

UNIVERSIDAD DE SALAMANCA  
DEPARTAMENTO DE FISICA APLICADA



**VNiVERSiDAD  
D SALAMANCA**

CAMPUS OF INTERNATIONAL EXCELLENCE

TESIS DOCTORAL

**Análisis micromagnético del movimiento  
de paredes de dominio magnético:  
efectos térmicos y torques de espín.**

**Candidato**  
Simone Moretti

**Director**  
Dr. Eduardo Martínez

25 de octubre de 2017

Este documento recoge la traducción al Español del **índice**, el **resumen**, la **introducción** y **las conclusiones** principales del trabajo de tesis doctoral de Simone Moretti. El trabajo original está escrito en inglés. En la versión original se describen los resultados con más detalles y se pueden encontrar todos los capítulos.

D. Simone Moretti

D. Eduardo Martínez Vecino  
Profesor Titular de Universidad

# Resumen

Las paredes de dominio magnético (o paredes magnéticas) representan las fronteras entre dos dominios magnéticos en los que la magnetización está alineada en direcciones distintas. En tiras ferromagnéticas, dichas paredes pueden ser desplazadas por medio de corrientes eléctricas gracias al mecanismo de transferencia de par de espín *spin transfer torque*. Este efecto inspiró la propuesta de varias aplicaciones para dispositivos lógicos o de memorias magnéticas basadas en el movimiento de paredes magnéticas. Estas aplicaciones representan una alternativa a los dispositivos basados en la arquitectura CMOS, que, por otro lado, están alcanzando su límite en términos de dimensiones. Al mismo tiempo, la consecución de dispositivos que requieren poca energía, basados en paredes magnéticas, puede tener un impacto importante sobre el consumo energético del sector ICT (Information and Communication Technology), y de consecuencia, sobre las emisiones de CO<sub>2</sub> y el cambio climático.

Aparte de su relevancia tecnológica, el movimiento de paredes magnéticas es interesante también desde un punto de vista fundamental. De hecho, las paredes magnéticas pueden ser desplazadas por varios medios, como por ejemplo, mediante la inyección de corrientes eléctricas, gradientes térmicos, ondas de espín etc. Además, recientes progresos en la fabricación de nanomateriales ha abierto la puerta para la realización de películas ultradelgadas caracterizadas con grosor de unos pocos nanómetros. En estas películas, las interacciones interfaciales con los materiales vecinos pueden dar lugar a nuevos efectos como, por ejemplo, la anisotropía perpendicular magnética o la interacción de Dzyaloshinskii-Moriya. Igualmente, la presencia en estos sistemas de configuraciones magnéticas topológicamente protegidas, como Skyrmiones o paredes de dominios quirales, hace que sean un sistema interesante para estudiar estos nuevos estados de la materia.

En esta tesis, se analizan, por medios de simulaciones micromagnéticas, dos aspectos relativos al movimiento de paredes magnéticas en tiras ferromagnéticas. En la primera parte se analiza la influencia sobre la dinámica de paredes magnéticas del calentamiento por efecto Joule y de los gradientes térmicos. De hecho, es bien conocido que, aparte del *spin transfer torque*, una corriente eléctrica también produce un calentamiento del material ferromagnético debido al efecto Joule. Por tanto, es importante analizar el efecto del calentamiento para establecer el alcance real de la contribución del *spin transfer torque*. Por otro lado, el calentamiento y los gradientes térmicos pueden ser usados también para mover las paredes, aunque la teoría sobre estos efectos está todavía en desarrollo. Los resultados de esta parte se han obtenido por medio de un código micromagnético

original (desarrollado por el autor) que puede resolver de forma acoplada la dinámica de la magnetización junto con el transporte térmico en todo el sistema.

