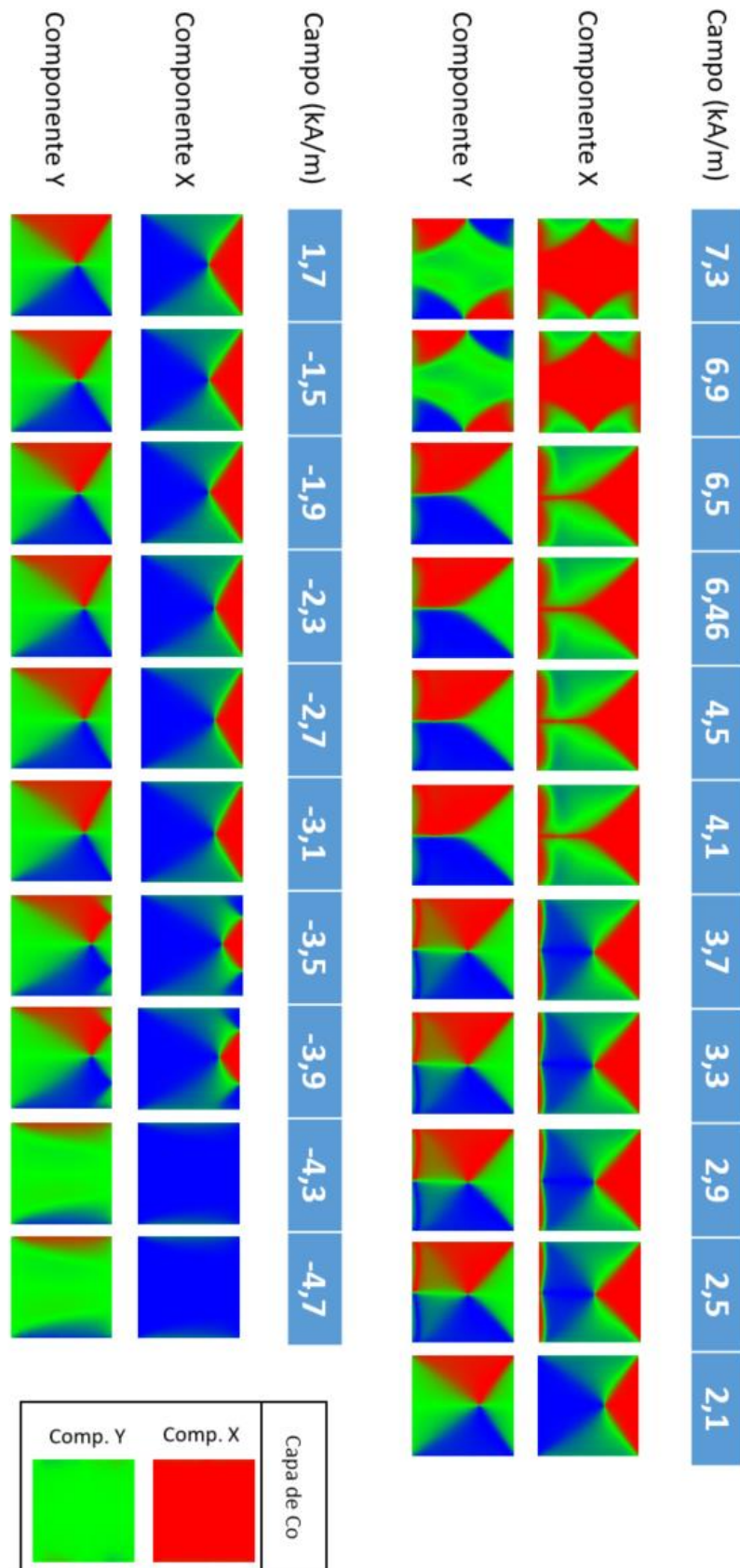


Figura 27. Configuraciones de momentos magnéticos calculadas para campos desimanadores inferiores y superiores al de conmutación de la capa de FeB en la tricapa de lado 300 nm. El inserto muestra la orientación de la capa de Co durante todos los campos considerados para la capa de FeB.

4.1.7. Tricapa de lado 200 nm: Proceso de desimanación global y a campos bajos

En el proceso de desimanación completo de la tricapa de lado 200 nm representado en la *Figura 28* se puede observar cómo se produce a través de dos eventos bien diferenciados, uno a campos bajos y otro a campos elevados, correspondientes a la capa de FeB, en torno a 40 kA/m, y a la de Co, sobre 360 kA/m. La inversión de la capa dura se observa que se produce de una manera más abrupta que la de la capa blanda.

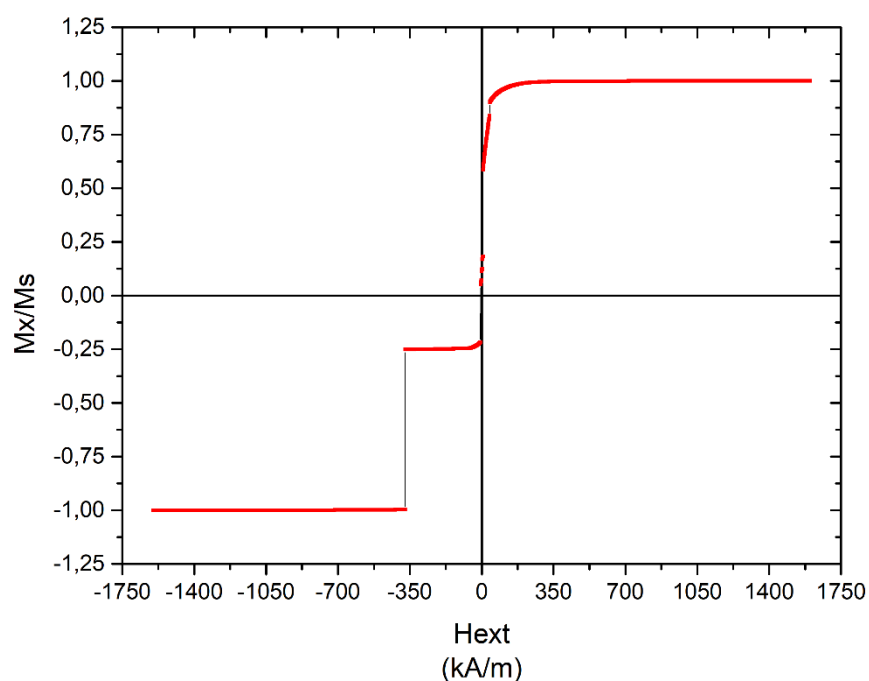


Figura 28. Muestra de 200 nm. Imanación, M , frente a campo aplicado, H , para el proceso de desimanación global.

Al ampliar la zona de campos bajos de la curva de desimanación se obtiene como resultado la *Figura 29* que representa el proceso de inversión de la capa blanda. En esta se puede observar como el proceso de desimanación en la capa de FeB se produce a través en cinco eventos bien diferenciados que se inician en torno a 40 kA/m y terminan alrededor de los -7 kA/m.

En la *Figura 30*, se representan los máximos de la derivada de la imanación respecto al campo aplicado en función del campo aplicado. Los máximos están

asociados a la magnitud de los eventos de inversión observados en la *Figura 28* durante el proceso de desimanación global de la tricapa de 200 nm.

