

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

DEPARTAMENTO DE FÍSICA DE LOS MATERIALES



TRABAJO DE FIN DE GRADO

Código de TFG: FM19

Nano-dispositivos de tipo Unión Túnel para aplicaciones en
Espintrónica

Magnetic Tunnel Junctions for Spintronics applications

Supervisor/es: Miguel Romera Rabasa

Raúl Ortega Ochoa

Grado en Física

Curso académico 2019-2020

Convocatoria Julio (1^a)

Índice

1. Introducción	2
2. Espintrónica. Fenómenos y dispositivos más relevantes	3
2.1. Corrientes polarizadas de espín en un material ferromagnético	3
2.2. Magnetorresistencia Gigante (GMR)	4
2.3. Válvulas de espín	5
2.4. Magnetorresistencia túnel (TMR)	6
2.5. Transferencia de espín	7
3. Uniones túnel magnéticas	9
4. Aplicaciones de los dispositivos de espintrónica	10
4.1. Cabezas lectoras de disco	10
4.2. Memorias MRAM, <i>Magnetic Random-Access Memory</i>	11
4.3. Memorias RaceTrack	12
5. Aplicaciones emergentes de los dispositivos de espintrónica: Computación neuromórfica con uniones túnel magnéticas	13
5.1. Memristores basados en uniones túnel como sinapsis artificiales	15
5.2. Neuronas artificiales basadas en uniones túnel	16
6. Conclusiones	17
7. Bibliografía	17

Resumen

Este trabajo se centra en el campo de la espintrónica y en particular en uno de los dispositivos espintrónicos más interesantes y con mayor potencial: las uniones túnel magnéticas. En este trabajo se describe en primer lugar los principales fenómenos físicos que explican el funcionamiento de estos dispositivos. Posteriormente se describe la estructura de las uniones túnel magnéticas y un método general de fabricación de estos dispositivos. Finalmente se tratarán las aplicaciones de estos dispositivos diferenciando entre las aplicaciones más convencionales, como las cabezas lectoras de disco, MRAM y Racetrack, y aplicaciones emergentes como la computación neuromórfica. La motivación de este trabajo es mostrar las capacidades y potencial de este tipo de dispositivos, en particular para el futuro de los sistemas de computación.

This work is focused on the field of spintronics and precisely on one of the most interesting spintronic devices: Magnetic Tunnel Junctions. This work first describes the main physical phenomena related to these devices. Then the structure of these devices and the overview of the general process of fabrication are described. To conclude, this work focuses on some of the most important applications of MTJs, distinguishing between conventional applications of said devices and new, emergent applications like neuromorphic computation. The purpose of this work is to show the capability and potential of these devices for the future of spintronics and in particular for new computational systems.

1. Introducción

Mientras los dispositivos electrónicos convencionales utilizan únicamente la carga de los electrones, los dispositivos de espintrónica utilizan además el espín de estos. El inicio de la espintrónica se sitúa en 1988 con las primeras publicaciones de Fert y Gr mberg de la magnetorresistencia gigante (GMR). La GMR permitía detectar variaciones de campos magnéticos sin necesidad de bobinas de detección. Se observó en estructuras de películas delgadas con capas alternas de material ferromagnético y material conductor no magnético.

Inicialmente, el efecto de GMR se observó para variaciones de campo grandes y a temperaturas muy bajas. Para sus aplicaciones tecnológicas se requería que el efecto se produjera a temperatura ambiente, para campos magnéticos bajos y tuviera un cociente $\Delta R/\Delta H$ grande, es decir, grandes cambios en resistencia para pequeñas variaciones de campo. En 1990 S. Parkin encuentra altos valores de GMR a temperatura ambiente en multicapas de Co/Cu crecidas por Sputtering, una técnica más rápida y simple que el MBE que utilizaron Fert y Gr mberg en el descubrimiento de la GMR. En 1991 Parkin introduce la válvula de espín, un dispositivo de GMR con el que consigue un cociente $\Delta R/\Delta H$ grande a bajo campo. En 1997 IBM introduce la tecnología GMR en las cabezas lectoras de disco. Esto se tradujo en un aumento significativo de la densidad de almacenamiento (más de dos órdenes de magnitud en menos de 10 años).

Durante los siguientes años los esfuerzos van dirigidos a aumentar la sensibilidad de los sensores de GMR. Sin embargo la siguiente revolución llegaría con la Magnetorresistencia

Túnel (TMR) que sustituye el conductor no magnético de la GMR por un aislante. En estas uniones los electrones pasan de una capa a otra por efecto túnel en lugar de por conducción Ohmnia. La llegada de las uniones Túnel aumenta la magnetorresistencia en dos órdenes de magnitud en comparación con los sensores de GMR.

Por ello la TMR acaba sustituyendo a la GMR en las cabezas lectoras de disco.