En la segunda parte de la tesis, se analiza la dinámica de paredes magnéticas en películas ultradelgadas con anisotropía perpendicular y con la interacción de Dzyaloshinskii-Moriya. Esta parte incluye una colaboración con el grupo experimental Física de la materia condensada de la [Universidad de Leeds](#) y está dedicada a reproducir sus resultados experimentales sobre la dinámica de paredes excitada por campos magnéticos o corrientes eléctricas. En particular, se analizará el papel que tiene el desorden en estos sistemas. De echo, el desorden representa un problema fundamental para la realización de dispositivos basados en paredes magnéticas. Por último, también se analiza la dependencia del campo de depinning (el campo necesario para mover una pared magnética anclada por el desorden) con el parámetro de disipación (un parámetro fenomenológico que cuantifica la disipación de energía magnética del sistema). Las principales conclusiones y contribuciones del trabajo están resumidas en la Parte [IV](#).

# Índice general

<b>Resumen</b>	<b>3</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>4</b>
<b>Lista de Tablas</b>	<b>4</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>4</b>
<b>Lista de Acrónimos</b>	<b>4</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>8</b>
1.1. Magnetismo . . . . .	8
1.2. Espintrónica . . . . .	9
1.3. Paredes magnéticas . . . . .	9
1.4. Sobre esta tesis . . . . .	10
<b>I Fundamentos Teóricos</b>	<b>13</b>
<b>2. Introducción al magnetismo</b>	<b>12</b>
2.1. Materiales magnéticos . . . . .	12
2.2. Momentos magnéticos . . . . .	12
2.3. Interacciones magnéticas . . . . .	12
2.4. Dominios magnéticos . . . . .	12
<b>3. Teoría Micromagnética</b>	<b>13</b>
3.1. Aproximacion continua . . . . .	13
3.2. Energías micromagnéticas . . . . .	13
3.3. Minimización de la energía . . . . .	13
3.4. Equacion de Landau-Lifshitz-Gilbert . . . . .	13
3.5. Spin transfer torque . . . . .	13
3.6. Películas ultradelgadas y efectos interfaciales . . . . .	13
3.7. Dinámica estocastica de la magnetizacion . . . . .	13
3.8. La equacion de Landau-Lifshitz-Bloch . . . . .	13
3.9. Paredes de dominio magnético . . . . .	13

<b>4. Aspectos Numericos</b>	<b>14</b>
4.1. Código micromagnético . . . . .	14
4.2. Verificación del código . . . . .	14
4.3. Dinámica del calor . . . . .	14
<b>II Influencia del calentamiento Joule y de los gradientes térmicos sobre la dinámica de paredes de dominio</b>	<b>15</b>
<b>5. Introducción</b>	<b>16</b>
<b>6. Dinámica de paredes magnéticas en tiras curvas: la influencia del calentamiento Joule</b>	<b>17</b>
6.1. Introducción . . . . .	17
6.2. Resultados . . . . .	17
6.3. Conclusiones . . . . .	17
<b>7. Influencia del efecto Joule sobre el depinning de paredes magnéticas</b>	<b>18</b>
7.1. Introducción . . . . .	18
7.2. Resultados . . . . .	18
7.3. Conclusiones . . . . .	18
<b>8. Movimiento de paredes magnéticas por gradientes térmicos localizados</b>	<b>19</b>
8.1. Introducción . . . . .	19
8.2. Métodos . . . . .	19
8.3. Resultados . . . . .	19
8.4. Conclusiones . . . . .	19
<b>9. Conclusiones y perspectivas futuras</b>	<b>20</b>
<b>III Modelización de la dinámica de paredes en películas ultradelgadas</b>	<b>21</b>
<b>10. Introducción</b>	<b>22</b>
<b>11. Modelización del movimiento de paredes magnéticas en Pt/Co/Pt<sub>x</sub>Au<sub>1-x</sub></b>	<b>23</b>
11.1. Introducción . . . . .	23
11.2. Métodos . . . . .	23
11.3. Resultados . . . . .	23
11.4. Conclusiones . . . . .	23
<b>12. Depinning dinámico de paredes magnéticas quirales</b>	<b>24</b>
12.1. Introducción . . . . .	24
12.2. Simulaciones micromagnéticas . . . . .	24

