

Introducción a la Espintrónica

Miguel Astrain Etxezarreta

5 de Agosto, 2014

Índice

Introducción a la espintrónica:	1
Principios de la espintrónica:	1
Dentro de un material magnético:.....	2
Dispositivos espintrónicos:	3
<i>Giant Magnetoresistance</i> o <i>GMR</i> :	3
<i>Magnetic Tunnel Junction</i> o <i>MTJ</i> :	4
<i>Spin Torque Transfer</i> o <i>STT</i> :	5
Dispositivos de memoria:.....	6
<i>Racetrack Memory</i> :.....	6
<i>Magnetoresistive Random Access Memory</i> o <i>Memorias MRAM</i> :	7
Tabla comparativa:	9
Dispositivos de Lógica Magnética:	10
Simulación de una puerta NOT:	13
<i>Solver Oxii</i>	15
Simulación:.....	17
Conclusiones:	21
Referencias:	22
Anexo I: Código	23
Anexo II: Leyendas de los videos.....	26

Introducción a la espintrónica:

Hoy en día, el campo científico-tecnológico denominado espintrónica es cada vez más extenso y aunque haya varias definiciones, la más cercana a lo que se trata en este trabajo es la que sigue: Denominamos espintrónica a un campo de la física que explota el grado de libertad adicional que es el espín para guardar, codificar, acceder, procesar y/o transmitir información de alguna manera. [1]

El objetivo de este trabajo es hacer una introducción al campo de la espintrónica, exponiendo algunos conceptos básicos y describiendo algunos dispositivos que se usan en la espintrónica. El trabajo se dividirá en dos partes, la primera, a modo de resumen bibliográfico, recoge algunos efectos espintrónicos y dispositivos interesantes basados en los mismos. Para la segunda parte se ha hecho un trabajo práctico mostrando el modo funcionamiento de uno de estos tipos de dispositivos en particular, utilizando una simulación por computador.

Principios de la espintrónica:

En 1922 Otto Stern y Walther Gerlach llevan a cabo su famoso experimento en el que intentan separar, según sus estados de espín (aunque aún no eran conscientes de ello) un haz de átomos de plata con un campo magnético. El experimento fue exitoso pero las hipótesis principales no eran acertadas. En 1927 se consiguió entender el experimento y el concepto de espín gracias a Ronald Fraser, quien apuntó que el estado fundamental de los átomos de plata es $l=0$ por lo que el desdoblamiento solo podía ser debido al espín. [2]

Podríamos extendernos a través de la historia pero por razones de brevedad y de forma que podamos centrarnos en espintrónica como tal debemos adelantarnos al año 1988. El descubrimiento de la *Giant Magnetoresistance*, *GMR*, cuyos descubridores Albert Fert y Peter Grünberg obtuvieron el Premio Nobel (mayúsculas) en 2007, es sin duda el punto de partida de la rápida expansión de esta área de la física. Su contribución a la mejora en las cabezas lectoras de los discos duros supuso un gran avance para los ordenadores pero también para la espintrónica en sí misma.

La espintrónica es hoy en día un campo mucho más amplio de lo que era en sus inicios, pero en base se trataba de usar el grado de libertad que ofrecía el espín en corrientes polarizadas de manera que se obtuvieran efectos distintos a los de la electrónica convencional. Debido a la asimetría de los materiales ferromagnéticos como los ilustrados en la *Figura 1(a)*, hay un estado del espín más abundante que otro, resultando en distintas conductividades para los electrones de conducción según su estado de espín *Figura 1(b)*. Este efecto fue sugerido en 1936 por N.F. Mott.

Cuando hablamos de corrientes polarizadas en espintrónica nos referimos a corrientes eléctricas que tienen una gran parte de sus electrones con un estado de espín definido. Para generar una corriente polarizada solo necesitamos hacer pasar una corriente eléctrica por un conductor ferromagnético con una imanación definida. Debido a la imanación del material los electrones con spin antiparalelo son dispersados, mientras que los que tienen un spin paralelo pueden pasar sin inconveniente. Esto se refleja en un aumento de la resistencia para los electrones con spines en estado antiparalelo. Volviendo al modelo de Mott, se puede entender mejor este efecto, como se puede apreciar en la *Figura 1(b)*. [3]

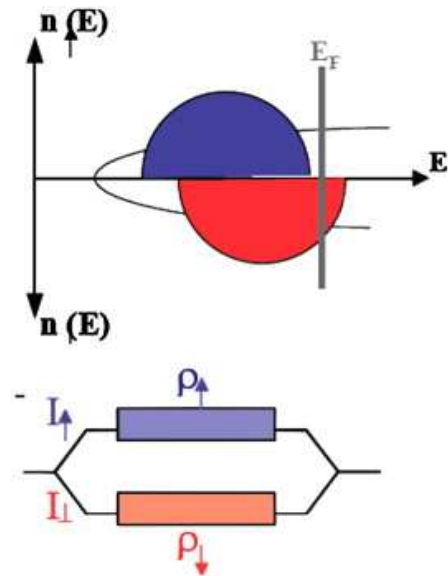


Figura 1: a) Figura superior: Esquema de bandas de un metal ferromagnético. b) Figura inferior: La conductividad puede ser interpretada en dos canales independientes para cada espín (modelo de Mott).

Figura tomada de [1].

Dentro de un material magnético:

En un material ferromagnético, encontramos distintas zonas con imanaciones bien definidas; estas regiones se llaman dominios y son causados por una minimización de la energía en el material. Puede haber muchos o pocos dominios pero lo más importante es que estos dominios se orientan bajo un campo magnético externo. Los materiales que necesitan campos magnéticos muy grandes para orientar sus dominios se denominan duros, y los que no, blandos. Como separación de cada dominio existe una región que llamamos pared de dominio, en la cual los espines cambian su orientación pasando de la dirección de imanación de uno de los dominios a la del otro de manera gradual. Podemos ver un ejemplo de esta situación en un material magnético en la *Figura 2*. [4]

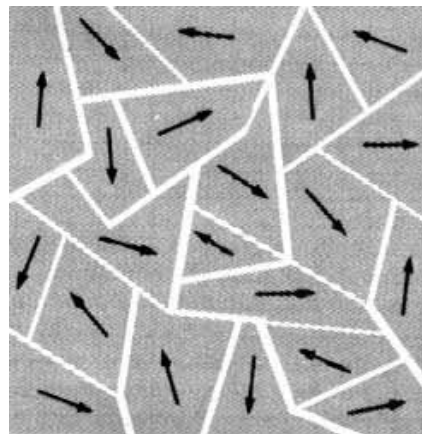


Figura 2: Dominios en una material ferromagnético, en los que se puede apreciar la orientación de la imanación de cada domino indicado con una flecha.

Figura tomada de [13].

Dispositivos espintrónicos:

Giant Magnetoresistance o GMR:

La *Giant Magnetoresistance (GMR)* es un efecto que se observa cuando intercalamos capas de material ferromagnético y no ferromagnético conductor, efecto que se observa en la *Figura 3*. Los electrones de un canal (modelo de Mott) son dispersados mientras que los del otro pueden atravesar el dispositivo normalmente. Al tener varias capas de material, se puede alterar la resistencia de éste jugando con las orientaciones de la imanación de las distintas capas.

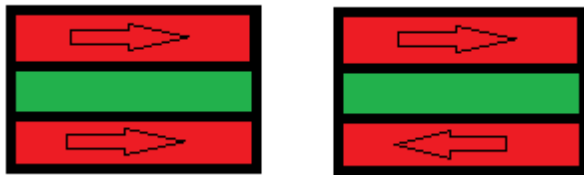


Figura 3: Dispositivo *GMR* en los dos estados más comunes, a la izquierda el estado "paralelo", con dos capas con imanaciones paralelas, y a la derecha el "antiparalelo", con capas en imanaciones opuestas.

Las primeras mediciones de *GMR* de la historia mostraban un ratio $MR=85\%$, siendo dicho ratio el que mide, en porcentaje, la diferencia de resistencia entre los estados de espín paralelo y antiparalelo. [3]

$$MR = 100 \cdot \frac{[R_{AP} - R_P]}{R_P}$$

Este efecto puede explicarse utilizando el modelo de Mott, considerando que en un material magnético conductor hay dos canales de conducción. También asumimos que los electrones que intentan pasar por un material con su espín alineado antiparalelamente a la imanación de este sufrirán una fuerte dispersión.