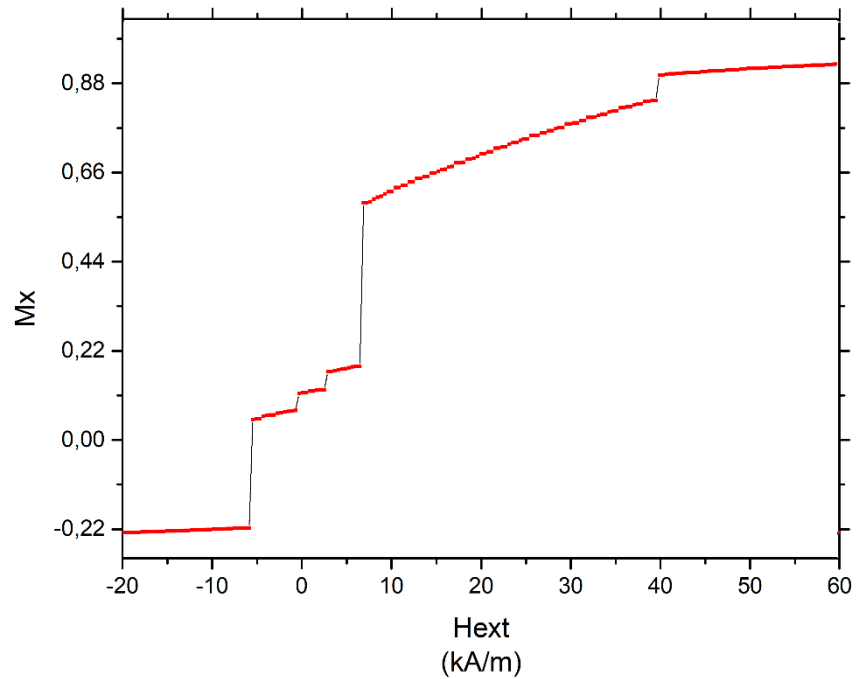


Figura 29. Muestra de 200 nm. Imanación, M , frente a campo aplicado, H para el proceso de desimanación a campos aplicados bajos.

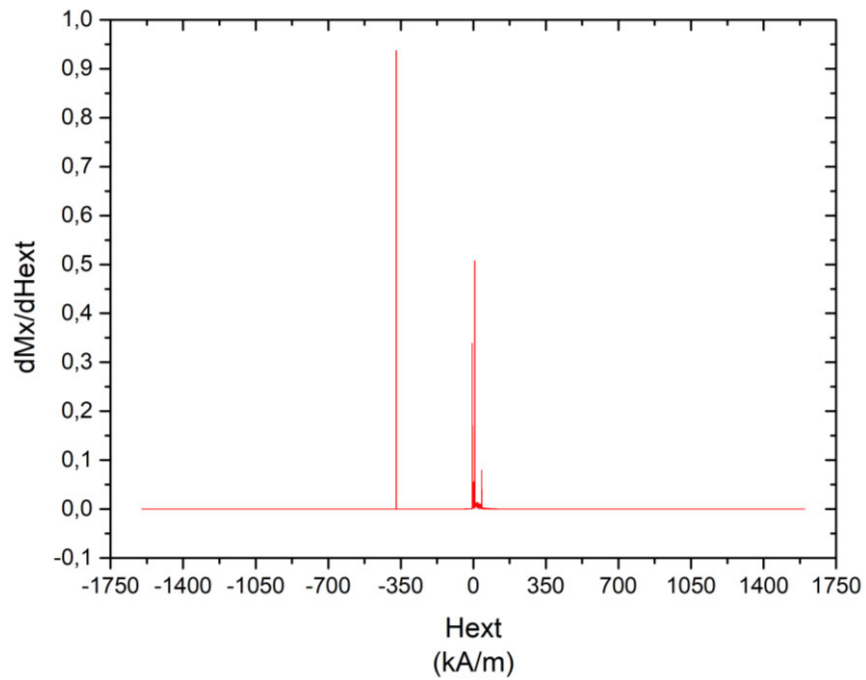


Figura 30. Muestra de 200 nm. dM/dH vs H para el proceso de inversión global.

La *Figura 31* es una ampliación de escala a campos bajos de la *Figura 30* por medio de la cual se puede visualizar más en detalle la magnitud de los cinco eventos de inversión producidos en la capa de FeB observados anteriormente en la *Figura 29*, en la curva de desimanación de la capa blanda.

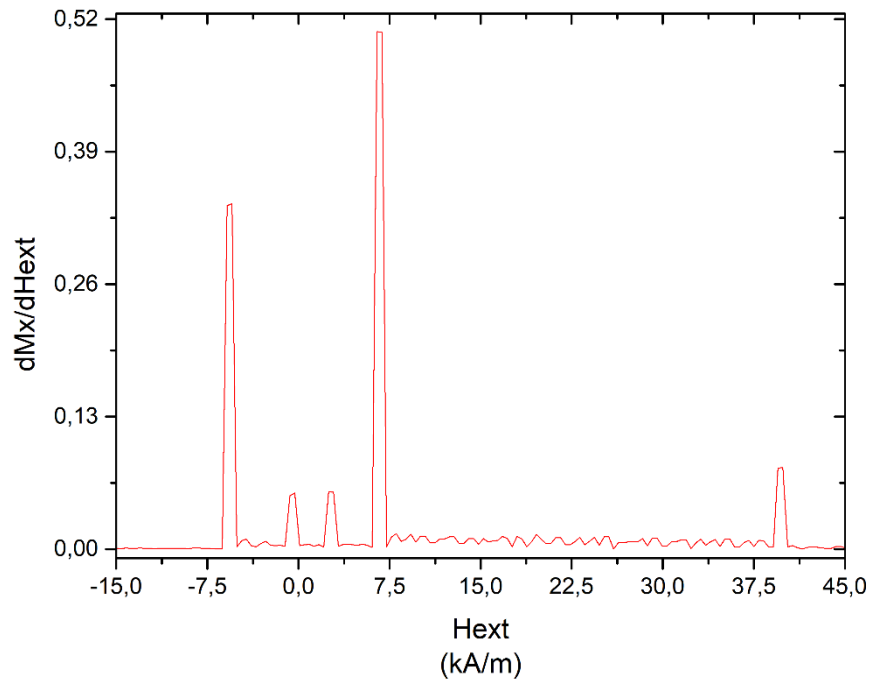


Figura 31. Muestra de 200 nm. dM/dH vs. H para el proceso de inversión que ocurre a campos desimanadores bajos.

4.1.8. Tricapa de lado 200 nm: Configuraciones de momentos en el proceso de desimanación

La evolución de la configuración de momentos de la capa de Co se representa en la *Figura 32* mediante un gráfico de colores, con el evento de inversión centrado en esta. Se puede observar como en un único incremento, de 0.4 kA/m, en la simulación la capa dura conmuta en la componente X de una configuración paralela en dirección y sentido, en color rojo, a otra manteniendo la dirección, pero con una orientación negativa, en color azul. La configuración de momentos se mantiene durante todo el proceso de desimanación hasta llegar al evento de inversión de esta capa en -372 kA/m cuando la componente X se satura negativamente y se conserva hasta el final de la simulación.