12.3. Resultados . . . . .	24
12.4. Conclusiones . . . . .	24
<b>13. Conclusiones y perspectivas futuras</b>	<b>25</b>
<b>IV Conclusiones</b>	<b>26</b>
<b>Conclusiones Finales</b>	<b>27</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>30</b>
<b>Lista de Publicaciones</b>	<b>30</b>
<b>V Appendices</b>	<b>31</b>
<b>14. Termodinámica de sistemas magnéticos</b>	<b>32</b>
14.1. Recuerdos de Mecanica Estadistica . . . . .	32
14.2. Teorema de reciprocidad . . . . .	32
14.3. Procesos estocásticos . . . . .	32
<b>15. Ecuacion de Landau-Lifshitz-Bloch</b>	<b>33</b>
<b>16. Modelo 1D ampliado</b>	<b>34</b>
16.1. Metodo Lagrangiano . . . . .	34
16.2. Integrales utiles . . . . .	34
<b>17. Ejemplos del código</b>	<b>35</b>
<b>18. Paredes Burbujas vs Paredes Líneas</b>	<b>36</b>
<b>19. Torque maximo y estado de equilibrio</b>	<b>37</b>

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Magnetismo

El Electromagnetismo es una de las interacciones fundamentales de la naturaleza y se ocupa de la interacción entre cargas eléctricas y momentos magnéticos. Conocido desde los tiempos antiguos, ha cambiado profundamente nuestro mundo por lo menos tres veces, tal y como ha apuntado recientemente el Prof. Michael Coey en la última conferencia internacional de magnetismo en Dublin (INTERMAG): la primera vez con la invención de la brújula que permitió la exploración del mundo. La segunda vez con las ecuaciones de Maxwell y la *electrificación* del mundo y todas las invenciones relacionadas como por ejemplo, la luz eléctrica, los ordenadores, los móviles etc. La tercera vez ha coincidido con la invención de los discos duros [*hard disk drive*] que permiten el almacenamiento masivo de información digital y ehan iniciado la revolución digital. Aparte de su relevancia tecnológica, el magnetismo ha fascinado científicos desde sus orígenes con una serie de fenómenos que requerían una explicación, la cual, muchas veces, se acompañó de avances significativos también en el campo de la física fundamental. La sola existencia de los materiales magnéticos, por ejemplo, se puede explicar sólo por medio de la mecánica cuántica y del momento magnético de espín, que fue introducido en el contexto de la física nuclear y luego justificado teóricamente en la ecuación de Dirac. El mecanismo de la rotura espontánea de simetría, utilizado para explicar el ferromagnetismo, inspiró a Peter Higgs para el desarrollo de su teoría para el bosón de Higgs, por la cual ganó el premio Nobel por la Física en 2013. Las configuraciones magnéticas protegidas topológicamente, como Skyrmiones o paredes magnéticas quirales, representan sistemas prometedores para el estudio de estos estados topológicos de la materia condensada, cuyo descubrimiento se adjudicó el premio Nobel por la Física en 2016. Además, los condensados de Bose-Einstein de magnones (las excitaciones fundamentales de un estado ferromagnético) fueron observadas experimentalmente y representan también un sistema prometedor para el estudio de este particular estado de la materia. En síntesis, el magnetismo es un puente entre investigación fundamental y la aplicada, donde la investigación con fines tecnológicos puede llevar a descubrimientos en campo fundamental y [*vice-versa*]. Un campo de investigación importante, dentro del área de magnetismo, es el campo de la espintrónica, que es el tema de esta tesis.