En el caso de un dispositivo tricapa, como por ejemplo el mostrado en la *Figura 4* podemos tener una configuración F-N-F (siendo la capa intermedia no magnética y conductora) donde las dos capas ferromagnéticas son distintas: una de ellas es dura y la otra blanda. De esta manera, si aplicamos un campo magnético pequeño, la capa blanda quedaría a merced del campo, pudiendo cambiar su imanación según se requiera y creando

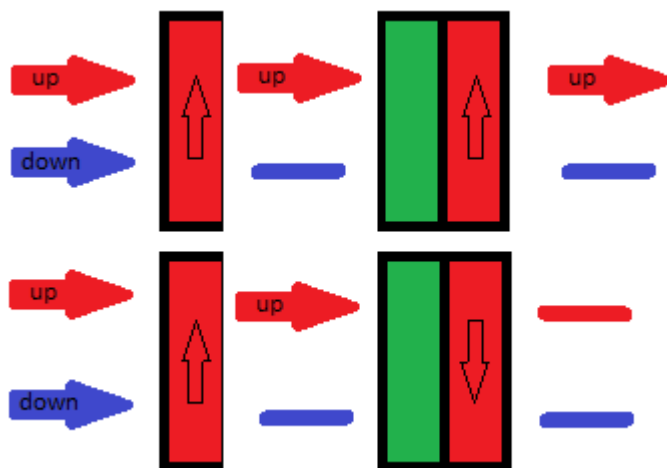


Figura 4: El fenómeno *GMR* explicado con el modelo de dos canales. A la izquierda tenemos las flechas que simbolizan una corriente, dividida en canales *up* y *down*. Tras la primera interfaz (rojo), el canal *down* ha sido dispersado y el *up* pasa sin dispersión. Arriba la segunda interfaz es paralela a la primera por lo que la corriente puede pasar. Debajo la segunda interfaz es antiparalela por lo que presenta una gran resistencia a la corriente.

así un dispositivo que puede cambiar su estado de espín entre los estados paralelo y antiparalelo.

Hay dos modalidades de estos dispositivos, con la corriente perpendicular al plano de las capas (CPP) o haciendo que la corriente quede dentro del plano de las capas (CIP). La ventaja de los dispositivos con la corriente en el plano es que su resistencia nominal para un film de 1 milímetro de largo y menos de 1 micrómetro de ancho es de alrededor de un ohmio. Esta resistencia resulta fácilmente medible mediante herramientas de laboratorio convencionales. En un dispositivo de corriente perpendicular (como el de la *Figura 4*) la resistencia nominal para el caso de 1 milímetro cuadrado y unos 100 nanómetros sería de 10^{-8} ohmios y solo en los últimos tiempos están consiguiendo ser utilizadas estas configuraciones para dispositivos tales como cabezas lectoras de discos duros.

Las dos presentan el mismo comportamiento al descrito en la *Figura 4*. Lo interesante es que la configuración perpendicular ofrece una diferencia mayor en resistencia entre los estados paralelo y antiparalelo, que la que ofrece la paralela. Una diferencia mayor resulta atractiva a la hora de la lectura de información, ya que cuanto más diferencia se encuentre entre los dos estados al leer la corriente de información, más fiable será ésta. Sin embargo, resulta difícil medir resistencias de 10^{-8} ohmios y por eso son más simples y manejables los dispositivos que se valen de corrientes en el plano. [3]

Magnetic Tunnel Junction o MTJ:

Los *Magnetic Tunnel Junctions* o *MTJ* son dispositivos basados en el efecto túnel cuántico. La configuración básica es un dispositivo tricapa, como los que hemos visto para la *GMR*, donde insertamos un material aislante en medio de manera que tenemos un "sandwich" metal-aislante-metal. Controlando la orientación relativa de la imanación en las dos partes magnéticas obtenemos un dispositivo *Tunneling Magnetoresistance* o *TMR* (*Figura 5*).

Al igual que en la sección anterior, para un modelo simple de *MTJ* podemos asumir que tenemos dos canales de transmisión para los dos estados de espín de la corriente incidente. De esta manera, asumimos la conservación del espín en estos canales durante el tunelamiento (efecto túnel). La resistencia a la corriente del dispositivo depende de la orientación relativa de las dos interfaces magnéticas.

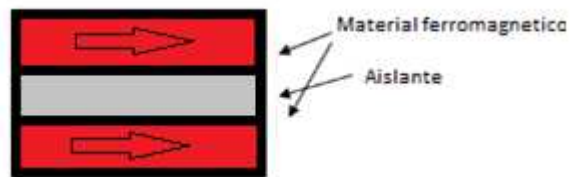


Figura 5: Un dispositivo TMR es equivalente a un GMR donde la capa intermedia es un aislante. Los electrones tienen que desplazarse por medio del efecto túnel para pasar al otro lado.

La *TMR* es importante ya que tiene un ratio de magnetoresistencia (MR) superior a los dispositivos vistos hasta ahora. Aunque es el más difícil de reproducir, en 2004 ya se habían obtenido montajes de dispositivos capaces de tener un MR del 200% a temperatura de laboratorio (ambiente) usando barreras aislantes de monóxido de magnesio de estructura cristalina cúbica (001). Este efecto se conoce ya como *giant TMR*. Recordemos que el ratio MR de un dispositivo *GMR* es de alrededor del 85% como hemos visto antes, por lo que supone una gran mejora. [3]

Spin Torque Transfer o STT:

El *Spin Torque Transfer*, *STT* es un efecto que puede ser descrito como el contrario a la *GMR*. Si en el fenómeno de *GMR* el estado magnético del material afecta a la corriente, *STT* es el efecto en el que una corriente puede afectar al estado del material.

Al igual que el caso de la *GMR*, tenemos principalmente dos direcciones interesantes para la corriente, la corriente en el plano o CIP y la corriente perpendicular al plano o CPP. La más interesante resultaría ser la CPP pero como ya se ha descrito en el caso de la *GMR*, la resistencia nominal de estos dispositivos requiere un equipo especial para medir sus resistencias y resulta más práctico trabajar con CIP ya que su resistencia nominal es de alrededor del ohmio.

Para explicar el efecto *STT* podemos imaginar un dispositivo como el tricapa descrito en el caso de la *GMR*. Tenemos dos capas ferromagnéticas F con los momentos magnéticos de las dos sin alinear y una capa intercalada no ferromagnética N. Al pasar una corriente por la primera F, los electrones con espines antiparalelos a este son dispersados actuando así como un filtro. Estos electrones tienen ahora un espín antiparalelo al de la segunda interfaz por lo que son dispersados por la segunda capa F.

Como ya sabemos por la tercera ley de Newton, cada acción conlleva una reacción y es que de la misma manera que la imanación del material afecta al momento del espín S el cambio de éste produce un torque en la imanación del material. Este efecto es muy pequeño pero es apreciable usando corrientes de alta densidad. Para conseguir densidades de corriente suficientemente grandes existen distintos dispositivos *STT*.

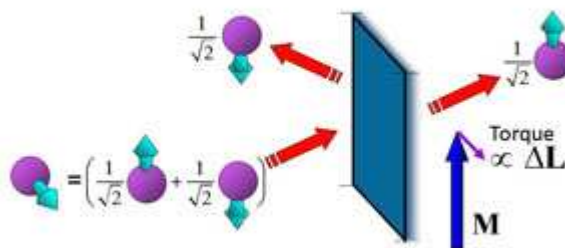


Figura 6: Efecto de transferencia de espín. Una corriente contiene una mezcla de los estados de espín, el estado paralelo pasa sin problema y el antiparalelo es dispersado. Al dispersarlo la imanación sufre un torque y puede ser rotada.

Para conseguir corrientes tan altas, puede ser utilizada la técnica del punto de contacto. Dicha técnica consiste en poner una aguja muy fina en contacto con el dispositivo tricapa. De esta manera, el punto de contacto puede llegar a ser de menor a un nanómetro haciendo que la densidad de corriente en ese punto pueda alcanzar los 10^{13} A/m².

También existen técnicas litográficas en las que se construyen diferentes geometrías que favorecen la medición, ya que la técnica del punto de contacto es un experimento delicado y no es apropiado, por ejemplo, si queremos cambiar la temperatura durante el experimento, debido a los distintos coeficientes de expansión térmica de los materiales que se utilizan.

Otro efecto relevante de la *STT* es el movimiento de paredes de dominio mediante corrientes. Funciona de la misma manera que en el dispositivo tricapa: Supongamos una pared de dominio de 180° . Esto significa que cuando la corriente fluye por un lado del dispositivo, los espines están alineados principalmente en la dirección de imanación de esa región, y al tratarse de una pared 180° , la región que está al otro lado de la pared tiene una imanación opuesta a la primera. De esta manera, los electrones llegan a la segunda región con espines antiparalelos a la imanación de esta, produciéndose así una transferencia de torque que hace girar el momento magnético de esa región. [3]

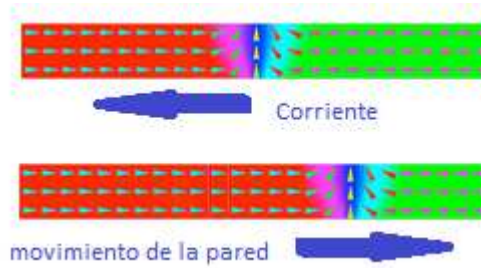


Figura 7: Movimiento de una pared de dominio. Los electrones de la corriente están polarizados por la imanación de la región roja. Al pasar a la siguiente región son dispersados, cambiando la imanación de la región verde.