Los avances antes mencionados son algunos de los más importantes en las últimas décadas en la línea de investigación de espintrónica en metales. Este trabajo se centra en los fenómenos más importantes de esta línea de investigación, así como en los nuevos dispositivos y aplicaciones a las que ha dado lugar. Además se introducen las nuevas aplicaciones emergentes en que los dispositivos de espintrónica (en particular las uniones túnel magnéticas) pueden jugar un papel relevante en las próximas décadas.

2. Espintrónica. Fenómenos y dispositivos más relevantes

2.1. Corrientes polarizadas de espín en un material ferromagnético

El descubrimiento de la magnetorresistencia gigante (GMR) tiene origen en las investigaciones sobre la influencia del espín en la conducción eléctrica en materiales ferromagnéticos [1].

Las propiedades de conducción de los electrones en un material ferromagnético dependen de su espín. Esta dependencia de espín tiene su origen en un desequilibrio en las poblaciones de espín en el nivel de Fermi como se observa en la figura 1. Los electrones tienen entonces diferentes movibilidades en función del espín mayoritario y minoritario en las poblaciones de espín del material ferromagnético [2]. La amplitud de Scattering depende de la orientación relativa del espín de los electrones de conducción y su imanación local, de forma que esta amplitud es mayor normalmente para espines minoritarios. En consecuencia la resistividad de los electrones con espín minoritario es mayor que la de los mayoritarios.

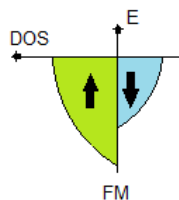


Figura 1: Diagrama de la densidad de estados (DOS) en un material ferromagnético. El desdoblamiento Zeeman de las bandas se traduce en que la población de espines mayoritarios es mayor que la de los minoritarios.

El modelo de dos corrientes [1] es un modelo sencillo de la conducción eléctrica en un material ferromagnético que considera que en metales ferromagnéticos la conducción de electrones se produce en dos canales independientes: uno para los espines cuya resistencia es baja

y otro para cuya resistencia es alta. Se denota por r a la resistencia al espín mayoritario, y R al minoritario.

2.2. Magnetorresistencia Gigante (GMR)

La magnetorresistencia gigante es el efecto de cambio en la resistencia eléctrica que se observa en estructuras de películas delgadas compuestas de capas alternas de materiales ferromagnéticos y conductor no magnético al ser sometida a un campo magnético externo. Al aplicar campo magnético se pasa de una configuración en que las imanaciones están paralelas a una en que están antiparalelas, lo que tiene asociado un cambio de la resistencia como se observa en la figura 2b.

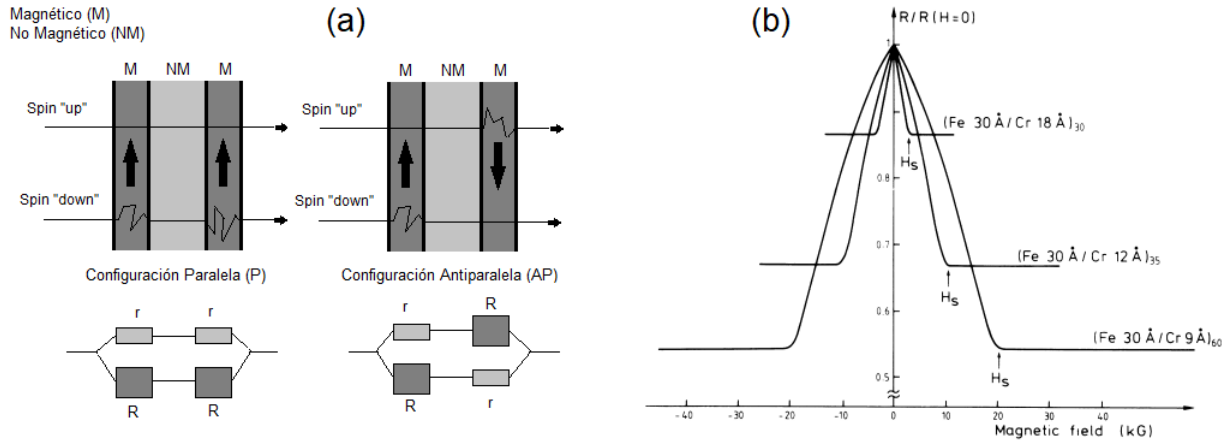


Figura 2: (a): Circuito asociado según el modelo de dos corrientes. Configuraciones paralela y antiparalela de un sistema FM/N/FM donde FM es ferromagnético y N es metal no magnético. (b): Primera prueba experimental de magnetorresistencia en 3 Fe/Cr superlattices a 4.2 K. [3] Como se puede observar se requiere de altos campos magnéticos para conseguir pequeñas variaciones de resistencia en este experimento.

Según el circuito asociado al modelo de dos corrientes que se muestra en la figura 2a, la resistencia total de la configuración paralela (P) es:

$$r_p = \frac{r_{\uparrow} + r_{\downarrow}}{r_{\uparrow} r_{\downarrow}} = \frac{2rR}{r + R} \approx 2r$$

En la configuración antiparalela (AP) la resistencia del circuito asociado es $r_{ap} = (r + R)/2$, y por tanto mayor que la resistencia de la configuración paralela. $r_{ap} > r_p$.