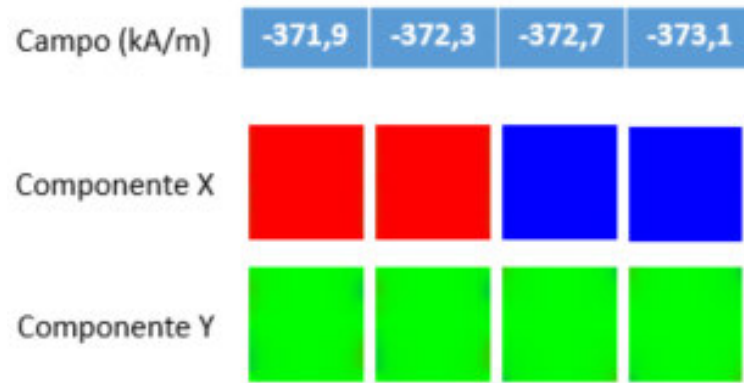


Figura 32. Configuraciones de momentos magnéticos calculadas para la capa de Co en la tricapa de lado 200 nm

La configuración de momentos de la capa de FeB durante el proceso de desimantación a campos bajos representada mediante el gráfico de colores de la *Figura 33* muestra a un lado las componentes X e Y de la capa de Co que mantiene la orientación durante el proceso de inversión hasta campos elevados. En esta figura se representa la evolución de la capa de FeB durante el proceso de desimantación en campos bajos visto la *Figura 29*. Las componentes que se muestran son la componente X y la componente Y puesto que la variación de la componente Z durante la totalidad de la simulación es nula y no aporta datos significativos para la interpretación del proceso.

Observando la *Figura 29*, en los campos más elevados, se puede identificar una configuración cuadrupolar con los polos próximos a los vértices de la capa. Conforme va aumentando el campo desimanador la configuración anterior se altera adoptando la de un vórtice centrado por encima del plano representado con un sentido antihorario. El centro del vórtice se va desplazando hacia abajo pasando por el centro del plano para acabar abandonándolo por la parte inferior quedando una configuración con una saturación negativa del plano.

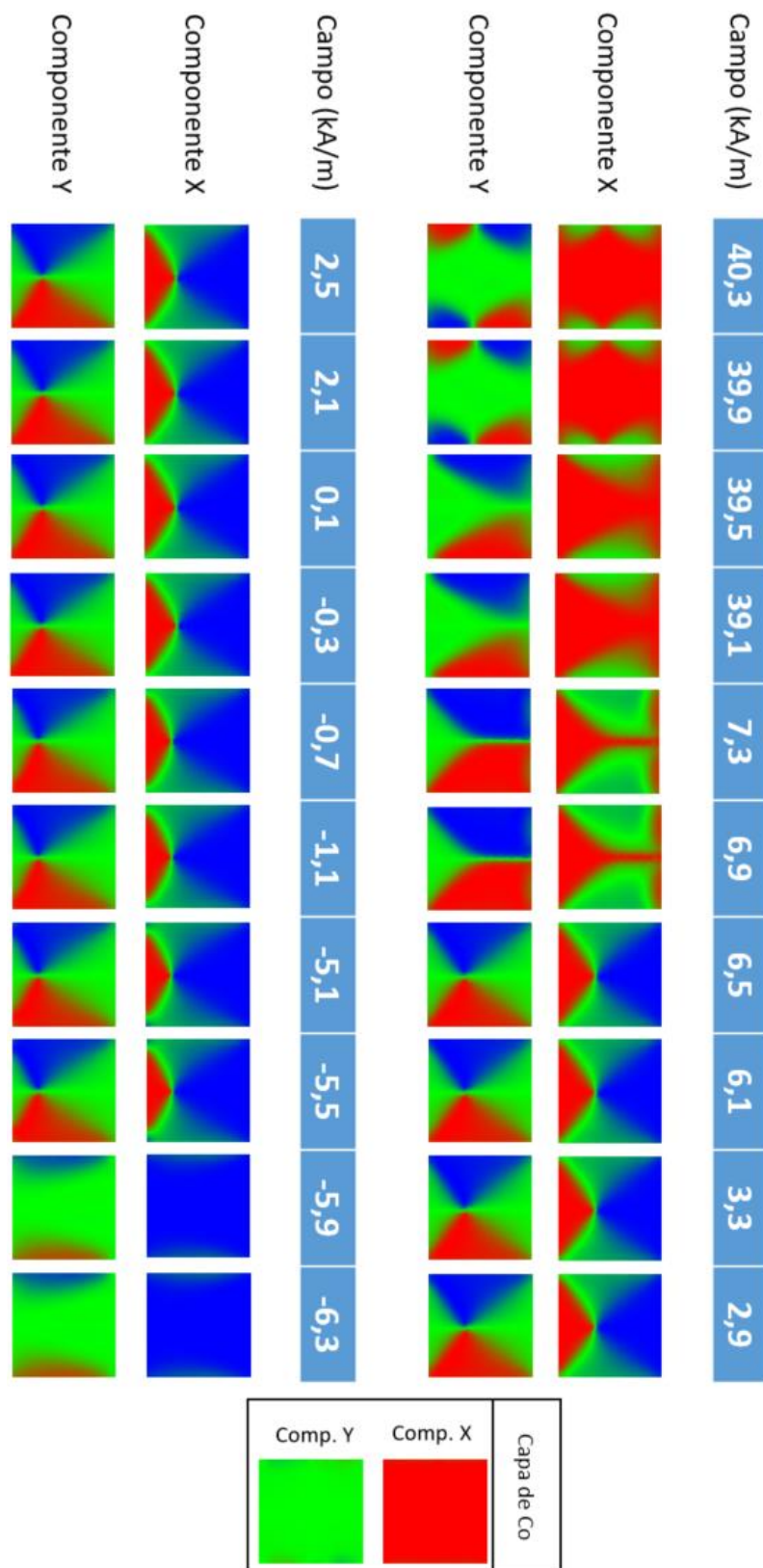


Figura 33. Configuraciones de momentos magnéticos calculadas para campos desimanadores inferiores y superiores al de conmutación de la capa de FeB en la tricapa de lado 200 nm. El inserto muestra la orientación de la capa de Co durante todos los campos considerados para la capa de FeB.

4.2. Resumen del comportamiento biestable de las tricapas

La *Figura 34* muestra la curva de desimanación de la tricapa de 500 nm (representativa de las tres muestras simuladas) junto con las configuraciones de momentos obtenidas para las capas de FeB y Co en campos inferiores y superiores a los de los procesos parciales de desimanación. En la Figura se pueden observar los rangos de campo y las configuraciones de momentos asociados a los símbolos lógicos, así como el intervalo de campo ligado a la conmutación de símbolos.