En este movimiento de paredes están basados los dispositivos lógicos que veremos en la segunda parte del trabajo. Pueden usarse como transmisores de información diseñando toda una nueva gama de circuitos que procesan las mismas operaciones de lógica booleana que los circuitos actuales de tecnología *Complementary Metal Oxide Semiconductor* o *CMOS*, que son los transistores utilizados habitualmente hoy en día.

Dispositivos de memoria:

Racetrack Memory:

Estos dispositivos novedosos son una tecnología totalmente distinta a otros métodos conocidos para almacenar información, ya que utilizan paredes de dominio en un carril magnético. La capacidad de almacenar estas paredes de dominio en carriles les da la ventaja de tener una gran densidad de información con la ventaja de una gran velocidad de lectura ya que no son necesarias partes móviles en el diseño, como ocurre en el caso de los HDD.

Además de esto, suscita un gran interés el hecho de que estos carriles magnéticos no estén restringidos a una geometría particular, siendo posible la construcción de *Racetrack Memories* en 3D.

Cada pared de dominio separa regiones con diferentes direcciones de imanación, constituyendo los bits de información. La longitud de los dominios se establece mediante muescas en el carril magnético, donde las paredes quedan bloqueadas, dándoles también estabilidad frente a campos magnéticos

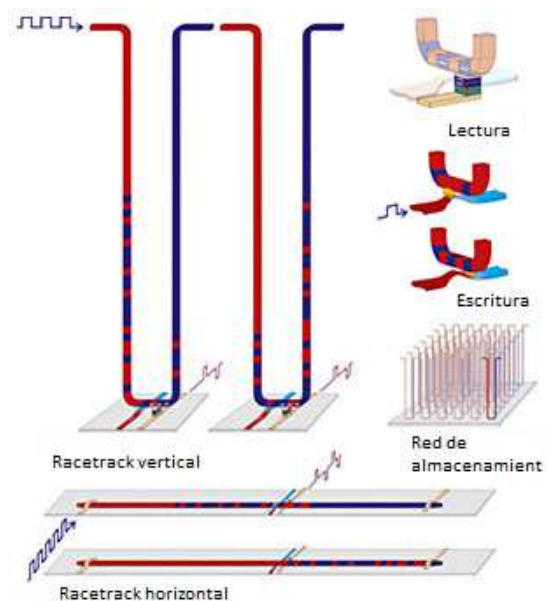


Figura 8: Memorias *Racetrack*. Arriba: Construcción de carriles en 3D que aumenta considerablemente la densidad de guardado de información. Debajo: Otra propuesta en 2D de más fácil implementación. A la derecha se muestra una construcción tricapa para la lectura y un punto de contacto para la escritura.

Figura tomada de [5].

externos. Estos carriles puede tener entre 100 y 500 nm de anchura y una profundidad que varía entre 10 y 50 nm.

El movimiento de las paredes por el carril se produce al aplicar un campo magnético suficientemente fuerte, o mediante corrientes polarizadas por *spin torque transfer*. El elemento lector en el montaje de la imagen se encontraría en la parte de abajo y consiste simplemente en un dispositivo *MTJ*, en el que la Segunda capa ferromagnética se substituye por este carril, de manera que la primera capa estaría fija y el movimiento de las paredes de dominio provoca el cambio entre los estados paralelo y antiparalelo.

En este tipo de construcciones encontramos que los tipos de pared posibles son limitados, puesto que su fino diseño obliga a la magnetización a mantenerse paralela al material.

Tenemos dos tipos de paredes de dominio, *head to head* y *tail to tail*:



Figura 9: Esquema de una pared *head to head* a la izquierda, y *tail to tail* a la derecha. En geometrías planas y materiales blandos estas son el tipo de paredes que nos encontramos.

La dirección de propagación de la pared es independiente a la carga magnética de ésta por lo que las dos pueden subsistir en el circuito cuando movemos paredes para rotar la información. Teniendo esto en cuenta y si la dimensión del carril magnético es pequeña (<100 nm) la transferencia de espín domina el campo magnético generado por ésta y el funcionamiento del dispositivo será correcto. [5]

La construcción en 3D si bien es interesante, también es un reto ya que nunca se ha hecho. En el peor de los casos, una geometría de 2D también daría mayores densidades de información que tecnologías actuales por lo que el futuro de estas memorias parece prometedor.

Magnetoresistive Random Access Memory o Memorias MRAM:

Las *MRAM* son memorias que combinan transistores con alguno de los efectos o dispositivos anteriormente mencionados. Este tipo de memoria combina propiedades muy interesantes como la no volatilidad, trabajo en voltajes bajos, resistencia a múltiples lecturas y escrituras de los datos, estabilidad y resistencia a la radiación externa.

Un dispositivo *MTJ* tricapa (como los anteriormente vistos) es conectado a tierra mediante un transistor que controla la corriente que pasa por éste. Los bits vienen representados por el estado del *MTJ*, para leerlo se hace pasar una corriente, uno de los estados representa un 1 y el otro un 0.

Existen dos tipos de *MRAMs*, las de campo y las de *Spin Torque Transfer*.

Si la memoria tiene unas líneas eléctricas de escritura entonces se llama *MRAM* de campo (*Figura 10*). Estas memorias tienen una gran desventaja y es que el montaje necesita dos líneas de corriente además del transistor y del *MTJ*. Las líneas se construyen a modo de red,

quedando la 1 y la 2 en direcciones perpendiculares. Para acceder a los datos se necesitan las coordenadas del *MTJ* al que queremos acceder y se encenderá la línea 1 correspondientes a esas coordenadas. Para escribir la información se mandan pulsos eléctricos que generan campos magnéticos y cambian el estado del *MTJ* como vemos en la *Figura 10* [1]

Estas dos líneas aumentan mucho el tamaño de las memorias e introducen posibilidades de error en la escritura porque al pasar el pulso por toda la línea puede afectar a celdas adyacentes.

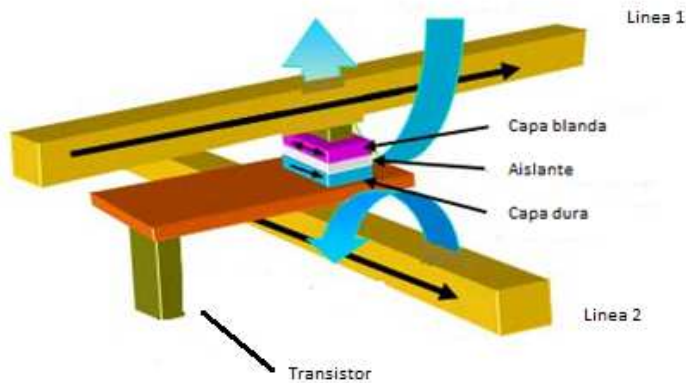


Figura 10: Imagen de una *MRAM* de campo. En el centro de la imagen podemos ver el *MTJ* de tres capas. En amarillo vemos las líneas de corriente para la escritura y lectura. En marrón tenemos el transistor.

Figura tomada de [9].

El segundo tipo de *MRAM* es el *STT-MRAM*. Que combinan las ventajas mencionadas de las *MRAM* pero sumándoles una gran ventaja sobre las de campo y es que al aprovecharse del efecto *STT* no es necesaria ninguna línea de corriente adicional para su escritura. La corriente que pasa normalmente por el transistor al leer se puede polarizar, al hacer esto podemos cambiar el estado del "sandwich" de paralelo a antiparalelo y viceversa. [3]

Como se ve en la *Figura 11*, el transistor no queda desplazado por la línea 2, como ocurre en la *Figura 10*. En este caso de la *STT-MRAM*, solo hay que añadir el dispositivo *MTJ*.

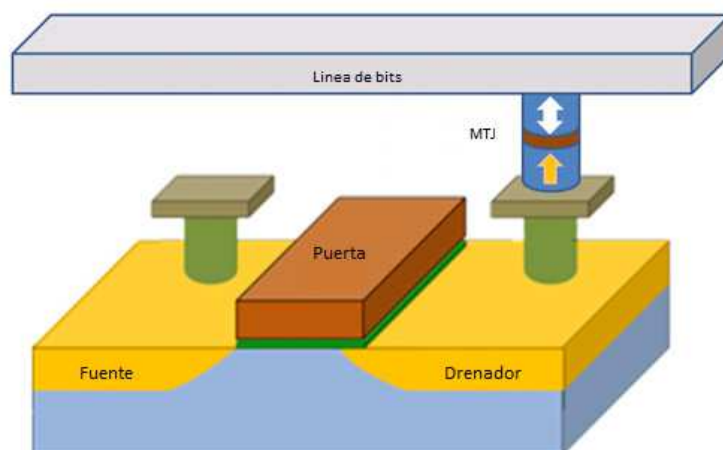


Figura 11: *STT-MTJ*, al eliminar los carriles de escritura de de la *MRAM* se puede fabricar el dispositivo *MTJ* encima del transistor.