A partir de esto se define el coeficiente GMR:

$$GMR = \frac{r_{ap} - r_p}{r_p} = \frac{(R - r)^2}{4rR}$$

La magnetorresistencia gigante se puede observar en dispositivos con dos tipos de geometría diferente: con la polarización en el plano de la muestra, CIP (*Current in plane*), o

perpendicular al plano de la muestra, CPP (*Current perpendicular to plane*). Las dos geometrías son diferentes en cuanto a las ecuaciones teóricas que las gobiernan, el parámetro espacial crítico que gobierna el transporte en cada caso y la facilidad de su fabricación. La geometría CIP tiene asociada una fabricación más sencilla pero las ecuaciones que gobiernan el transporte son más complejas ya que, a diferencia de lo que ocurre en la geometría CPP, algunos electrones en la geometría CIP no atraviesan todas las capas de la multicapa, como puede verse en la figura 3.

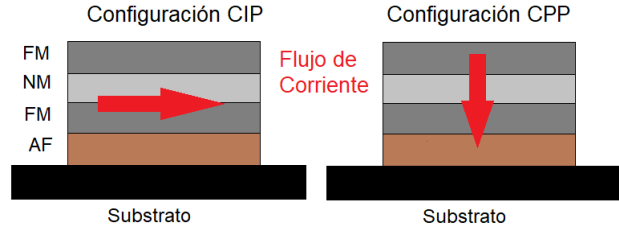


Figura 3: Esquema del flujo de corriente en multicapas con geometrías CIP y CPP. Como puede observarse en el esquema de la geometría CPP, la dirección del flujo de corriente obliga a los electrones a atravesar todas las capas de la multicapa.

El descubrimiento de la GMR abrió la posibilidad de detectar cambios de campo magnético fácilmente sin necesidad de bobinas de detección, y es el origen de muchas aplicaciones sensoras de campo magnético.

2.3. Válvulas de espín

Un requisito deseable para dispositivos de GMR es que sea posible cambiar la orientación relativa de las capas magnéticas con un campo magnético próximo a cero, que el cociente $\Delta R/\Delta H$ sea grande y tener el estado antiparalelo en un rango de campo lo más amplio posible.

Una forma de lograr esto es utilizando en las capas magnéticas materiales magnéticos duros y blandos alternados. Con un campo pequeño se puede lograr invertir la imanación de la capa blanda mientras el duro permanece inalterado, cambiando la orientación relativa de las imanaciones. Otra forma más interesante de lograrlo, ya que permite además tener el estado antiparalelo en amplios rangos de campo es la válvula de espín. En la válvula de espín una de las capas magnéticas está acoplada por canje a un material antiferromagnético (AFM), efecto que se conoce como *exchange bias*, como puede verse en la figura 4. En consecuencia la imanación de la capa acoplada al antiferromagnético queda fijada y permite invertir de forma independiente la imanación de la capa libre, logrando el estado antiparalelo en un rango de campo más amplio.

En la figura 5 se muestra una curva de magnetorresistencia gigante en una válvula de espín para campos en el rango de -200 a +800 Oe (5a) y esa misma curva ampliada para intensidades de campo magnético bajos en el rango ± 50 Oe. Nótese como se produce una gran variación en la resistencia a bajo campo. Como se mencionó anteriormente es este logro, el conseguir variaciones en la resistencia considerables a bajo campo, el responsable del éxito de las válvulas de espín frente a otro tipo de dispositivos de GMR. La válvula de espín

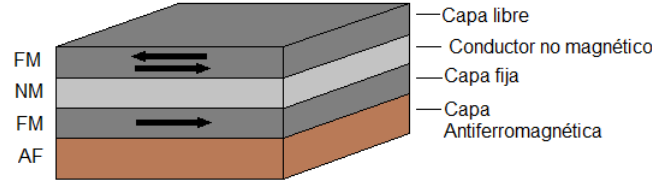


Figura 4: Diagrama válvula de espín.