## 1.2. Espintrónica

La Espintrónica se ocupa del estudio del transporte de espín en distintas nanoestructuras. Es un ámbito que amplía el concepto de la electrónica, dedicada en exclusiva al estudio del transporte de carga eléctrica. La relevancia de este nuevo campo de investigación fue reconocido en 2007, cuando Albert Fert y Peter Grunberg ganaron el premio Nobel por la Física por el descubrimiento de la magneto-resistencia gigante. Este fenómeno ha tenido un enorme impacto en nuestra tecnología, porque es la base del funcionamiento de algunos dispositivos de almacenamiento de información como los discos duros (*hard disk drive*). Fert y Grunberg descubrieron separadamente que si una corriente eléctrica pasa a través de una multicapa compuesta de dos capas magnéticas separadas por una delgada capa no magnética, la resistencia de la multicapa depende fuertemente de la orientación magnética relativa entre las dos capas magnéticas. En particular, si la magnetización de las dos capas es paralela la pila presenta baja resistencia, mientras que si las capas presentan un magnetización anti-paralela, el sistema presenta una resistencia más alta. Es decir, descubrieron que la magnetización pueden afectar a la corriente eléctrica. Este efecto llevó a la realización de los discos duros de almacenamiento, donde los bits 0 o 1 corresponden a alta o baja corriente, respectivamente. Sin embargo, ulteriores investigaciones indicaron que también puede ocurrir el efecto recíproco: debido a la misma interacción, las corrientes eléctricas pueden afectar al estado magnético del sistema. Este último efecto, denominado transferencia de par de espín (*spin transfer torque*, STT), ha inspirado nuevas ideas para dispositivos tecnológicos, que incluyen, por ejemplo, las memorias STT-MRAM (recientemente comercializado como alternativa a las memorias RAM convencionales basada en CMOS), la memoria *racetrack* u otros dispositivos lógicos también basados en paredes magnéticas. En las STT-MRAM, el STT se usa para modificar el estado magnético, mientras que en las memorias denominadas *Racetrack* y en los dispositivos lógicos, la transferencia de par de espín es el origen del desplazamiento y manipulación de paredes de dominio magnético.

## 1.3. Paredes magnéticas

Las paredes de dominio magnéticas representan las fronteras entre dos dominios magnéticos magnetizados en direcciones (o sentidos) diferentes. Estas paredes pueden ser desplazadas de forma eficiente mediante corrientes eléctricas, y presentan un enorme potencial para el diseño de una nueva clase de dispositivos lógicos y de grabación magnética. Por ejemplo, en las memorias de tipo *Racetrack*, la información está codificada en la magnetización de los dominios. El STT mueve las paredes hacia una unidad de lectura o de escritura que puede leer o escribir la configuración magnética. En una sola tira ferromagnética se pueden generar un gran número de paredes que pueden ser desplazadas de forma coherente bajo la acción de corrientes eléctricas. Debido a las dimensiones reducidas de las paredes y a sus altas velocidades en las tiras, estas memorias son prometedoras para el diseño de memorias magnéticas de alta densidad y velocidad. Sin embargo, estos dispositivos presentan también algunos problemas que deben

ser solucionados antes de que puedan ser fabricados de forma masiva. Algunos de estos problemas son el control fiable de la posición de las paredes y/o la reducción de las intensidades de las corrientes necesarias para alcanzar velocidades considerables.

No obstante, esta clase de memorias magnéticas constituye un candidato para sustituir la memorias basadas en CMOS, que están alcanzando su límite de escalabilidad. Además, la investigación actual se centra en mover las paredes con la mínima intensidad de corriente eléctrica posible. Dispositivos lógicos o memorias de baja energía, basados en paredes, podrían reducir el consumo de energía del sector ICT, con consecuencias importantes en las emisiones de carbono y, por tanto, sobre el cambio climático.