Figura tomada de [10].

Tabla comparativa:

En la siguiente tabla se comparan algunos datos de las memorias recientemente mencionadas con tecnologías existentes [5]:

Las memorias HDD corresponden a la tecnología actual más extendida y se basan en *GMR*. NANDFLASH son las memorias conocidas como SSD o *Solid State Drive* o las que se usan para los dispositivos *pendrive*. *F-MRAM* se refiere a las memorias MRAM de campo y *S-MRAM* a las basadas en STT. *H-Racetrack* son *racetrack* horizontales y la *V-Racetrack* son verticales. Se ha asumido una media de 16 bits por celda en las memorias *racetrack*.

Aunque las velocidades de lectura son muy bajas para todos los dispositivos excepto para los HDD, en la práctica, los HDD serían los más lentos. Esto es debido a que la arquitectura de los dispositivos *Flash*, *MRAM* y *Racetrack* permiten a varios módulos ser leídos o escritos al mismo tiempo. Como resultado, todas las memorias aquí presentadas nos darían un flujo de datos estable mayor que los HDD.

Los tiempos de escritura y lectura variables tienen como origen distintas arquitecturas y formas de operar, así, las memorias *Racetrack* tienen bits en carriles que obligan a la re-escritura de los mismos cuando sólo se requiere acceder a uno de ellos. En la realidad se suele requerir el acceso a muchos bits simultáneamente, lo que hace que sea difícil estimar el tiempo de lectura y escritura del producto final, ya que distintas formas de operar podrían tomarse en cuenta. De la misma forma, el consumo estimado viene dado por bit, pero hay distintos factores a la hora de diseñar el dispositivo que podrían aumentar esta cantidad.

	Bits por celda	Tiempo de lectura [ns]	Tiempo de escritura[ns]	Velocidad de lectura[Mb/s]	Consumo[pJ]
HDD	–	$> 2 \cdot 10^6$	$> 2 \cdot 10^6$	1000	–
NANDFLASH	2	10^4	10^5	≤ 30	65
F-MRAM	1	3-30	3-30	≤ 200	50
S-MRAM	1	10-20	3-30	≤ 100	2
H-Racetrack	>1	20-32	20-32	250-670	2
V-Racetrack	Hasta 128	20-32	20-32	250-670	2

Figura 12: Tabla comparativa de tecnologías actuales y novedosas como *MRAM* o *Racetrack*.

Tabla tomada de [5].

Dispositivos de Lógica Magnética:

En este segundo apartado nos centramos en los dispositivos de lógica magnética. Con movimientos de paredes de dominio como los de una memoria *racetrack*, se pueden hacer circuitos de lógica booleana. Diversos autores proponen diseños que intentan recrear circuitos lógicos sin usar transistores [6, 7, 8].

Para construir el circuito se usa un material ferromagnético blando, en particular Permalloy ($Ni_{80}Fe_{20}$). Los nanohilos utilizados juegan un papel clave ya que de la forma que tenga el material dependerá que la transmisión y formación de paredes de dominio sea la apropiada. Al usar películas delgadas de 5nm en forma de hilos finos con anchuras que varían desde los 100 nm hasta los 200 nm la geometría obliga a que la imanación se mantenga dentro del plano del material. De esta manera, obtenemos una base binaria teniendo sólo dos estados posibles para la imanación (ver *Figura 13*). Las paredes de dominio por lo tanto representan el cambio de un estado a otro y así se crea la base binaria. Estas paredes pueden moverse por complejos circuitos de nanohilos bajo la influencia de un campo magnético externo que actúa tanto de reloj como de fuente de alimentación del circuito. [6]

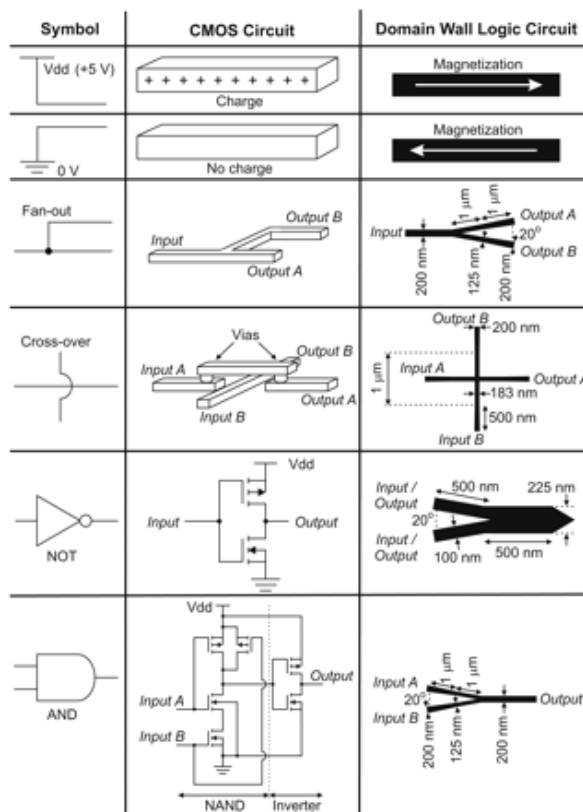


Figura 13: Comparación entre elementos lógicos básicos de tecnología CMOS con los basados en movimiento de paredes de dominio.

Figura tomada de [6].

La *Figura 13* describe los elementos más básicos para un circuito lógico y su comparación con los implementados de forma tradicional con transistores. En tecnología CMOS la carga o la ausencia de esta forman los bits 1 o 0. En los circuitos lógicos basados en paredes de dominio, estas separan las dos direcciones de la imanación con respecto a la dirección de propagación. Al construir el circuito, además de las operaciones lógicas también se debe llevar la señal de un sitio a otro, siendo necesario separar la misma señal a dos hilos distintos o hacer que dos hilos se crucen sin mezclar la señal (tercera y cuarta línea de la *Figura 13*). Como vemos en la mencionada figura, la anchura que deben tener los carriles magnéticos está bien determinada para cada tramo del circuito. Sus dimensiones han sido optimizadas experimentalmente para poder asegurar el buen funcionamiento del circuito.

Dependiendo de las propiedades del material utilizado y de su geometría, hay dos valores para el campo que son importantes: el campo de propagación y el campo de nucleación. El primero se refiere al campo que es necesario para propagar paredes de dominio a través del material y el segundo al campo que se necesita para crear nuevas paredes. Además, debemos tener en cuenta que una pared de dominio no se mantendrá si el campo magnético externo aplicado en el circuito es demasiado grande, ya que el circuito entero se imanará en su dirección.

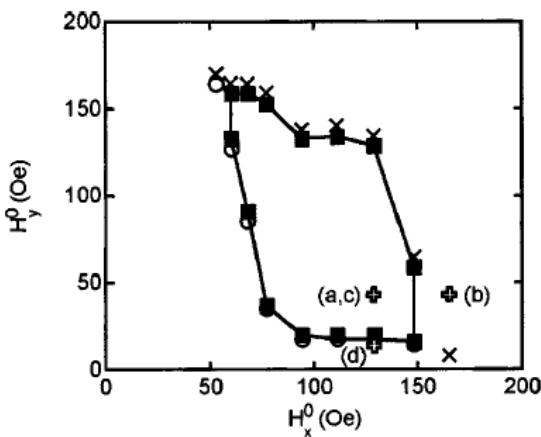


Figura 14: Diagrama de fase obtenido experimentalmente de un circuito lógico NOT. Las X marcan puntos de nucleación y los cuadrados puntos de propagación de las paredes de dominio. Los puntos se han marcado para la amplitud de los componentes de un campo magnético rotatorio con una frecuencia de 27 Hz.

Figura tomada de [7].

Lo que vemos en la *Figura 14* es un ejemplo para una puerta NOT, pero el buen funcionamiento del dispositivo lógico requiere que todas sus partes puedan funcionar en una región que comprende entre los puntos de propagación, sin llegar a la nucleación. Para encontrar la región de funcionamiento del dispositivo se puede repetir el proceso que vemos en la *Figura 14* para todas las piezas del circuito y buscar los valores de H_x y H_y que se solapan en todos los diagramas de fase.