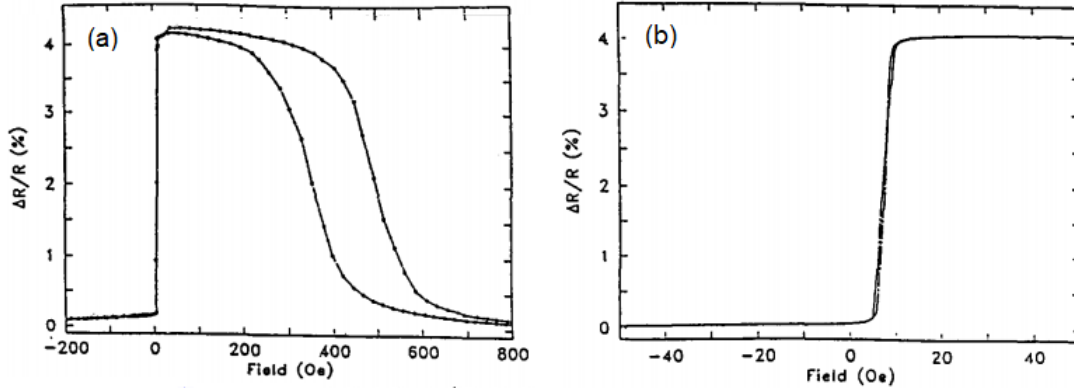


Figura 5: (a) Curva de magnetorresistencia gigante de una válvula de espín de una muestra de estructura Si/2 x(50 Å Ta/60 NiFe/22 Å Cu/40 Å NiFe/70 Å FeMn)/50 Å Ta. (b) Curva de magnetorresistencia gigante con válvula de espín ampliada para valores de campo bajos en el rango ± 50 Oe. Se observa un cambio de resistencia grande a campos próximos a cero *Dieny et al.* [4].

supuso el avance tecnológico definitivo con respecto a los dispositivos de GMR anteriores y fue introducida rápidamente en la industria como cabezas lectoras.

2.4. Magnetorresistencia túnel (TMR)

La magnetorresistencia túnel es el efecto de cambio en la resistencia eléctrica que se observa en multicapas compuestas de materiales ferromagnéticos separadas por un material aislante al ser sometidas a un campo magnético externo.

El descubrimiento de la magnetorresistencia túnel fue importante porque aumentaba la magnetorresistencia de la GMR. Tras observar el efecto de TMR en uniones túnel magnéticas (MTJs *Magnetic Tunnel Junctions*) a bajas temperaturas, Julliere propone un modelo para la TMR que considera dos canales de conducción (para electrones mayoritarios y minoritarios). Cada uno de ellos tiene una conductividad proporcional a la densidad de estados (DOS *Density of States*) del nivel de Fermi de las capas magnéticas a los lados de la barrera túnel [5]. De nuevo, nos encontramos con dos configuraciones posibles en función de la orientación relativa de la imanación de las capas magnéticas a ambos lados de la barrera túnel que se representan en la figura 6.

De acuerdo al modelo de Julliere, diferenciamos dos canales de conducción diferentes: uno para el espín *up* y otro para el espín *down*. Para la configuración paralela, la densidad de corriente de los electrones con espín *up*, G_p^\uparrow , es proporcional al producto de la densidad

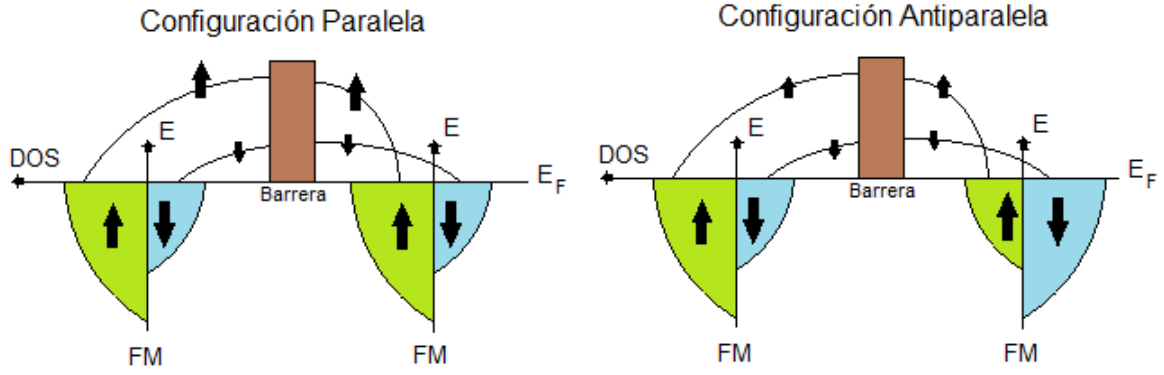


Figura 6: Diagrama de la densidad de estados en una unión túnel en las configuraciones paralela (izquierda) y antiparalela (derecha).

de estados $DOS_1^\uparrow \cdot DOS_2^\uparrow$. De la misma forma la densidad de corriente de los electrones con espín *down*, G_p^\downarrow , será proporcional al producto $DOS_1^\downarrow \cdot DOS_2^\downarrow$. Como se consideran canales de conducción independientes de acuerdo con el modelo de Julliere, la densidad de corriente total en la configuración paralela será proporcional a la suma de la corriente de los dos canales, esto es:

$$G_p \propto DOS_1^\uparrow \cdot DOS_2^\uparrow + DOS_1^\downarrow \cdot DOS_2^\downarrow$$

De igual forma, para el caso antiparalelo tenemos una densidad de corriente de espín *up* $G_{ap}^\uparrow \propto DOS_1^\uparrow \cdot DOS_2^\downarrow$ y una densidad de corriente $G_{ap}^\downarrow \propto DOS_1^\downarrow \cdot DOS_2^\uparrow$ para el canal de espín *down*. Por tanto en esta configuración la densidad de corriente total será:

$$G_{ap} \propto DOS_1^\uparrow \cdot DOS_2^\downarrow + DOS_1^\downarrow \cdot DOS_2^\uparrow$$

Y si ambos ferromagnéticos son iguales el resultado anterior se simplifica $G_{ap} \propto 2DOS_1^\uparrow \cdot DOS_2^\downarrow$. Aunque pueda no parecer obvio, se observa que $G_p > G_{ap}$, es decir, la densidad de corriente es mayor en el caso paralelo que en el antiparalelo.