Aparte de su importancia tecnológica el movimiento de paredes también tiene un interés desde un punto de vista fundamental. De echo, las paredes pueden ser desplazadas de diversas formas: mediante campo magnéticos, corrientes eléctricas, campos eléctricos, gradientes termicos, ondas de espín, etc). Además, los recientes avances en el campo de la nanofabricación han abierto la posibilidad de crear películas magnéticas ultrafinas con un espesor de unos pocos angstroms. En estas películas las interacciones interfaciales con las capas vecinas no-magnéticas juegan un papel relevante, y pueden dar lugar a nuevos efectos interesantes [1]. Con estos sistemas empezó el desarrollo del interesante campo del magnetismo interfacial [1].

## 1.4. Sobre esta tesis

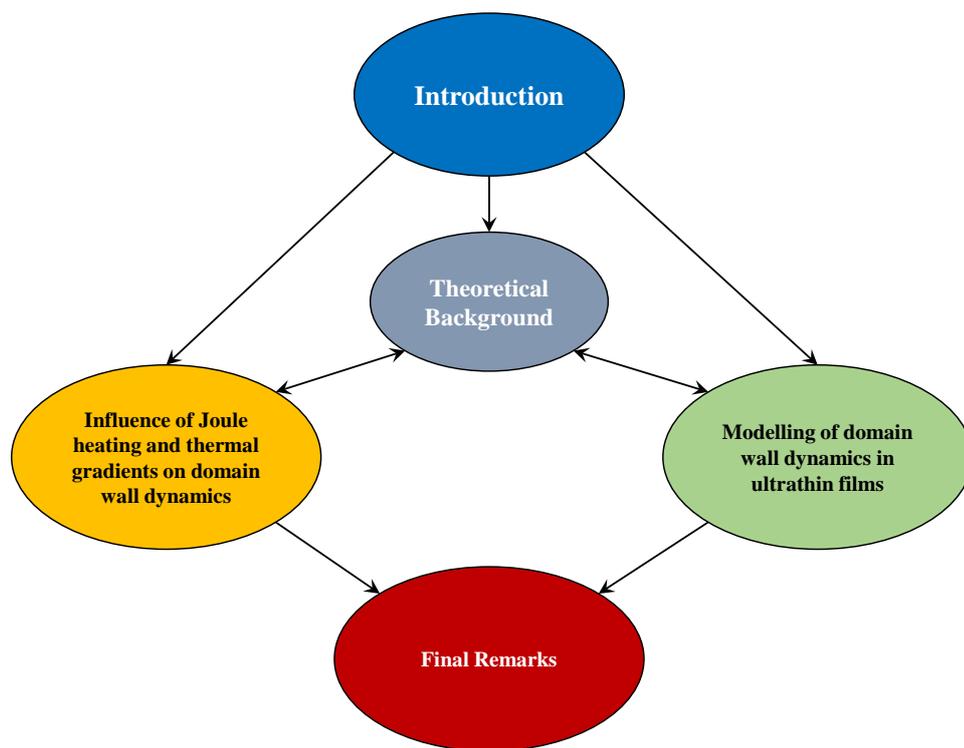
En esta tesis se estudian micromagnéticamente dos aspectos asociados al movimiento de paredes en tiras ferromagnéticas.

En la parte II se analiza la influencia de calentamiento por efecto Joule y de gradientes térmicos sobre la dinámica de las paredes en sistemas magnetizado *in-plane*. De hecho, es bien sabido que cuando una corriente eléctrica pasa a través de un material ferromagnético y conductor, aparte del STT, también genera un calentamiento como consecuencia del efecto Joule. Así, por un lado, es importante comprender el efecto del calentamiento con el fin de evaluar correctamente la contribución real del STT, mientras que, por otro lado, es interesante investigar si los efectos de calentamiento puede ser utilizados para el control eficiente de las paredes. Este último campo, generalmente llamado *spin-caloritronics*, está recibiendo gran interés debido a su potencial para el diseño de dispositivos con muy baja disipación (debido al hecho que no está involucrado el movimiento de electrones) o como candidato para el reciclaje de calor. *Spin-caloritronics* apunta más generalmente al estudio de la interacción entre el espín, las cargas eléctricas y el calor. El movimiento de paredes mediante gradientes térmicos representa un aspecto específico dentro de este amplio campo. En esta parte se desarrolla también un código micromagnético original para acoplar las dinámicas térmica y magnética de forma consistente. Este código se ha utilizado para analizar la influencia del calentamiento Joule en la dinámica de paredes excitada por corrientes electricas [2, 3] (Capítulo 6 y 7) y para investigar los efectos de gradientes térmicos localizados sobre las paredes [4] (Capítulo 8). Una introducción más detallada puede encontrarse al principio de la parte II (Capítulo 5).