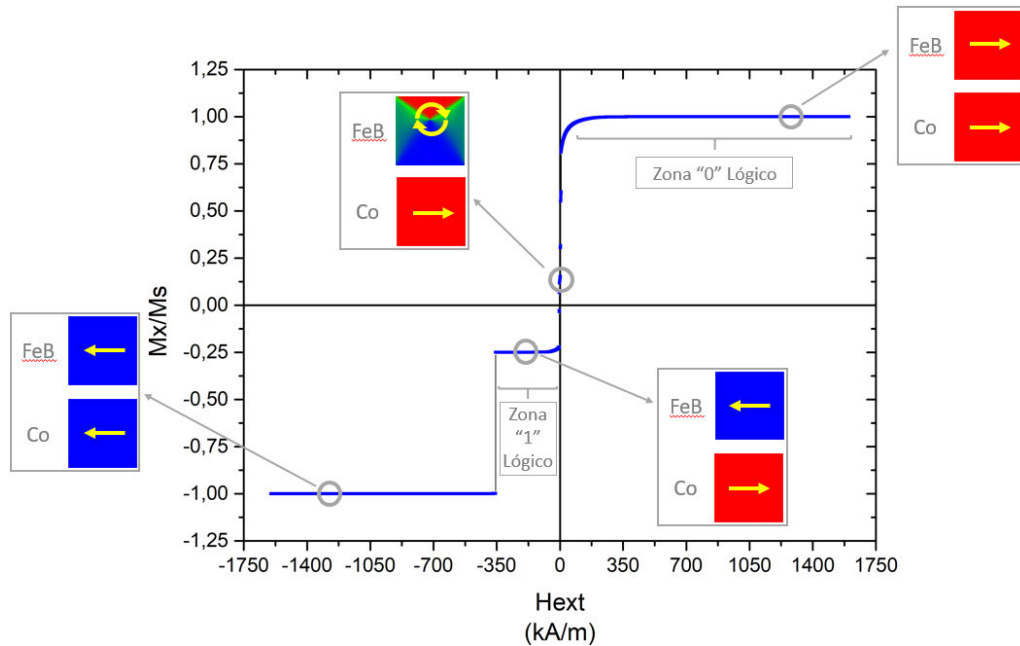


Figura 34. Curva de desimanación de la tricapa de 500 nm (representativa de las tres muestras simuladas)

4.3. Comparación de las simulaciones

En este apartado se van a contrastar los resultados obtenidos en las diferentes simulaciones efectuadas en el desarrollo de este proyecto. Se dividirá en dos subapartados. En el primero, se comparará la simulación del proceso de desimanación frente al de reimanación. El siguiente subapartado, relaciona las simulaciones de los procesos de desimanación de las tricapas con diferentes longitudes de lado.

4.3.1. Comparación del proceso de desimanación y reimanación en la tricapa de 500 nm

En la *Figura 35* se puede observar el ciclo de histéresis obtenido de la simulación de los procesos de desimanación e reimanación en la tricapa de 500nm entre 1600 kA/m y -1600 kA/m.

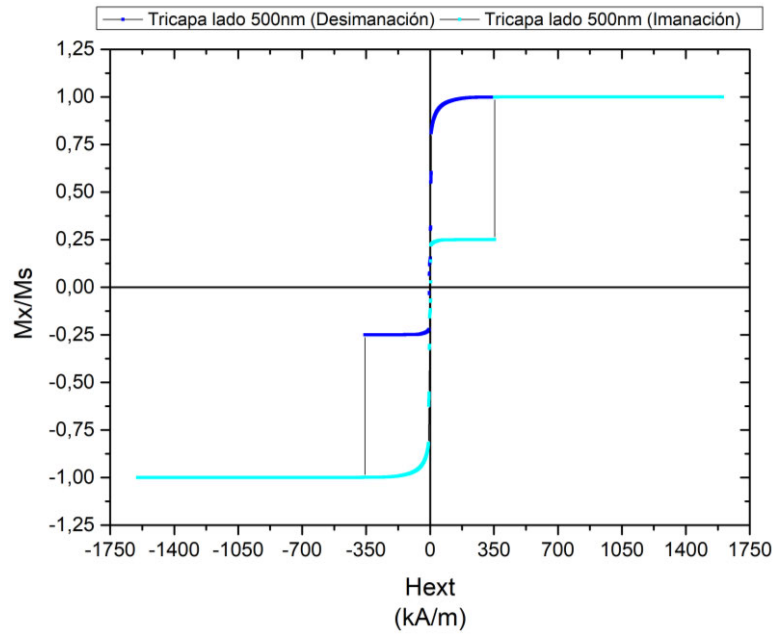


Figura 35. Comparación de la desimanación e reimanación global (histéresis) en la tricapa de 500nm.

El proceso de inversión de la capa dura de la tricapa de 500 nm, tanto en el proceso de desimanación (354 kA/m) como en el de reimanación (-346 kA/m) se han producido en campos muy cercanos.

En la Figura 36 se puede observar la inversión de dicha capa en ambos procesos, en el proceso de desimanación y el de reimanación.

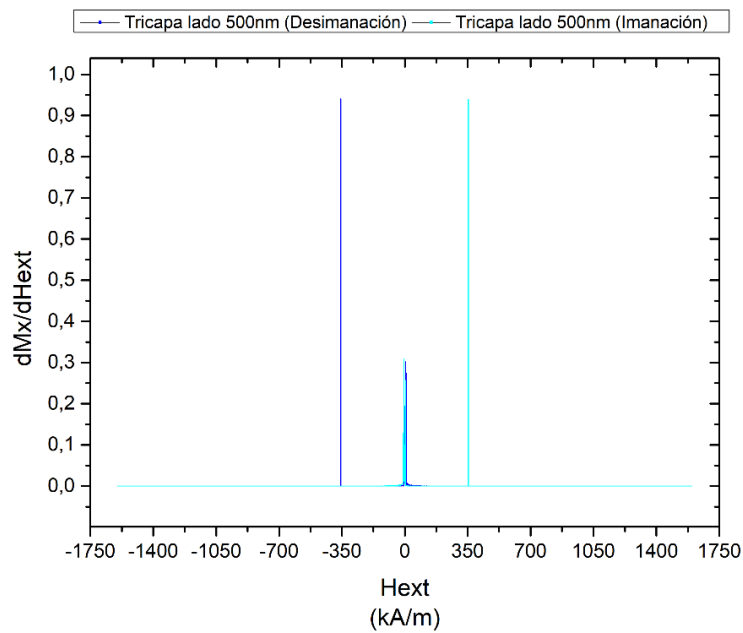


Figura 36. Comparación de los picos de la derivada global de la tricapa de 500nm.

En el caso de la capa blanda, se puede advertir una ligera diferencia entre ambos procesos (Véase la *Figura 37* y la *Figura 38*), puesto que el número de eventos en los que se produce la inversión a campos bajos es de seis para el proceso de desimanación y de cinco para el proceso de desimanación.