Se define entonces un coeficiente TMR:

$$TMR = \frac{\Delta G}{G} = \frac{G_{ap} - G_p}{G_p}$$

El modelo de Julliere es un modelo sencillo que no tiene en cuenta algunos efectos que hoy conocemos y son importantes en MTJ, por ejemplo efectos de la barrera túnel como filtro de espín. Sin embargo es suficiente para describir los efectos considerados aquí.

2.5. Transferencia de espín

Los efectos anteriores permiten conocer la configuración de la imanación de sistemas magnéticos. En 1996 J.C Slonczewski [6] y L. Berger [7] predicen un efecto que permite manipular la imanación de un nano-imán sin aplicar campos magnéticos.

Para describir el efecto de transferencia de espín (*Spin Transfer Torque*, STT) consideremos un sistema formado por dos capas magnéticas separadas por un material no magnético.

Al inyectar una corriente en este sistema los electrones de conducción se polarizan en la primera capa magnética alineando su espín en la dirección de la imanación en la primera capa magnética.

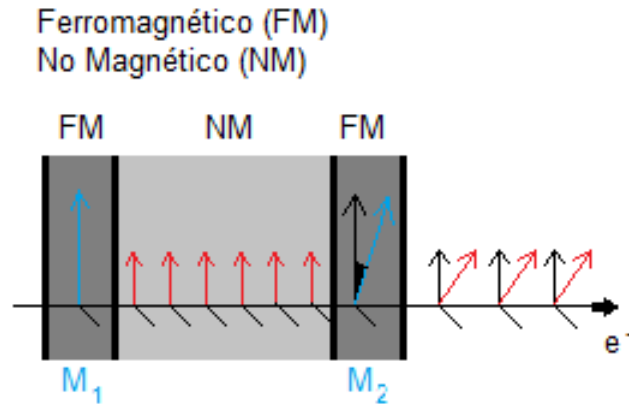


Figura 7: Diagrama Transferencia de espín.

La corriente polarizada en la dirección de imanación de la primera capa, que puede verse en la figura 7 representada con el color rojo, llega a la segunda capa magnética y encuentra la imanación rotada un ángulo. Los electrones de conducción se polarizan de espín en la dirección de la imanación de esta capa (véase en la figura 7 a la derecha de la segunda capa magnética) y debido a que el momento angular se conserva, los electrones ceden momento angular a la imanación local de la segunda capa, sobre la que aparece un par de fuerzas.

Este par de fuerzas puede provocar cambios en la configuración magnética del material. Se llama *densidad de corriente crítica* a la densidad de corriente a partir de la cual los efectos de la transferencia de espín son apreciables. El efecto de transferencia de espín necesita densidades de corriente altas, por lo que solo se observa a escala nanométrica.

La transferencia de espín abre la puerta a manipular la imanación de un material sin campos magnéticos, lo que permite reducir el tamaño de los dispositivos y aumentar su eficiencia energética. Este efecto permite, por ejemplo, invertir la imanación de una capa magnética en un dispositivo de GMR o una unión túnel pudiendo pasar de una configuración paralela a una antiparalela con corriente eléctrica. Por lo tanto puede utilizarse para escribir bits de información en memorias magnéticas de tipo MRAM.

Bajo ciertas condiciones también es posible provocar una precesión controlada de la imanación de un nano-ímán. Esta precesión se traduce en la emisión de señales en el rango de microondas por lo que estos dispositivos tienen interés como emisores de radiofrecuencia. El efecto de transferencia de espín tiene también interés en memorias magnéticas alternativas como la memoria Race-Track [8], propuesta por IBM y que se encuentra en desarrollo. Estas aplicaciones serán descritas en mayor detalle en la sección 4 sobre aplicaciones de los dispositivos de espintrónica.

3. Uniones túnel magnéticas

En las secciones anteriores se han introducido los conceptos más generales de espintrónica y se han descrito algunos de los dispositivos más importantes, como las válvulas de espín dentro de la familia de los dispositivos de GMR. A continuación el trabajo se centra en las uniones túnel magnéticas.

Las uniones túnel magnéticas son una familia de dispositivos de magnetorresistencia túnel particularmente interesantes. Estos dispositivos se utilizan en aplicaciones industriales ya que logran mejores efectos magnetorresistivos que sus antecesores los dispositivos de GMR, a los que han sustituido. En la actualidad se fabrican uniones túnel magnéticas de hasta 10 nm de tamaño, lo que permite diseñar sistemas basados en MTJs más densos y más eficientes energéticamente. Estas dos características, bajo consumo energético y la posibilidad de crear redes densas de MTJs, junto con la gran versatilidad de estos dispositivos, los hacen especialmente interesantes para el diseño de nuevas memorias de ordenadores o aplicaciones emergentes como la computación neuromórfica, inspirada en la arquitectura del cerebro. Las aplicaciones de estos dispositivos se describen con más detalle en las secciones 4 y 5.