En la parte [III](#) se analiza la dinámica de paredes magnéticas en películas ultrafinas por medio del código micromagnético MuMax [\[5\]](#). La modelización del movimiento de paredes en tiras ultradelgadas plantea nuevas cuestiones con respecto a los sistemas con magnetización en el plano (*in-plane*) estudiados en la parte anterior. En particular, el papel del desorden sigue siendo aún objeto de debate y su inclusión en el modelo micromagnético constituye a día de hoy un desafío abierto. Esta parte incluye una colaboración con un grupo experimental del grupo de Física de la materia condensada de la [Universidad de Leeds](#) y está centrado en la reproducción de sus resultados experimentales sobre la dinámica de las paredes. En el capítulo 11 se analiza la dinámica de paredes excitadas por campos magnéticos y corrientes eléctricas en Pt/Co/Pt<sub>x</sub>Au<sub>1-x</sub>, donde  $x$  el porcentaje de Pt en la aleación de la capa superior ( $x$ ) varía entre 0 y 1. En este capítulo, el énfasis se ha puesto en mostrar el papel que tiene el desorden en estas dinámicas. Por último, en el capítulo 12 se analiza la dependencia de del campo de depinning con el parámetro de disipación magnética en películas ultrafinas [\[6\]](#). También en este caso, una introducción más detallada puede encontrarse al principio de la parte [III](#) (Capítulo 10).

Adicionalmente, la parte [I](#) presenta los fundamentos teóricos del formalismo micromagnético. En el capítulo 2 se describen los conceptos básicos del magnetismo y en el capítulo 3 se presentan los principales aspectos de la teoría micromagnética. El capítulo 4 está dedicado a presentar unas breves pinceladas sobre la implementación numérica del código paralelo que se ha desarrollado. Puede ser omitido por un lector familiarizado con el micromagnetismo y/o consultado cuando sea necesario.

Los resultados que se presentan en esta tesis han sido adaptados de algunos de los artículos científicos publicados por el autor. Por esta razón, cada parte y cada capítulo son coherentes en sí mismos y pueden leerse por separado. Por la misma razón, muchos conceptos aparecen repetidos en la introducción y al describir los métodos de simulación. Un esquema de la estructura de la tesis se muestra en la [Fig. 1.1](#). Esta tesis fue realizada gracias al apoyo económico proporcionado por la red Marie Curie de Formación Inicial "WALL", financiada por la Comisión Europea con el programa FP7.



**Figura 1.1:** Estructura de la tesis.

# Conclusiones Finales

En resumen, en esta tesis se han estudiado dos aspectos relacionados con el movimiento de paredes magnéticas en estructuras ferromagnéticas.