Además de esto, encontraremos curvas en los circuitos lógicos. La dirección de rotación del campo magnético, en sentido o en contra de las agujas del reloj, define la quiralidad de la curva. Una pared de dominio sólo se propagará por una curva si su quiralidad es la apropiada. De esta manera, con una dirección de rotación del campo definida, una pared de dominio sólo podrá propagarse por una curva en una dirección. Esto supone una limitación a la hora de hacer los circuitos ya que debe haber una dirección de propagación definida y se debe diseñar dicho circuito teniendo esto en cuenta. [7]

Una puerta NOT como la de *Figura 13* es un elemento inversor: si la imanación es continua en la pieza entonces la imanación en cada extremo de la puerta será opuesta. Esto se debe a que esta pieza produce un cambio de sentido de 180° . Debido a la simetría de estos dispositivos, es necesario definir el 0 y 1 lógicos de la siguiente manera: 1 cuando la imanación está en la dirección de la propagación y 0 cuando no lo está.

Supongamos un campo magnético en el plano de la *Figura 15* rotando en sentido contrario a las agujas del reloj. En la imagen que muestra la figura B, hay una pared de dominio entrando en el dispositivo NOT. El campo sigue empujando la pared de dominio en su dirección de manera que entra en el pico de la pieza. Cuando el campo está en la dirección H_y todo el pico Q tiene la misma imanación, y la pared de dominio se encuentra en el lado contrario, como podemos ver en la Imagen D. Si el campo continúa rotando hacia $-H_x$ la pared saldrá de la puerta NOT.

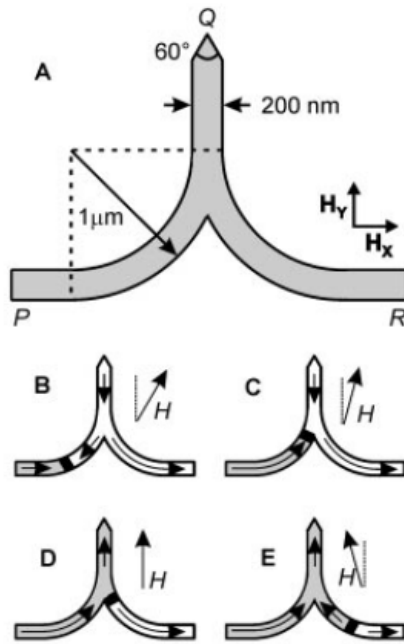


Figura 15: Funcionamiento de una puerta NOT. En A tenemos la descripción de la pieza y B C D E muestran los distintos estados de la pared de dominio para la dirección del campo.

Figura tomada de [8]

De la combinación de elementos como éste se pueden hacer circuitos de lógica magnética completos que se autosuministran *inputs* mediante un lazo. De esta manera obtenemos osciladores como el mostrado en la *Figura 16*.

Al haber una puerta NOT en el lazo, necesariamente tendremos al menos una pared de dominio. Esta pared es la señal de entrada y de salida en el circuito.

En el gráfico inferior de la *Figura 16* podemos observar el comportamiento del circuito ante un campo magnético que rota en sentido contrario a las agujas del reloj. Los dos niveles de la señal, que físicamente indican la dirección de la imanación con respecto a la de propagación, representan los 1 y 0 de la lógica binaria, cuya lectura se realiza en los puntos I y II de la *Figura 16*. Estas dos señales son contrapuestas con un desfase de medio ciclo del campo, ya que, para que una pared de dominio pase por la puerta NOT, el campo debe hacer medio ciclo. El resto del lazo se completa en un ciclo del campo, por lo que una imanación dada se revertirá tras $3/2$ ciclos de campo y habrá completado un ciclo completo cuando el campo lo haga 3 veces. [6,8]

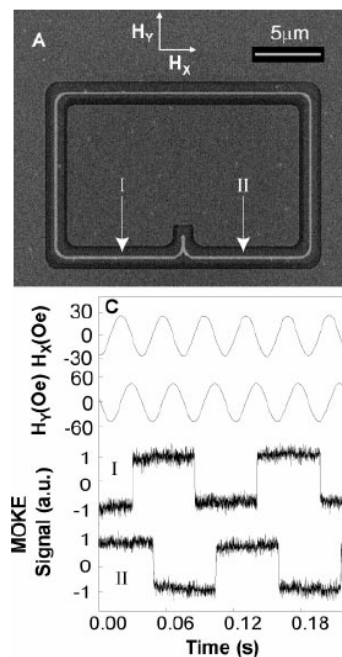


Figura 16: Al haber un lazo que introduce la señal de salida en la entrada el circuito se convierte en un oscilador. Los hilos tienen 5 nm de grosor y 200 nm de anchura.

Figura tomada de [8].

Simulación de una puerta NOT:

Para la segunda parte de este proyecto se ha simulado computacionalmente el funcionamiento de una puerta NOT. El software utilizado ha sido *Object Oriented Micromagnetic Framework (OOMMF)*, un software de uso libre creado por M. J. Donahue y D. G. Porter [9]. La arquitectura del programa es modular, utiliza distintos programas que trabajan individualmente en un conjunto para llevar a cabo simulaciones micromagnéticas.

Las simulaciones micromagnéticas son aquellas que se hacen con tamaños de la escala del micrómetro pero sin llegar a la escala atómica. Hay dos tipos de simulaciones, estáticas o dinámicas.

Las estáticas se basan en un problema de minimización de las energías que afectan al material: La energía de Zeeman, energía de anisotropía, de intercambio, del campo desimanador, etcétera.

Las dinámicas, por el contrario, se basan en la integración de la ecuación de Landau-Lifshitz-Gilbert [3].

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = -|\gamma|\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}} - \frac{|\gamma|\alpha}{M_s} \mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}}), \quad (1)$$

Donde \mathbf{M} es la imanación, H_{eff} es el campo efectivo, γ es el ratio giromagnético (2.2 GHz/T) y α el coeficiente de *damping* o amortiguación (cuyo valor va de 0 a 1 y es característico de cada material).

Las distintas interacciones dentro del material pueden ser interpretadas como campos y esto nos permite calcular el campo efectivo. Las energías correspondientes a estos campos son calculadas por el programa para cada iteración.

El campo de Zeeman es el campo exterior aplicado sobre la pieza. Su energía es la siguiente:

$$E_{\text{ext}} = -\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B} \quad (2)$$

Donde \mathbf{B} es la inducción magnética y $\boldsymbol{\mu}$ el momento magnético.

El campo de intercambio es el generado por la interacción espín-espín debido a la simetrización de la función de onda. Su energía viene dada por:

$$E_{\text{int}} = A(\nabla m)^2 \quad (3)$$

Donde A es la constante de rigidez de intercambio y \mathbf{m} es el vector de dirección de la imanación.

El campo desimanador viene de la interacción dipolo-dipolo y su energía tiene la siguiente forma:

$$E_{dem} = -1/2 \int H_D \cdot J dV \quad (4)$$

Donde J es la imanación M escrita en S.I. y H_D es campo desimanador.

La segunda parte de la *Ecuación 1* es responsable de la precesión de los espines alrededor del campo externo. Una variable importante a la hora de simular este término es el coeficiente de *damping*, que aún siendo característico de cada material, puede ser ajustado dependiendo de las necesidades de la simulación. Si no se necesitan unos resultados muy precisos, se puede introducir en el *input* un coeficiente de *damping* alto, lo que determinará que los espines converjan a su estado estable más rápidamente.

Debido a la complejidad y abundancia de estos términos sólo se han enumerado los más importantes. Por ejemplo, los términos que se derivan de la energía de intercambio, en la *Ecuación 3*, son quince en coordenadas polares y requieren diversas aproximaciones. [3]

El programa funciona de la siguiente manera:

Digamos que el *input* introducido es un "problema". El programa entonces divide el problema en muchos problemas más pequeños, y así se crea una red. En el caso más simple, esta red estará formada por cubos que se expanden para llenar la pieza que queremos simular. Cuanto menor sea el tamaño de estos cubos más precisa será la simulación.

Por último, se necesita definir un estado de inicialización, que en este caso será tal que el programa pueda calcular la evolución de la magnetización integrando la *Ecuación 1* en el tiempo.

Los módulos del programa *OOMMF* se comunican entre sí por protocolos de internet (TCP/IP), haciendo que sea posible que distintos procesos puedan ser completados desde una red de ordenadores. Cada programa puede ser receptor de información o puede requerir información de otro de los programas, por ello, hay otros programas intermedios que se encargan de gestionar estas conexiones. Esto se puede observar en la *Figura 17*.