A diferencia de los dispositivos GMR, la estructura de una unión túnel consta de dos materiales ferromagnéticos separados por un aislante. De forma que el transporte de los electrones desde una capa de material ferromagnético a la otra se produce por el efecto túnel. Las uniones túnel son dispositivos delicados, con una barrera túnel de espesor muy pequeño (alrededor de 1 nm) que debe tener gran calidad. Su fabricación es por tanto delicada y compleja.

A continuación se describe de forma breve el proceso de fabricación de una unión túnel [9]. La figura 8 muestra el proceso de fabricación de una unión túnel magnética. En primer lugar se depositan las capas de los distintos materiales sobre el sustrato, para lo que se pueden utilizar diferentes técnicas de crecimiento de materiales como MBE o sputtering ((1) en la figura 8). En segundo lugar se realiza una litografía (si el dispositivo es pequeño, será una litografía por haz de electrones): se aplica una resina sensible sobre la capa superior, se expone la resina (a un haz electrónico o UV según se utilice litografía óptica o electrónica) y se diluye la resina revelando las zonas expuestas ((2.a), (2.b) y (2.c) en la figura 8). En tercer lugar se realiza un proceso de ataque físico o químico (por ejemplo, ataque físico por haces de iones) atacando las capas expuestas hasta el contacto inferior, definiendo el dispositivo ((3) en la figura 8). Posteriormente se recubre con aislante el dispositivo ((4) en la figura 8). En quinto lugar se aplica una resina sensible de nuevo, se expone la zona donde se va a poner el contacto del electrodo y se diluye la resina. En sexto lugar se ataca de nuevo la zona expuesta por la resina hasta el electrodo superior y por último se deposita el contacto con este electrodo.

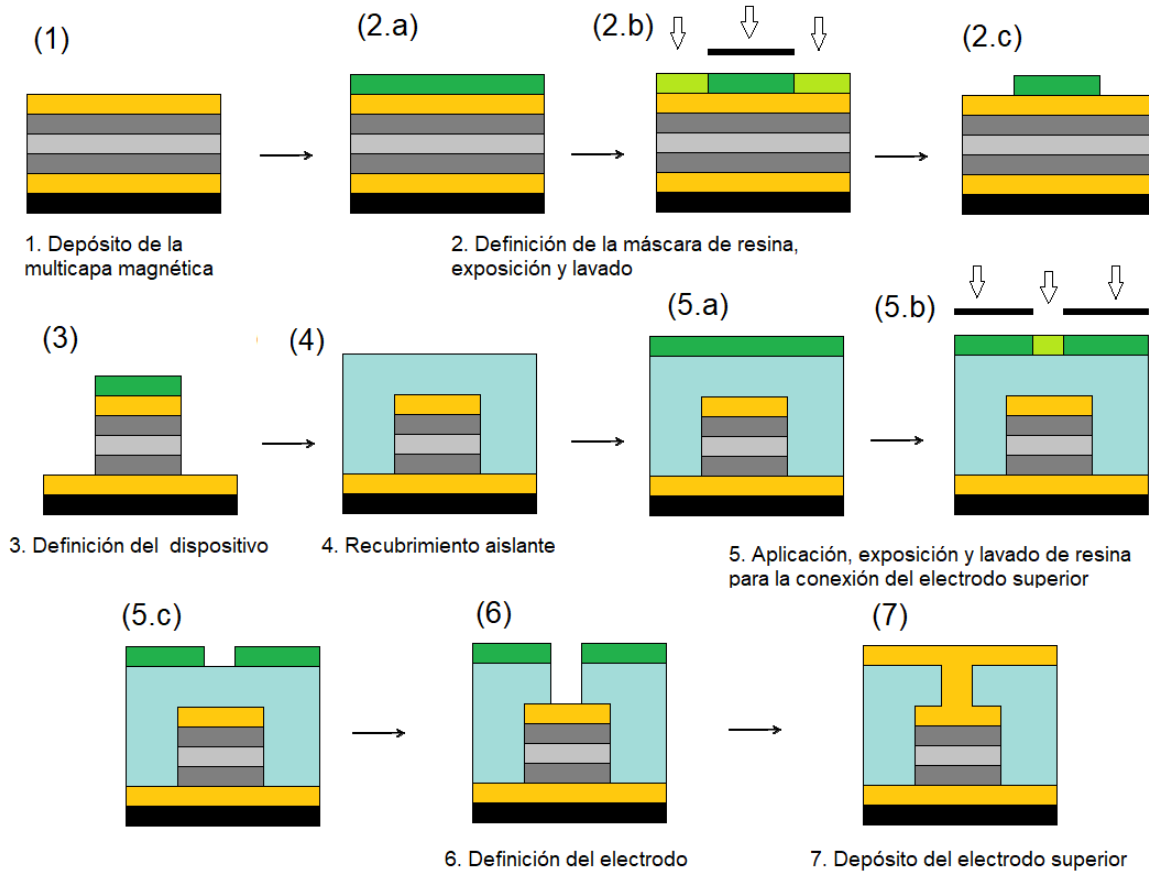


Figura 8: Esquema del proceso de fabricación de una unión túnel: La capa de color negro representa el sustrato, las capas amarillas representan los electrodos superior e inferior, la gris oscuro representa el material FM, el gris claro el aislante, la verde oscuro representa la resina sin exponer, la verde claro representa resina expuesta y el azul claro representa el aislante.