En la primera parte se ha analizado el efecto del calentamiento (debido al efecto Joule) y de gradientes térmicos sobre la dinámicas de paredes magnéticas en sistemas con magnetización en el plano (*in-plane systems*). Nuestro análisis se ha efectuado por medio de un código micromagnético original que permite estudiar de forma acoplada la dinámica térmica y magnética. Se ha mostrado que la presencia de geometrías curvas o estrechamientos puede dar lugar a gradientes térmicos a lo largo de la tira ferromagnética. Estos gradientes pueden tener efectos significativos sobre la dinámica de paredes magnéticas. Por ejemplo, al inyectar corrientes de alta intensidad, se puede observar una destrucción local del orden ferromagnético que puede favorecer el proceso de desanclaje (*depinning*) de las paredes magnéticas inicialmente fijadas en estrechamientos (*notches*). En el Capítulo 8 se han estudiado los mecanismos responsables del movimiento de paredes en presencia de gradientes térmicos. Nuestros resultados indican que en presencia de gradientes térmicos, las paredes son desplazadas hacia la parte más caliente de la tira ferromagnética. Este efecto es debido al papel dominante del *entropic torque* (relacionado con la minimización de la energía de la pared) con respecto al magnonic spin transfer torque (asociado a la interacción de la pared con las ondas de spin excitadas térmicamente), que, por su parte, empujaría la pared hacia la parte más fría de la tira debido a la prevalencia de ondas de espín de baja frecuencia que son reflejadas por la pared. Además se ha identificado y descrito una tercera fuerza debida a un campo dipolar generado térmicamente en la tira. En esta línea de investigación aún existen varias cuestiones abiertas y por tanto, serán necesarias futuras investigaciones al respecto. Por ejemplo, el estudio y la descripción completa de la interacción entre ondas de espín y paredes magnéticas, todavía no está ún bien entendido. Además, el movimiento de paredes magnéticas por medio de gradientes térmicos podría extenderse a películas ultradelgadas con magnetización perpendicular (*out-of-plane*), donde los efectos térmicos podrían verse acentuados debido a la baja temperatura de Curie de estos sistemas (un aumento de temperatura más pequeño puede generar un efecto más grande cerca de la temperatura de Curie que el descrito en los istemas con magnetización en el plano). Otra dirección interesante de investigación es el estudio de la inversión ultra-rápida de la magnetización por medio de pulsos láser. De echo, se ha visto que también en este tipo de experimentos el calor (generado por el láser) juega un papel importante que debe ser evaluado con mayor profundidad.

En la Parte III se ha estudiado la dinámica de paredes magnéticas, excitadas por campos magnéticos y corrientes eléctricas, en películas ultra-delgadas con anisotropía perpendicular e interacción de Dzyaloshinskii-Moriya interfacial. Esta parte incluye un trabajo llevado a cabo mediante una colaboración con un grupo experimental de la Universidad de Leeds. De echo, en el Capítulo 11 se ha analizado el movimiento de paredes en muestras de Pt/Co/Pt<sub>x</sub>Au<sub>1-x</sub>, donde las velocidades de las paredes se han medido experimentalmente. La reproducción de los resultados experimentales de la velocidad en función del campo magnético aplicado ha permitido una medida del parámetro de disipación. Por otro lado, el análisis del movimiento de las paredes desplazadas por pulsos de corrientes (el movimiento es debido al efecto de *spin Hall*) permitirá una mejor estimación del ángulo de *spin Hall* que determina cuanta corriente eléctrica es transformada en corriente de spin en el metal pesado sobre el que está depositada la capa ferromagnética. Además, se ha prestado particular atención al papel del desorden (defectos, imperfecciones, vacantes, etc) en estos sistemas, y se ha mostrado que el desorden afecta considerablemente a la dinámica excitada mediante campos magnéticos y/o corrientes. Por último, en el Capítulo 12 se ha estudiado la dependencia del campo de *depinning* con el parámetro de disipación. En este contexto se ha mostrado por primera vez, que un parámetro de disipación pequeño puede resultar en un campo de *depinning* pequeño, contrariamente a las teorías convencionales y pero de acuerdo con las indicaciones experimentales <sup>1</sup>. Además, se ha mostrado que esta reducción del campo de *depinning* es debida a las dimensiones de la barrera de energía (relacionadas con las dimensiones de la pared) y a la dinámica interna de la pared, relacionada con su anisotropía de forma y con la interacción de Dzyaloshinskii-Moriya interfacial. En este contexto, investigaciones futuras pueden enfocarse principalmente en la mejora de los modelos micromagnético (la introducción de disipación quiral y non-local, etc.), con la análisis de objetos topológicos como Skyrmiones etc. y con la consecución del movimiento de paredes (o Skyrmiones) mediante corrientes de baja intensidad.