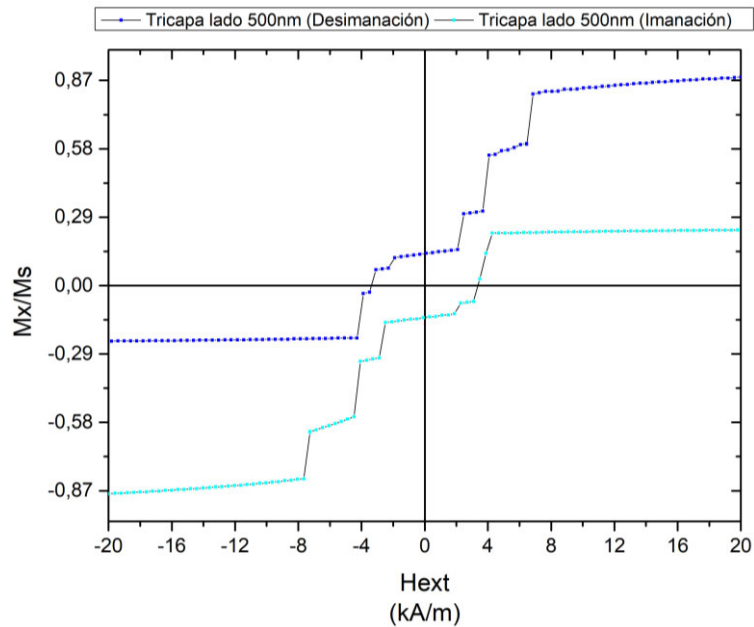


Figura 37. Comparación entre la desimanación y la reimanación de la capa blanda de $Fe_{80}B_{20}$ en la tricapa de 500nm.

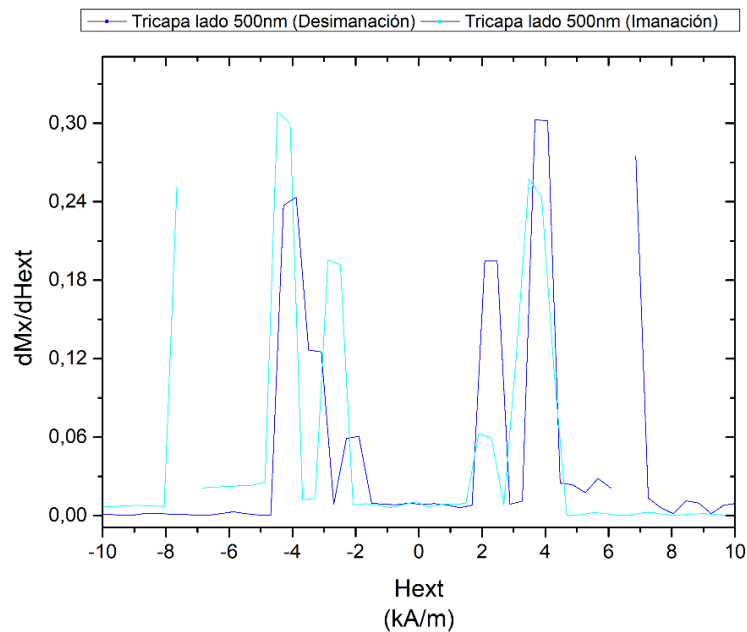


Figura 38. Comparación de los picos de la derivada de la tricapa de 500nm (Capa Co).

Tal y como se ha comentado anteriormente, en la *Figura 39*, se puede ver más en detalle una comparación en los picos de la derivada de ambos procesos para la tricapa de 500 nm. El primero y último de estos eventos en cada uno de los procesos a campos bajos se han producido en campos muy cercanos, pero el número de eventos en el que se produce la inversión es diferente.

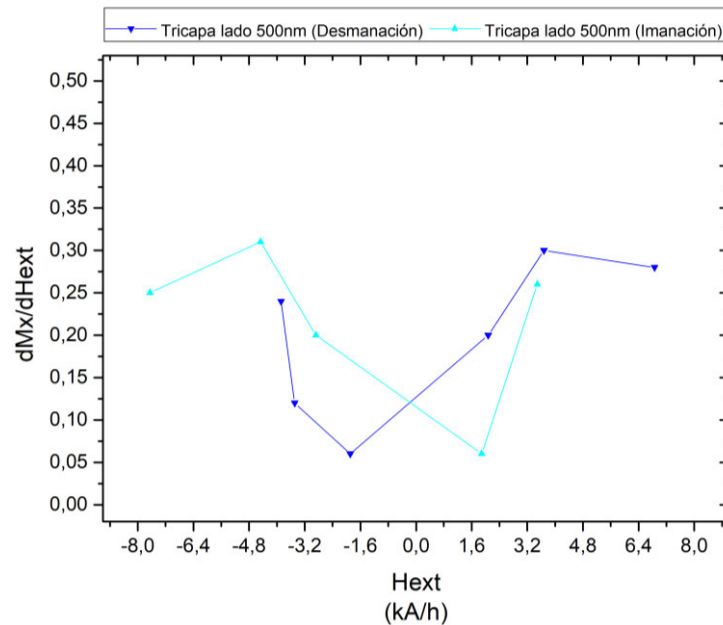


Figura 39. Comparación de los picos de la derivada en la tricapa de lado 500nm (Capa $Fe_{80}B_{20}$)

4.3.2. Comparación del proceso de desimanación de las tricapas

En la *Figura 40* y la *Figura 41* se muestran las curvas de desimanación y sus derivadas en la zona de campo aplicado correspondiente a la inversión de la capa de Co: ambas figuras muestran como la capa de Co de las tres tricapas se desimانا de un modo abrupto en campos muy similares: la diferencia entre el campo de inversión en la tricapa de 200 nm (el mayor observado) y el correspondiente a la tricapa de 500 nm (el menor observado) es de solo un 4% del valor del campo de inversión en la muestra de 200 nm.

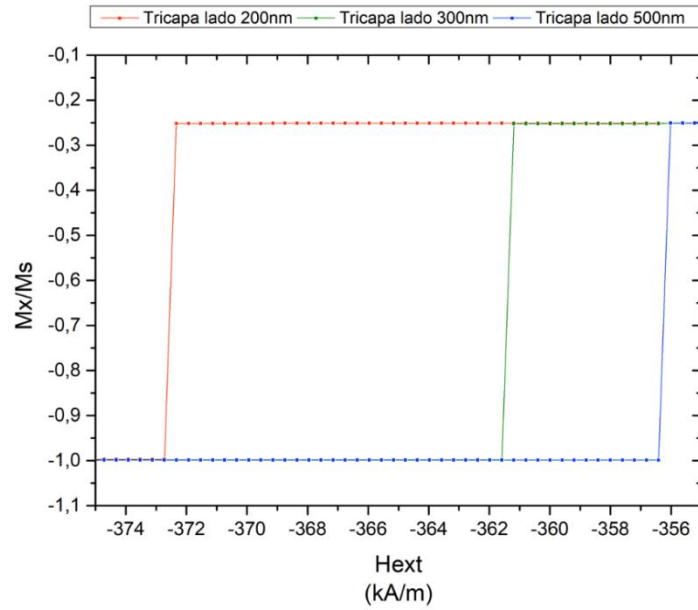


Figura 40. Comparación de la desimanación global de las tres tricapas (capa de Co)