4. Aplicaciones de los dispositivos de espintrónica

A continuación se tratan algunas de las aplicaciones más importantes de los dispositivos de espintrónica, especialmente de las uniones túnel magnéticas. En contraste con la sección siguiente, sección 5, que se centra en nuevos campos de aplicación para dispositivos de espintrónica emergentes.

4.1. Cabezas lectoras de disco

Las cabezas lectoras de discos duros con MTJs son el dispositivo de espintrónica más utilizado en el mercado y son el primer dispositivo industrial en el que se introdujeron de forma masiva las uniones túnel magnéticas. Las cabezas lectoras son las responsables de leer la información del disco duro. La información en el disco duro en los ordenadores convencionales está almacenada en bits magnéticos. Estos bits generan un campo magnético distinto

dependiendo de si el bit es un 1 o un 0.

Antes de la introducción de dispositivos de magnetorresistencia las cabezas lectoras utilizaban pequeñas bobinas para leer la dirección de imanación de los bits a partir de la dirección de la corriente eléctrica inducida en esas bobinas. La necesidad de las bobinas para detectar el campo magnético emitido por los bits suponía una limitación para reducir el tamaño de las cabezas lectoras y los bits, y por tanto para aumentar la densidad de almacenamiento de los discos duros. En 1990 IBM introduce por primera vez un dispositivo de magnetorresistencia como cabeza lectora, son las cabezas de Magnetorresistencia Anisotrópa (AMR *Anisotropic magnetoresistive*, con el modelo IBM 9345 HDD). Después llegarían las cabezas de GMR, en 1997 (IBM DTTA-351680 (Deskstar 16GP) HDD) y finalmente las cabezas de TMR en 2004 (Seagate 100 GB Backup Plus circa 3Q 2004).

En estos dispositivos de magnetorresistencia el campo magnético generado por los bits magnéticos produce cambios en la resistencia de las cabezas lectoras que son por tanto capaces de detectar el estado magnético del bit. En particular, en las uniones túnel magnéticas, este campo magnético provoca la inversión de la imanación de la capa libre del dispositivo, dando lugar al estado paralelo y antiparalelo de las imanaciones para bits 1 y 0 respectivamente. El estado del bit se detecta mediante el efecto de TMR. En los primeros dispositivos de AMR estos cambios de resistencia eran pequeños, pero fueron mejorando con la llegada de la GMR y finalmente la TMR. Conseguir grandes cambios en la resistencia a bajo campo y no utilizar bobinas permitió reducir el tamaño de los bits y las cabezas lectoras aumentando la densidad de información almacenada en las memorias.

4.2. Memorias MRAM, *Magnetic Random-Access Memory*

Las MRAM son un tipo de memorias que almacenan la información en la imanación de la capa libre de los dispositivos de unión túnel magnética. La información almacenada en estos bits se recupera por tanto midiendo la resistencia eléctrica de las celdas mediante TMR, lo cual permite miniaturizar las cabezas lectoras. Sin embargo, la escritura en el diseño clásico de las MRAM se realiza induciendo pequeños campos magnéticos mediante líneas de corriente que modifican el estado magnético de la capa libre de la unión túnel magnética, lo que hace que las cabezas de escritura sean de mayor tamaño y menos eficientes energéticamente (Véase la figura 9a). En la actualidad, en las STT-MRAM, una variante de las memorias anteriores, el proceso de escritura se realiza mediante transferencia de espín, lo que reduce la corriente necesaria para la escritura y permite aumentar la densidad de almacenamiento (véase la figura 9b, donde se representa una celda de STT-MRAM comparada con la celda MRAM convencional de la figura 9a, de mucho mayor tamaño).