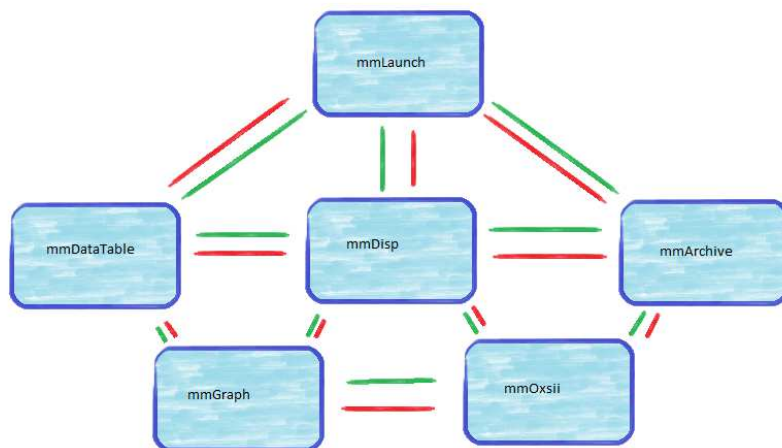


Figura 17: Diagrama del flujo de datos para los módulos del programa *OOMMF*. El envío de información se realiza a través de protocolos TCP/IP de internet, haciendo posible el uso de fraccionado del programa.

mmLaunch gestiona los programas de *OOMMF*, ayudando al usuario a abrirlos, cerrarlos o asegurarse de cuantos están abiertos y proporcionando una interfaz de usuario para ellos. El programa que resuelve el "problema" (*solver*) en 3D se llama *Oxsii* y es el utilizado para nuestra simulación en *OOMMF*. Es posible utilizar *mmSolve2D* para resolver problemas en dos dimensiones como el nuestro, pero ese programa al tener una interfaz de usuario más sencilla (*user friendly*) también limita las posibilidades del usuario a la hora de simular. Sin embargo, es recomendable utilizar este último si se utiliza *OOMMF* por primera vez, o se es un usuario inexperto.

El resto de programas que forman *OOMMF* trabajan de manera que procesan la información que les manda el *solver*:

mmDataTable recibe datos de otros y selecciona cuales se van a mostrar en la interfaz.

mmArchive es un programa que recibe datos y los guarda según la orden del usuario.

mmDisp permite visualizar los resultados. Sirve para visualizar la imanación en la pieza en cada región pero también para visualizar el campo magnético.

mmGraph recibe datos para hacer gráficos en dos dimensiones. La diferencia con el anterior visualizador es que utiliza valores escalares para hacer gráficos de otros datos que nos da el *solver* como por ejemplo la imanación en un eje con respecto al campo, lo que nos dará ciclos de histéresis.

En *OOMMF* es posible abrir varios clientes del mismo programa, por ejemplo, si queremos que el simulador nos muestre varios gráficos de distintos datos a la vez durante la simulación usaríamos *mmLaunch* para abrir dos clientes de *mmGraph*. También es posible controlar estos programas en tiempo real mientras se desarrolla la simulación.

Solver Oxsii

El *solver* no tiene una interfaz donde configurar el problema a resolver por *OOMMF* por lo que hay que programarlo en un archivo MIF. Este archivo MIF es un archivo de texto con una forma predefinida para que el *solver* sea capaz de interpretarlo. Aunque *OOMMF* esté programado en C++, este archivo tiene que ser escrito en el lenguaje Tcl.

En dicho MIF definimos el problema con distintos módulos, llamados *Oxs_ext*, y que deben ser llamados en un orden concreto desde el archivo (un *Oxs* no puede llamar a otro *Oxs* si éste no ha sido definido antes).

Primero se define la geometría del problema, para ello *OOMMF* utiliza los Atlases (como se puede leer en el *Anexo1: Código* en la sección de "Material Parameters"). Se puede definir una pieza usando scripts y uniendo varias piezas en el mismo problema, pero la manera más cómoda y rápida de hacerlo es usando *Oxs_ImageAtlas*. Esta extensión utiliza una imagen con una codificación de mapa de bits y crea el objeto para el *solver*. Los colores se pueden codificar en RGB pero lo más fácil para problemas no muy complejos resulta usar el blanco y negro especificando en la extensión a qué material corresponde cada color, por ejemplo, blanco=no magnético y negro=magnético. En esta sección también definimos la red del problema, y podemos definir otras extensiones como la constante de energía de

intercambio para nuestro problema, que en este caso, al ser Permalloy ha sido definida como energía de intercambio uniforme $A = 13e-12$ J/m.

Lo siguiente que se define es el campo magnético exterior que usaremos en el problema, como se puede ver en el *Anexo I: Código* en la sección de "Applied field". Al simular una puerta NOT con un lazo, nos interesa un campo magnético rotatorio. En este caso se ha optado por *Oxs_StageZeeman*, que es una extensión que controla el campo por fases, permitiendo así controlar dicho campo durante la simulación, y retroceder o avanzar pasos del mismo. Para definir el campo nos valemos de sus dos componentes espaciales, que en este caso son distintas ya que nos interesa un campo elíptico (porque necesitamos un campo mayor en el eje de la dirección del pico, para que las paredes de dominio puedan propagarse como vemos en la *Figura 15 B C D E*). La imanación inicial se controla mediante la extensión "initial magnetization" que es una script de Tcl.

Los módulos "*evolver*" y "*Time driver*" controlan la simulación. *evolver* es el módulo que controla cada iteración del programa, integrando la *Ecuación 1*. En este caso hemos escogido que sea *Oxs_EulerEvolve:evolver*, que utiliza el método de Euler "hacia adelante" (*Forward Euler*) para resolver el problema.

El método de Euler se basa en que si conocemos la ecuación diferencial de un problema y tenemos una de las soluciones del problema (que en este caso será el estado inicial) entonces conocemos la pendiente de la curva en ese punto. Conociendo la pendiente (dirección) y un punto podemos avanzar un paso hacia delante y calcular el nuevo punto y así sucesivamente hasta tener la evolución del sistema. En este caso *OOMMF* utiliza un algoritmo un poco más sofisticado: el paso que se da hacia delante es variable y se ajusta para que cumpla algunos criterios concretos.

El *driver* controla la simulación en general. Lee las órdenes del fichero MIF con la especificación del problema y lo ejecuta. Controla etapas de la simulación poniendo límites al *evolver* para que pare en un número determinado de iteraciones, tiempo de simulación, o el cambio de los momentos de los espines de una iteración a otra. Como podemos ver en el *Anexo I: Código* en su sección, el *time driver* también da el estado inicial al sistema. [9]

Simulación:

Con la descripción anterior se ha escrito un programa que simula una puerta NOT. *OOMMF* no es un programa fácil y requiere familiarizarse con un nuevo lenguaje de programación, el Tcl. Para ello el programa mismo tiene unos ejemplos que se pueden seguir con el manual, pero la primera dificultad reside en importar la pieza que se quiere simular, en este caso la que se muestra en la *Figura 18*.

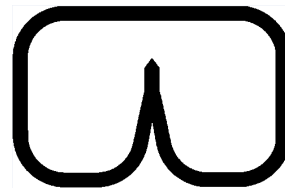
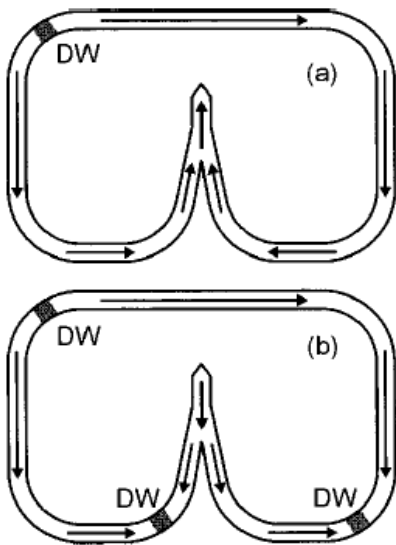


Figura 18 (Encima): Imagen diseñada para la simulación micromagnética.

Figura 19 Izquierda: Imagen base utilizada para la simulación de una puerta NOT.

Imagen tomada de [7].

El programa convierte esta imagen usando su propio formato de píxeles y tras especificarle la equivalencia de negro=magnético y blanco=no magnético tenemos la pieza lista para simular.

A pesar de que el funcionamiento del programa es bastante complejo, su diseño altamente modular cumple perfectamente con el objetivo de simular de forma eficiente. Ha sido difícil familiarizarse con todas las funciones que tiene disponibles. A modo de ejemplo, para definir el campo utilizamos Ox_s Zeeman de distintos tipos, pero algunos de estos tipos no tienen explícitamente el tiempo como variable y pueden causar confusión. Finalmente se optó por un StageZeeman que controla el campo por fases (dando un valor fijo al campo hasta que converge para ese valor), siendo posible controlar el campo mientras se simula.

Para llevar a cabo esta simulación nos hemos basado en los datos experimentales publicados [6, 7, 8].

Teniendo como punto de partida datos experimentales, algunos de ellos, como por ejemplo, el campo usado, no se corresponden exactamente con las simulaciones, siendo a veces mayor el campo requerido para mover una pared de dominio y hacer que pasara por el pico de la puerta NOT.