Nuestros resultados representan unas aportaciones significativas en el ámbito del movimiento de paredes en sistemas ferromagnéticos. Tal y como se introduce en el primer capítulo, además de su interés puramente teórico, la investigación en la Espintrónica tiene el potencial de generar aplicaciones importantes en el campo ICT. Dispositivos más rápidos y más económicos (en termino de consumo de energía) pueden tener un gran impacto en la producción de energía y en la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, lo cual redundará en una mejora del medio ambiente. Además, estos dispositivos pueden representar una alternativa a los dispositivos basados en CMOS que están alcanzando su límite de escalabilidad.

De todas formas, me gustaría acabar esta tesis con una citación de un editorial de Nature Nanotechnology [7] que describe un motor más fundamental para la investigación, y que incluye la búsqueda de mejoras tecnológicas, la investigación fundamental, y en resumen, la belleza:

---

<sup>1</sup>En general, no hay un experimento que demuestre directamente esta observación pero se ha observado que los materiales con un parámetro de disipación pequeño tienden a presentar un campo de *depinning* más pequeño.

”What made Galileo point his telescope to the sky, Lavoisier develop new techniques to investigate matter, and Einstein spend sleepless nights wondering about the ultimate law of the Universe? Curiosity, yes, and a sense of beauty. Humans are a curious bunch. Babies taste everything within their grasp, teenagers feel the compulsion to undergo experiences, and scientists want to study things for the first time. **It is this feeling each one of us experiences when we are not satisfied about something — to know more, to improve, to fix — that creates new knowledge. This condition of general dissatisfaction, the result of a continual tension between our limits and our desires, acts as a powerful driving force for all that we do.** From our vantage point as human beings, limited in space, time and capabilities we can fully appreciate the imponderable beauty of the Universe. We feel its vastness can fulfil all our desires, and we are drawn in; but it’s an illusion for we will never be able to comprehend what this all means. Yet, just a glimpse of that beauty is all we seek, a drop of water for thirsty lips. And hence we investigate, ask questions, strive to find things out.-[7]

# Bibliografia

- [1] F. Hellman, A. Hoffmann, Y. Tserkovnyak, G. S. Beach, E. E. Fullerton, C. Leighton, A. H. MacDonald, D. C. Ralph, D. A. Arena, H. A. Dürr, P. Fischer, J. Grollier, J. P. Heremans, T. Jungwirth, A. V. Kimel, B. Koopmans, I. N. Krivorotov, S. J. May, A. K. Petford-Long, J. M. Rondinelli, N. Samarth, I. K. Schuller, A. N. Slavin, M. D. Stiles, O. Tchernyshyov, A. Thiaville, and B. L. Zink, [Reviews of Modern Physics](#) **89**, 025006 (2017).
- [2] V. Raposo, S. Moretti, M. A. Hernandez, and E. Martinez, [Applied Physics Letters](#) **108**, 042405 (2016).
- [3] S. Moretti, V. Raposo, and E. Martinez, [Journal of Applied Physics](#) **119**, 213902 (2016).
- [4] S. Moretti, V. Raposo, E. Martinez, and L. Lopez-diaz, [Physical Review B](#) **95**, 064419 (2017).
- [5] A. Vansteenkiste, J. Leliaert, M. Dvornik, M. Helsen, F. Garcia-Sanchez, and B. Van Waeyenberge, [AIP Advances](#) **4**, 107133 (2014), [arXiv:1406.7635](#) .
- [6] S. Moretti, M. Voto, and E. Martinez, [Physical Review B](#) **96**, 054433 (2017).
- [7] [Nature Nanotechnology](#) **12**, 185 (2017).