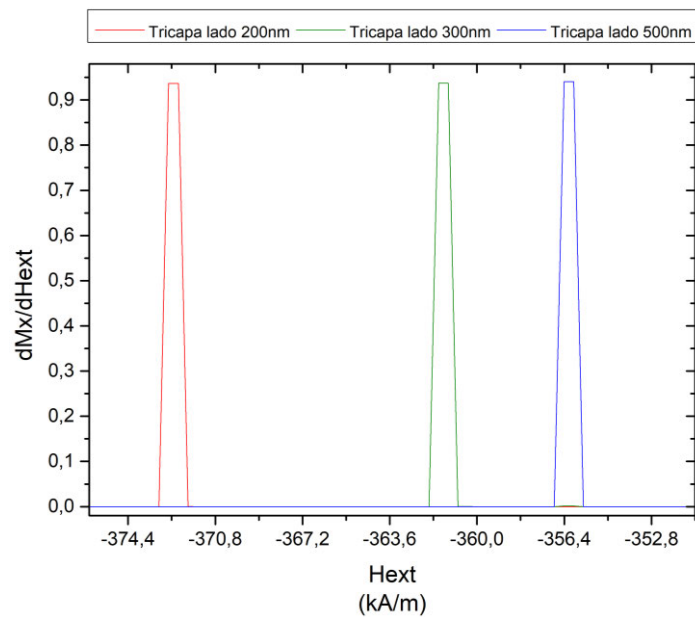


Figura 41. Comparación de los picos de la derivada de las tres tricapas (Capa Co)

La Figura 42 recoge los resultados para la desimanación de las tres tricapas en campos bajos, es decir, para la desimanación de la capa de FeB en las tres muestras.

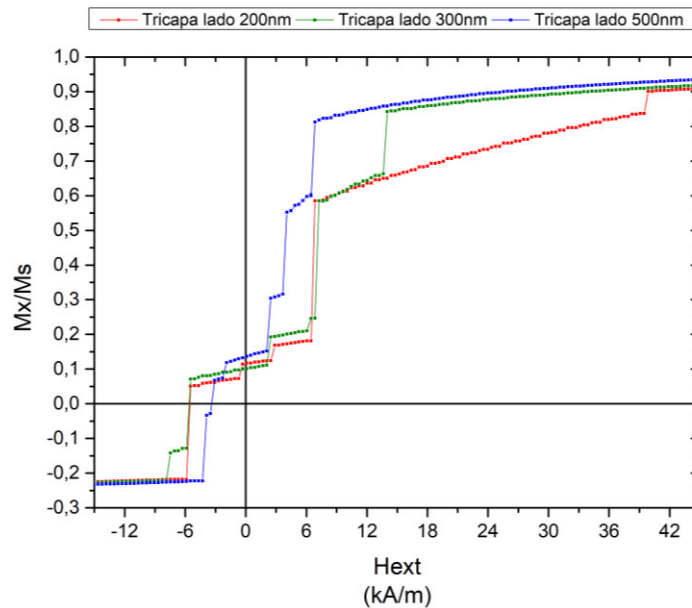


Figura 42. Comparación de la desimantación del $Fe_{80}B_{20}$ en las tres tricapas

La comparación de las curvas de desimantación muestra:

- Que el inicio de la desimantación irreversible ocurre a campos decrecientes desde el mayor, ca. 40 kA/m (aún imanador y obtenido en la simulación de la muestra de 200 nm), al menor, ca. -6 kA/m (obtenido en en la simulación de la muestra de 500 nm).
- Que de entre todas las configuraciones (vórtices) que median el proceso de inversión de imanación las más relevantes están presentes en las tres muestras y se alcanzan tanto por desimantación irreversible como por desimantación reversible. Considérese, por ejemplo, el estado de imanación que se alcanza tras el primer evento del proceso de desimantación en la tricapa de 500 nm: ese estado es el mismo que las muestras de 300 nm y 200 nm alcanzan para el mismo campo que la muestra de 500 nm en procesos que involucran desimantaciones reversibles e irreversibles.

Consistentemente con este resultado varios de los picos observados en la *Figura 42* ocurren en el mismo campo en las tres tricapas. En consecuencia, las estructuras que median la desimantación (los vórtices identificados a través de los gráficos codificados en colores que se han presentado en la *Figura 43* están relacionadas con esos picos son las mismas en las tres tricapas lo que claramente indica que han de ser cuasi-estables.

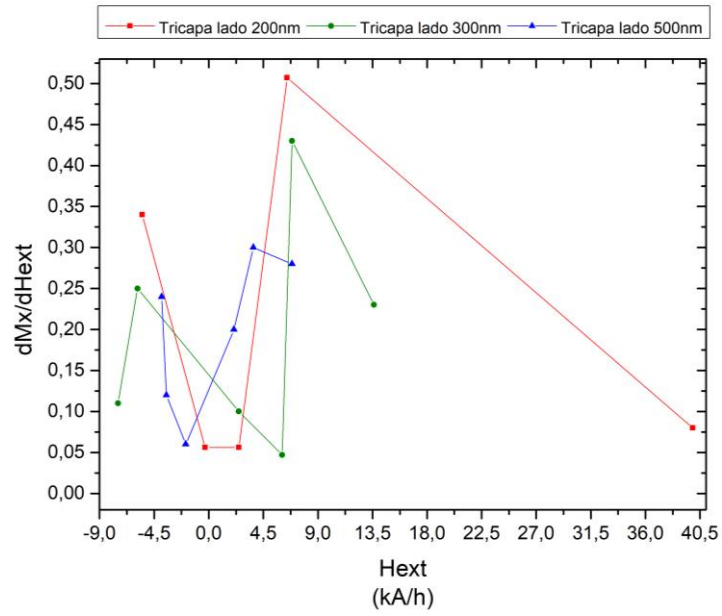


Figura 43. Comparación de los picos de la derivada de las tres tricapas (Capa $Fe_{80}B_{20}$)

5. Optimización de MRAMs basadas en Co y Fe₈₀B₂₀

De los resultados obtenidos tras las simulaciones del comportamiento de las tricapas y tras su análisis se sigue que:

- El inicio del campo de inversión en la tricapa de 200 nm tiene lugar a un campo (imanador) claramente superior al obtenido en las otras dos tricapas. Este valor de campo es excesivo para la operación práctica de una memoria MRAM por lo que es necesario reducirlo para optimizar su comportamiento. Una estrategia para ese propósito es la introducción en el proceso de conformación de morfologías locales que puedan llevar a campos inferiores el inicio de la desimanación (ver Trabajo Futuro).
- Incluso reduciendo en magnitud el campo para el que se inicia la desimanación en la tricapa de 200 nm y aunque las memorias MRAM CB – CD pueden apilarse (junto con las capas auxiliares de lectura y escritura) una dimensión lateral del elemento de memoria de 200 nm no es compatible con densidades de registro competitivas por lo que es necesario abordar el problema de llevar las tricapas a dimensiones, al menos, por debajo de varias decenas de nm (ver Trabajo Futuro).

6. Presupuesto

En el presente capítulo, se va a hacer un desglose de los costes que habría acarreado este proyecto para una empresa que decidiese realizar el trabajo de investigación llevado a cabo en este documento. Con la intención de hacer un presupuesto lo más próximo a la realidad se va a tratar de cubrir al máximo los gastos que ha derivado como costes humanos, materiales, energético y de infraestructuras básicas de comunicaciones. Por último, se aplicará el IVA a todos los totales de los subapartados anteriormente expuestos obteniendo el coste final.