Otra razón para usar un campo por fases como StageZeeman es que al poner un campo con una frecuencia dada (mediante un campo controlado por *script*, ScriptZeeman), las paredes de dominio no podían seguir a la velocidad del campo. Experimentalmente se ha demostrado el funcionamiento de este dispositivo a una frecuencia de 27 Hz y en la simulación no se ha encontrado eso.

Superadas estas discrepancias se ha conseguido simular el comportamiento esperado para el circuito y para ello se presenta un resumen de datos utilizados:

Imanación de saturación permalloy: $800 \cdot 10^3 \text{ A/m}$

Constante de intercambio: $13 \cdot 10^{-12} \text{ J/m}$

Campo elíptico:

Amplitud en el eje x: 60 Oe

Amplitud en el eje y: 160 Oe

60 fases con un desfase de $\sim 23^\circ$ cada una, el campo dará varias vueltas.

La red: cubos de 10 nm en todos los ejes. Para dar un grosor aproximado de 200nm al carril.

Gamma o ratio giromagnético: 2.2 GHz/T

Damping: 0.5

Empezamos la simulación con el campo en la dirección H_x , a pesar de que sería posible empezar el campo en cualquier dirección. Artificialmente ponemos una pared de dominio abajo a la izquierda como se muestra en la *Figura 20*, de manera que con el campo H_x del principio se propague hacia el pico NOT.

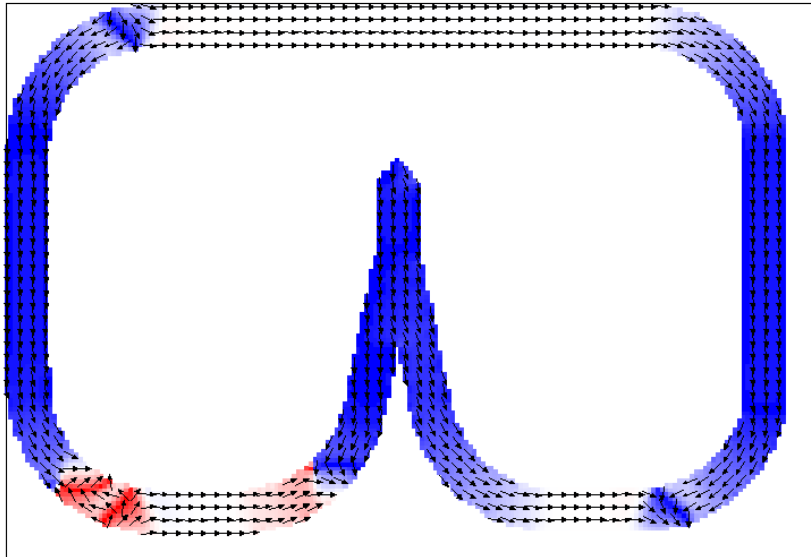


Figura 20: Imagen tomada desde mmDisplay del OOMMF. Podemos ver como la pared de dominio entra en el pico central al tener el campo en la dirección H_x .

A partir de aquí el campo rota en sentido contrario a las agujas del reloj, y en la *Figura 21* vemos como la pared de dominio entra en el pico. La pared al principio es del tipo *head to head*, es decir, que las flechas están mirando unas a otras, y a la salida del pico tendrá que ser *tail to tail*, las cabezas de las flechas apuntando hacia fuera. Estas dos estructuras nos dan los 0 y 1 lógicos que son el propósito del circuito.

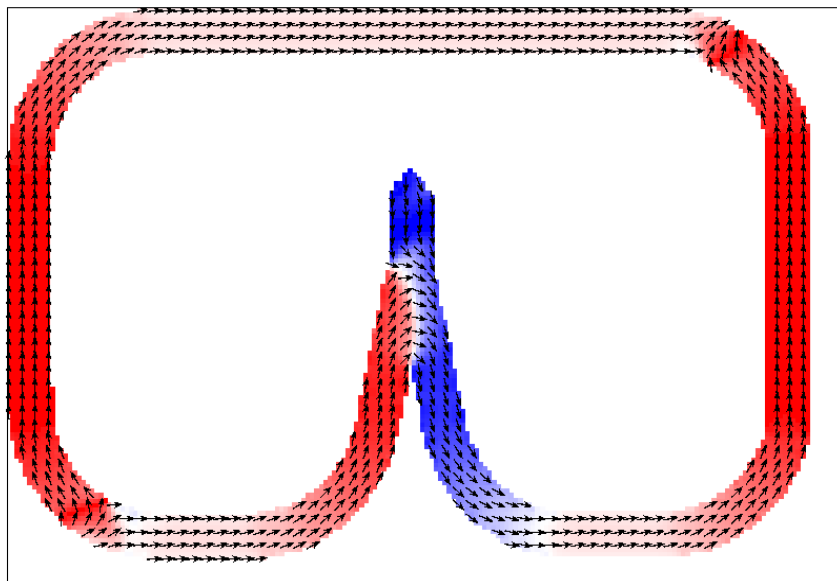


Figura 21: La pared de dominio entra en el pico NOT.

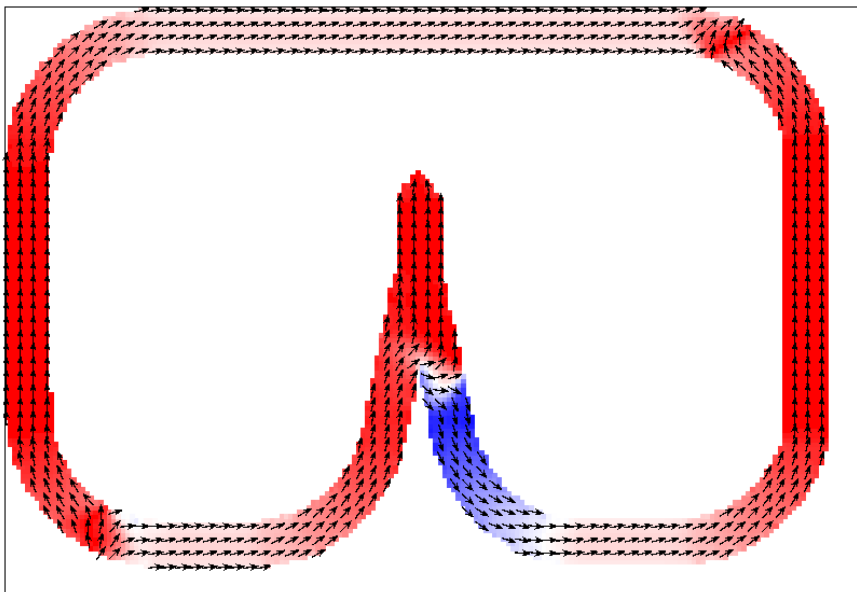


Figura 22: La pared de dominio saliente es ahora *head to head*.

Tras salir la primera pared de dominio del circuito observamos (Figura 22) otras dos paredes en extremos opuestos del lazo. Al principio no esperábamos este comportamiento en nuestro circuito pero tras simular repetidas veces, se ha visto que es más fácil tener tres paredes de dominio en el circuito que una sola. El tener tres paredes no afecta al funcionamiento del circuito como vemos en la simulación, varias paredes pasan por el pico NOT para salir invertidas al otro lado. A pesar de ser fortuito el funcionamiento de un lazo NOT como este con tres paredes es totalmente válido, ya que, por cuestiones de topología es necesario que haya al menos una pared de dominio en el pico NOT pero un lazo puede contener dos paredes más. Es esta la configuración la que observamos en el resto de la simulación, pero en todos los casos las paredes entrantes quedan invertidas en la salida del pico, como se observa en la Figura 23.

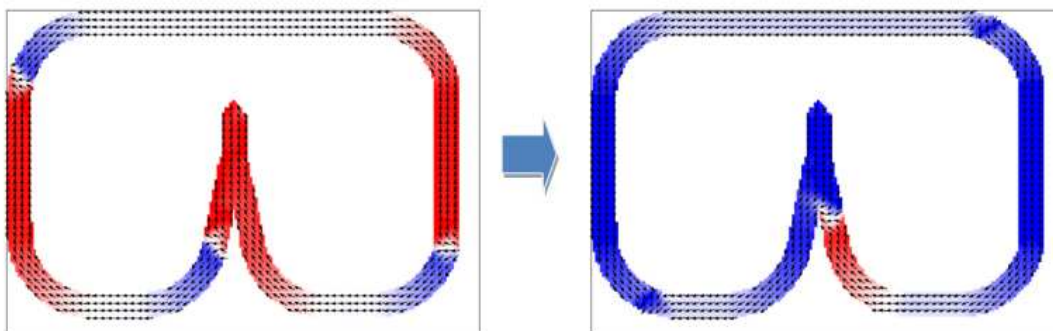


Figura 23: Vemos que la nueva pared, esta vez *tail to tail* en la entrada y *head to head* a la salida funciona correctamente.

Conclusiones:

Como conclusión podríamos decir que la espintrónica es un campo en auge. Conducido por la revolución que supuso el descubrimiento de la *Giant Magnetoresistance*, el almacenamiento de información del futuro parece ser magnético. Sin embargo, el interés parece centrarse ahora en las corrientes polarizadas y en paredes de dominio, dando lugar a dispositivos como los *Racetrack Memory* o los circuitos de lógica magnética.

En lo concerniente a las simulaciones llevadas a cabo en la segunda parte del trabajo, se puede decir que el software OOMMF ha resultado ser efectivo en el desarrollo de la simulación. Aún así, aunque el simulador 2D es fácil de usar, el de 3D no resulta sencillo de manejar para el usuario inexperto. Programar el problema de interés a resolver resulta complejo al principio, pero el usuario más experimentado es capaz de usar todas las herramientas proporcionadas por el software para desarrollar las simulaciones.

Finalmente, podemos afirmar que se ha conseguido simular el circuito deseado con el funcionamiento apropiado de manera exitosa, aunque no haya sido posible encontrar un punto de trabajo donde el funcionamiento fuera de una única pared de dominio, que era nuestro objetivo al principio.

Estos resultados son interesantes de cara a saber lo que ocurre en dispositivos que podrían ser parte de las memorias magnéticas mencionadas (y tener aplicaciones) o simplemente para ayudarnos a entender la espintrónica de una forma más fundamental.

Referencias:

Referencias bibliográficas:

- [1] S. A. Wolf, D. D. Awschalom, R. A. Buhrman, J. M. Daughton, S. von Molnár, M. L. Roukes, A. Y. Chtchelkanova y D. M. Treger, *Spintronics: A Spin-Based Electronics Vision for the Future*, Science 294, (2001).
- [2] C. Cohen-Tannoudji, B. Diu y F. Laloe, 1992, "*Quantum Mechanics*", Wiley.
- [3] E. Y. Tsybal y I. Zutic, 2012, "*Handbook of Spin Transport and Magnetism*", CRC Press.
- [4] M. A. Plonus, 1982, "*Electromagnetismo aplicado*", Reverté S.A.
- [5] S. S. P. Parkin, M. Hayashi y L. Thomas, *Magnetic Domain-Wall Racetrack Memory*, Science 320, 190 (2008).
- [6] D.A. Allwood, G. Xiong, C. C. Faulkner, D. Atkinson, D. Petit y R. P. Cowburn, *Magnetic Domain-Wall Logic*, Science 309, (2005).
- [7] D.A. Allwood, G. Xiong, M.D. Cooke, C. C. Faulkner, D. Atkinson, N. Vernier y R. P. Cowburn, *Characterization of submicrometer ferromagnetic NOT gates*, Journal of Applied Physics 95, 12 (2004).
- [8] D.A. Allwood, G. Xiong, M.D. Cooke, C. C. Faulkner, D. Atkinson, N. Vernier y R. P. Cowburn, *Submicrometer Ferromagnetic NOT Gate and Shift Register*, Science 296, (2002).
- [9] M.J. Donahue y D.G. Porter "OOMMF User's Guide, Version 1.0", NISTIR 6376, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD (Sept. 1999).

Referencias de las figuras:

- [10] P. Khalili y K.L.Wang, "*Voltage-controlled MRAM: Status, challenges and prospects*", E E Times, desde http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1280508
- [11] Kris, "*MRAM – The Birth of the Super Memory*", The Future of Things, <http://thefutureofthings.com/3037-mram-the-birth-of-the-super-memory/>
- [12] "Theory of Spin Transfer Torque", NIST, http://www.nist.gov/cnst/epg/spin_transfer_torque.cfm
- [13] I.G.Cubero, "¿Qué tienen en común una bacteria y los ferrofluidos?", WIS PHYSICS, <http://www.wisphysics.es/2012/03/que-tienen-en-comun-una-bacteria-y-los-ferrofluidos#>

(Referencias de internet última vez consultadas el 04/09/2014.)

Anexo I: Código

En este anexo se presenta el código usado para simular un circuito lógico magnético NOT. El lenguaje usado es el Tcl.

```
# MIF 2.1

set PI [expr {4*atan(1.)}]
set MU0 [expr {4*$PI*1e-7}]

RandomSeed

#####Material Parameters#####
Specify Oxs_ImageAtlas:atlas {
  xrange {0 3800e-9}
  yrange {0 2600e-9}
  zrange {0 10e-9}
  image notgateloop.ppm
  viewplane xy
  colormap {
    white nonmagnetic
    black magnetic
    red magnetic
    green magnetic
  }
}

Specify Oxs_RectangularMesh:mesh {
  cellsize {10e-9 10e-9 10e-9}
  atlas :atlas
}

Specify Oxs_UniformExchange {
  A 13e-12
}

Specify Oxs_Demag {
}
#####

#####Applied field#####
Specify Oxs_StageZeeman {
  script StageField
  stage_count 60
}
proc StageField { stage } {
  set PI [expr {4*atan(1.)}]
  set Oe [expr {79.57747}]
  set Hx 60
  set Hy 160
  set phi [expr {0.0*$PI}]
}
```

```

    set Freq [expr {0.0333333*(2*$PI)}]
    set Hy [expr {$Hy*$Oe*sin($Freq*$stage+$phi)}]
    set Hx [expr {$Hx*$Oe*cos($Freq*$stage+$phi)}]
    return [list $Hx $Hy 0 ]
]
}
#####Evolver#####

Specify Oxs_EulerEvolve:evolver {
}

#####Initial Magnetization#####
proc AllDown {x y z} {
    if {$y<0.15 && $x<0.5} {
        return [list 0. 1 0.]

    } else {
        return [list 0. -1 0.]
    }
}
#####Time Driver#####
Specify Oxs_TimeDriver {
    basename loop2times
    vector_field_output_format {text "%# .17g"}
    evolver :evolver
    mesh :mesh
    stage_count 60
    stopping_dm_dt 1

    Ms {Oxs_AtlasScalarField {
        atlas :atlas
        values {
            nonmagnetic 0
            magnetic 800e3
        }
    }
}
    m0 { Oxs_ScriptVectorField {
        atlas :atlas
        script AllDown
        script_args relpt
    } }

}
#####
#outputs

Destination fieldisp mmDisp:Field

Destination magdisp mmDisp:Mag

Destination datal mmDataTable:datal

Destination outdata mmArchive:outdata

```

```

#Schedule Oxs_ScriptUZeeman::Field fieldisp step 50
Schedule Oxs_StageZeeman::Field fieldisp step 50

Schedule Oxs_TimeDriver::Magnetization magdisp step 50

Schedule DataTable datal step 50

Schedule Oxs_TimeDriver::Magnetization outdata stage 1
Schedule DataTable outdata stage 10

#####
# Unused fields:
Ignore {proc RightLeft { x y z } {
    # script_args: relpt
    if {0.4<$y && $y<0.6 && $x<0.1} {
        set v -1
        return [list $v 0. 0.]

    } elseif {0.6<$y && $x<0.1} {
        set v -1
        return [list 0. $v 0.]

    } elseif {$y<0.4 && $x<0.1} {
        set v -1
        return [list 0. $v 0.]

    } else {
        set v -1
        return [list 0. $v 0.]
    }
}

}

#####
Ignore { Specify Oxs_ScriptUZeeman {
    script_args { total_time }
    script SineField
}

proc SineField { total_time } {
    set PI [expr {4*atan(1.)}]
    set Oe [expr {79.57747}]
    set Amp 129
    set Freq [expr {1e7*(2*$PI)}]
    set Hy [expr {$Amp*$Oe*cos ($Freq*$total_time)}]
    set dHy [expr {$Amp*$Oe*$Freq*(-1)*sin ($Freq*$total_time)}]
    set Hx [expr {$Amp*$Oe*sin ($Freq*$total_time)}]
    set dHx [expr {$Amp*$Oe*$Freq*cos ($Freq*$total_time)}]
    return [list $Hx $Hy 0 $dHx $dHy 0]
}

}

#####
Ignore { Specify Oxs_UniaxialAnisotropy {
    axis { 0 0 0 }
    K1 0.
}}

```

Anexo II: Leyendas de los videos

Video "SIMULACIÓN": Se ha simulado una puerta NOT con un lazo de *feedback* conectando la salida del dispositivos a la entrada de este. En la simulación vemos como la puerta NOT funciona correctamente, invirtiendo las paredes que pasan por ella.

Video "Ejemplo de simulación errónea": Se ha guardado un video demostrativo de una versión anterior del problema. En el video vemos una puerta NOT (sin el lazo de *feedback*). Vemos como la pared de dominio (en el canal inferior) se atasca a la entrada de la puerta NOT y aparece otra en el canal superior.