6.1. Costes humanos

El total de horas contemplado es de 320 horas como se refleja en la guía de aprendizaje de la asignatura. Debido a que no ha sido un trabajo de autoaprendizaje, de forma totalmente individual, por parte del alumno, o ingeniero junior como se refleja en la tabla, se han incluido las figuras de director del proyecto y tutor del proyecto. Estas han sido cruciales desde el inicio del proyecto para asentar las bases como para poner el foco en los aspectos más importantes del mismo. En la siguiente tabla están contempladas estas tres figuras con las horas estimadas las cuales son multiplicadas por el coste asignado a cada una de ellas.

Tabla 1. Resumen de costes humanos

	Unidades (h)	Coste por unidad (€/h)	Total
Director del proyecto	20	100	2.000,00
Tutor del proyecto	40	80	3.200,00
Ingeniero junior	320	50	16.000,00
	Total		21.200,00 €

6.2. Costes materiales

Los costes estimados solo contemplan los materiales y herramientas necesarios para la realización del proyecto por parte del ingeniero junior. Se incluye el mobiliario, los equipos o dispositivos utilizados y los programas utilizados durante la realización del mismo. Con motivo de aproximarlos a la realidad se han incluido las columnas llamadas uso y amortización en la tabla resumen. Reflejan el uso que se ha hecho de los materiales

y una estimación de la duración de estos hasta su reemplazo respectivamente, puesto que estos materiales podrían ser utilizados para otros proyectos una vez finalizado este. Además, se contemplan los tres servidores del clúster utilizados para correr las simulaciones en Magpar. En la siguiente tabla se ha intentado recoger una estimación de todos los materiales utilizados.

Tabla 2. Resumen de costes materiales

	Precio	Uso (meses)	Amortización (Años)	Total
Mesa de escritorio	82,64	8	15	3,67 €
Silla de escritorio	123,97	8	10	8,26 €
Ordenador portátil	818,18	8	6	90,91 €
Monitor	86,77	8	8	7,23 €
Cable HDMI	4,12	8	10	0,27 €
Teclado y ratón	24,79	8	8	2,07 €
Microsoft Office 365	106,60	2	1	17,77 €
Licencia OriginPro	355,37	5	1	148,07 €
Clúster CSIC - Servidor 1	1.734,32	8	8	144,53 €
Clúster CSIC - Servidor 2	1.734,32	8	8	144,53 €
Clúster CSIC - Servidor 2	1.734,32	8	8	144,53 €
Total				711,84 €

6.3. Costes de suministros

Este apartado trata de cubrir los gastos derivados de los suministros de luz e internet en las dos ubicaciones donde se encuentran los equipos utilizados. En la siguiente tabla se reflejan los gastos energéticos de las instalaciones donde se encuentra ubicado el clúster de tres servidores sobre los que se han ejecutado las simulaciones.

Tabla 3. Resumen de costes energético en el clúster

	Consumo (W/h)	Tiempo (horas)	Cantidad	Coste (€/kWh)	Total
Consumo servidores	200	5760	2	0,0639	147,23
Consumo router	5	5760	1	0,0639	1,84
Total					147,23 €

El coste derivado por el gasto de energía por parte del trabajador o ingeniero junior es reducido como se puede ver en la siguiente tabla, pero se incluirá en el total,

puesto que, el trabajo se ha desarrollado prácticamente en su totalidad de forma telemática y actualmente las empresas están incluyendo estos gastos en las nóminas de sus trabajadores.

Tabla 4. Resumen en costes energéticos del trabajador

	Consumo (W/h)	Tiempo (horas)	Cantidad	Coste (€/kWh)	Total
Consumo ordenador portátil	90	320	1	0,0639	1,84
Consumo pantalla	60	320	1	0,0639	1,23
Consumo router	5	5760	1	0,0639	1,84
				Total	4,91 €

Entre los costes de suministros se ha incluido el coste derivado por el gasto mensual de mantenimiento de internet por parte de un ISP. La siguiente tabla refleja una tarifa económica tanto para la ubicación donde se encuentran los servidores como para el trabajador que es multiplicado por el tiempo durante el cuál ha sido desarrollado el proyecto.

Tabla 5. Coste de la conexión a internet

	Coste mensual (€)	Meses	Total
Servidores	20,66	8	165,29
Trabajador	20,66	8	165,29
		Total	330,58 €

6.4. Coste final del proyecto

En el desarrollo de los anteriores subpartados se ha fijado una duración de 8 meses excepto en el coste humano. Sin embargo, se podría haber realizado en un tiempo menor, no obstante, se ha respetado puesto que debido a diversos imprevistos es el tiempo que ha llevado la ejecución del mismo. Debido a esto, no se incluye un sobrecoste de un tanto por ciento por imprevistos, ya que ha sido añadido en el incremento del tiempo de realización que ha sufrido este proyecto.

Los precios incluidos en todos y cada uno de los costes contemplados anteriormente no tienen aplicados los impuestos. Por lo tanto, en la siguiente tabla se

hace la suma de todos los conceptos anteriormente expuestos aplicando el 21% de IVA para obtener el presupuesto del proyecto.

Tabla 6. Coste final con IVA incluido

Coste humano		21.200,00 €
Material		711,84 €
Consumo eléctrico		152,13 €
Internet		330,58 €
	IVA	21%
	Total	27.097,40 €

7. Impacto del Proyecto

Con motivo de dar una visión del impacto ético, social y medioambiental sobre la tecnología planteada en este proyecto. Se van tratar cada uno de estos puntos de forma individual finalizando con una visión general sobre este apartado.

En el **aspecto ético** cabe destacar que el material utilizado en una de las capas de las tricapas planteadas es el cobalto. El principal país productor de este elemento es la República Democrática del Congo. Además, cuenta con aproximadamente un sesenta por ciento de las reservas mundiales de este metal. En las explotaciones de este tipo, al estar poco reguladas, podrían estar trabajando en malas condiciones mínimas de seguridad viéndose expuestos los trabajadores a los peligros. Por otra parte, si no existe ningún tipo de control sobre estas podrían encontrarse menores de edad trabajando en este tipo de explotaciones en los países subdesarrollados.

En el **aspecto social**, este tipo de memorias podrían llegar a ser utilizadas para diferentes aplicaciones. Cuenta con velocidades de acceso superiores a las DRAM y similares a las SRAM. A diferencia de las DRAM y SRAM son memorias no volátiles, es decir, una vez se desconecta de la alimentación podrían mantener almacenados los datos como las memorias Flash presentando estas una mayor degradación en el tiempo en comparación con las memorias MRAM.

Los posibles **impactos ambientales**, tanto negativos como positivos, que podrían derivar de implementación de la tecnología MRAM se van a dividir en tres aspectos que tendrán en cuenta los métodos de extracción de este mineral, el consumo energético y el ciclo de vida.

La tricapa propuesta en este proyecto contiene una capa de cobalto. La **extracción del cobalto**, utilizado para infinidad de aplicaciones, se realiza mediante la minería [17], pudiendo ser subterránea como a cielo abierto. La regulación en los procesos de extracción de la materia prima varía según el país de origen, puesto que, cada uno cuenta con distintas leyes de protección del medio ambiente y los recursos naturales. En los países en los que estas leyes sean laxas y prevalezcan los intereses económicos por encima de la protección del medio ambiente puede desencadenar en la contaminación del agua superficial (ríos) como las aguas

subterráneas durante el procesado de los minerales. Además, si su extracción se hace de forma descontrolada puede suponer la desaparición de hábitats de diferentes seres vivos.

El **consumo energético** de las MRAM en comparación con las memorias DRAM y SDRAM es menor al no necesitar una alimentación continua para mantener la información almacenada. Esto sumado a unas altas velocidad de lectura y escritura con una correcta gestión del suministro eléctrico puede ser más eficiente que otras tecnologías.

El **ciclo de vida** de este tipo de memorias puede ser más largo que el correspondiente a otras puesto que no presenta una degradación en el tiempo de su tricapa como si pasa con las memorias Flash.

Este proyecto se centra en la investigación de las MRAM como una alternativa más a los tipos de memorias existentes en la actualidad, por ello en este proyecto de fin de grado no se plantea como una solución universal o definitiva. Sin embargo, son un tipo de memorias que pueden ser propuestas para ciertos usos que en comparación con las que implementan otras tecnologías resulten ventajosas en cuanto a capacidades tecnológicas pudiendo coexistir con ellas.

8. Conclusiones

Una vez analizados los resultados obtenidos de cada una de las simulaciones de las tricapas se puede concluir que:

- El diseño básico de la tricapa CB – CD cuyo comportamiento hemos simulado es, para las dimensiones que hemos considerado, correcto en el sentido de que se consigue tanto la protección de los símbolos frente a la inversión de la capa dura como la conmutación del estado lógico con campos y consumos moderados.
- La reducción de tamaño desde los 500 nm a los 200 nm de dimensión lateral no perjudica el comportamiento histerético de las tricapas con la única excepción del inicio del proceso de desimanación de la capa de FeB en campos positivos en la tricapa de 200 nm de lado que tiene lugar en campos un factor 5 mayores que los correspondientes a ese inicio en las otras tricapas. Este resultado parece inevitable con morfologías cuadradas en el sentido de que los campos desimanadores (internos, ligados a la distribución de imanación) son más elevados en aristas, diedros y triedros y esas zonas constituyen un porcentaje mayor del volumen cuando se reduce la dimensión del elemento nanométrico.

9. Líneas futuras de trabajo

Dos puntos se identifican con claridad para proseguir este trabajo. Ambos están en conexión con la segunda de nuestras conclusiones:

- En primer lugar, y desde el punto de vista de la morfología de las tricapas CB – CD, sería interesante evaluar el efecto de la reducción de los radios de curvatura locales asociados a triedros (“redondeando” esas regiones). Se trata de un objetivo plenamente accesible desde el punto de vista simulacional y que puede proporcionar información de interés a estudios centrados en la nanofabricación de las tricapas. El “redondeo” de los triedros en escalas nanométricas es también accesible a las litografías de electrones (EBL) e iones (FIB).
- Una segunda vía hacia la reducción de dimensiones de las tricapas CB-CD sin merma de su funcionalidad lo constituye el estudio de su comportamiento para dimensiones laterales inferiores a la longitud de canje (ancho de una pared o estructura de transición entre zonas de imanación uniforme). La tendencia en este caso es a sustituir estructuras del tipo observado en este estudio (vórtices) por otras de imanación uniforme que como tales no tienen por qué ser perjudiciales para la funcionalidad básica pero que pueden estar asociadas a campos de inversión más elevados. El correspondiente simulacional requerirá de discretizaciones más finas de las tricapas lo que a su vez puede suponer la necesidad de usar mayores recursos computacionales. El programa Magpar sería especialmente adecuado para estas nuevas simulaciones por el hecho de poder reproducir sin artefactos morfológicos elementos de dimensiones inferiores a la 100 nm.

10. Referencias

- [1] Åkerman, Johan. "Toward a Universal Memory". s.l. : Science, 2005. págs. 508 – 510. Vol. 308. 5721.
- [2] WhatIs.com, Definition from. "What is DRAM (dynamic random access memory)?". [En línea] <http://searchstorage.techtarget.com/definition/DRAM>.
- [3] U. Urdiróz, A. Gómez, M. Magaz, D. Granados, M. Sánchez Agudo, J.Rubio-Zuazo, G.R.Castro, C.Stan, N.Tamura, H.A.Padmore, C.Müller, J.McCord, F.Cebollada, F.J.Palomares, J.M.González. "Antiphase resonance at x-ray irradiated microregions in amorphous Fe₈₀B₂₀ stripes". s.l. : Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2021. Vol. 520.
- [4] W. Scholz, J. Fidler, T. Schrefl, D. Suess, R. Dittrich, H. Forster, V. Tsiantos. "Scalable Parallel Micromagnetic Solvers for Magnetic Nanostructures". s.l. : Comp. Mat. Sci, 2003. págs. 366-383. Vol. 28.
- [5] Coey., J.M.D. "Magnetism and magnetic materials". s.l. : Cambridge Eds., 2010.
- [6] Kobayashi, Satoru & Takahashi, Seiki & Kamada, Y. & Kikuchi, H. "A Low-Field Scaling Rule of Minor Hysteresis Loops in Plastically Deformed Steels. Magnetics". s.l. : IEEE Transactions, 2009. pág. 2.
- [7] Ramirez, A. P. "Colossal magnetoresistance". s.l. : Journal of Physics Condensed Matter, 1997. págs. 8171-8199. Vol. 9.
- [8] Baibich, M. N. "Giant magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices". s.l. : Physical Review Letters, 1988. págs. 2472–2475. Vol. 61. 21.
- [9] Binasch, G., Grünberg, P., Saurenbach, F. & Zinn, W. "Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange". 7. s.l. : Phys. Rev. Condensed Matter, 1989. págs. 4828–4830. Vol. 39.
- [10] Tang, Pai and D. D. "Magnetic Memory Technology : Spin-Transfer-Torque MRAM and Beyond". s.l. : 1, 2020.
- [11] U. Urdiróz, B. M. S. Teixeira, F. J. Palomares, J. M. Gonzalez, N. A. Sobolev, F. Cebollada, A. Mayoral. "Dynamic magnetic properties of amorphous Fe₈₀B₂₀ thin films and their relation to interfaces". s.l. : AIP Advances, 2020. Vol. 10. 015013.
- [12] Helmut Kronmüller y Stuart S. P. Parkin, John Wiley & Sons, Hoboken. "Handbook of magnetism and advanced magnetic materials". s.l. : Editors-in-Chief, 2007.
- [13] Schrefl, Josef Fidler and Thomas. "Micromagnetic modelling - the current state of the art". s.l. : J. Phys. D: Appl. Phys, 2000. Vol. 33.
- [14] "MagparWiki". [En línea] [Citado el: 01 de 10 de 2022.] <http://www.magpar.net/>.

- [15] A. Gómez, F. cebollada, F. J. Palomares, N. Sánchez, E. M. González, J. M. González, J. L. Vicent. "App. Phys. Lett.". 2014. Vol. 104.
- [16] "GMSH". [En línea] [Citado el: 01 de 10 de 2022.] <https://gmsh.info/>. 2579.
- [17] LIVINGSTONE, E. "La fallida lucha de República Democrática del Congo contra la minería ilegal de cobalto". 1. s.l. : AFP International Text Wire, 2022.