Sin embargo al miniaturizar las uniones túnel magnéticas donde se almacena la información de estas memorias los dispositivos dejan de ser fidedignos debido a que son susceptibles a fluctuaciones térmicas y empeora por ello el ratio señal-ruido. Como ya se menciona anteriormente, una de las características clave que se busca en los nuevos diseños de memorias es una alta densidad de almacenamiento de la información. El límite térmico impone una cota

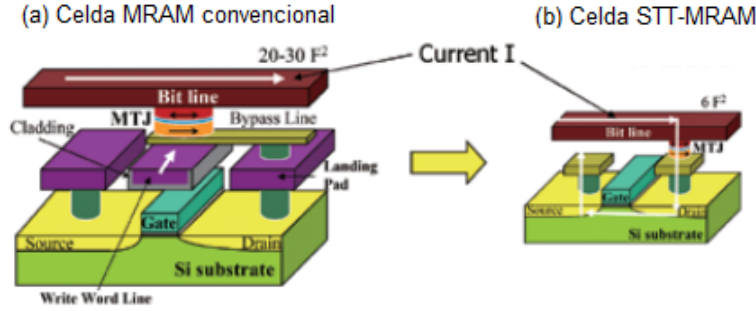


Figura 9: Esquema de la estructura de una celda MRAM (izquierda) y una celda STT-MRAM (derecha). La escritura de los bits mediante transferencia de espín permite miniaturizar el bit y la cabeza de escritura, con lo que se logra aumentar la densidad de almacenamiento [10].

a la densidad de almacenamiento de la información de las memorias STT-MRAM. Otros diseños de memorias emergentes, como las memorias Racetrack, de las que se trata a continuación, prometen solucionar este problema con un nuevo enfoque. Las Memorias STT-RAM se encuentran en el mercado desde 2016.

4.3. Memorias RaceTrack

Aunque las memorias Racetrack no almacenan la información en MTJs como las MRAM sino en dominios magnéticos en nanohilos se han incluido en este trabajo por ser una de las aplicaciones más interesantes de los dispositivos de espintrónica. Como se menciona anteriormente, una de las limitaciones de las memorias MRAM es crear una celda MTJ de tamaño mínimo posible y estable frente a fluctuaciones térmicas, ya que al miniaturizar estos dispositivos el ratio ruido-síñal aumenta dificultando la lectura de los bits y pone en compromiso la información almacenada. Estos problemas de las memorias MRAM pueden solucionarse con las memorias RaceTrack [11].

Una de las características más innovadoras de las memorias RaceTrack es que no tienen partes móviles. A diferencia de la MRAM u otras memorias convencionales, donde la cabeza lectora tiene que moverse hasta donde se encuentran los bits para leerlos, en las memorias RaceTrack no se mueven las cabezas lectoras sino que son los bits los que se mueven hasta la cabeza lectora. La información se encuentra almacenada en dominios magnéticos en nanohilos (véase figura 10, donde se representan los bits de información con los colores rojo y azul sobre el nanohilo). Al hacer pasar corriente por el nanohilo, gracias al efecto de transferencia de espín, la corriente transfiere momento angular de espín de los electrones de conducción a los momentos magnéticos en las paredes de dominio lo que hace que estas se desplacen y con ellas los bits de información hasta llegar a la cabeza lectora (situada en la parte inferior del nanohilo en la figura (10)). Este principio fue probado por primera vez en Permalloy, donde la polarización de espín de la corriente es del 70 % y los movimientos de las paredes de dominio pueden alcanzar velocidades de 100 m/s en la dirección de movimiento de los electrones para densidades de corriente de 10^8 A/cm^2 [12].

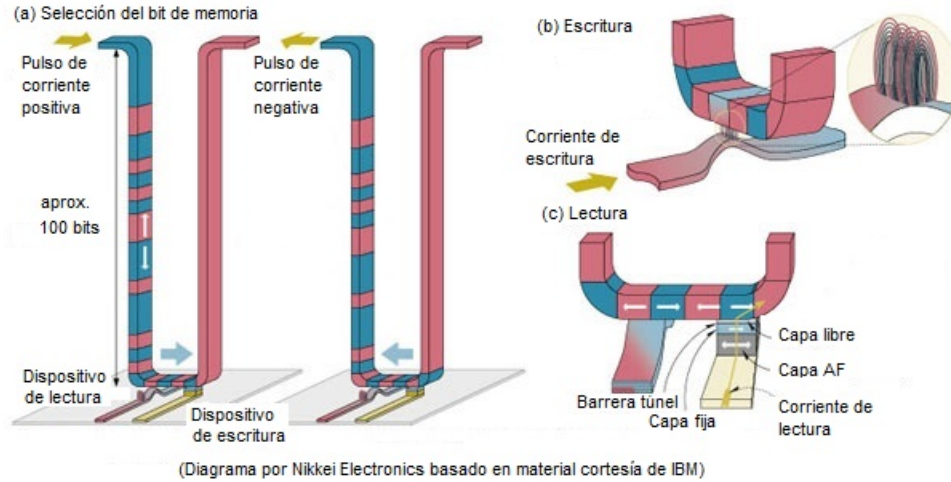


Figura 10: Esquema de un nanohilo de memoria Racetrack. En la figura de la izquierda vemos el nanohilo completo con forma de U, donde los bits de información están representados por los colores rojo y azul y el dispositivo lector y el dispositivo de escritura se encuentran en el valle de la U. En las imágenes de la derecha vemos el valle de la U, donde se encuentran los dispositivos de lectura y escritura, ampliados.

Gracias a que las paredes se desplazan por el nanohilo a altas velocidades, el diseño tridimensional de los nanohilos, y como estas memorias no contienen partes móviles, las memorias Racetrack prometen superar a las memorias convencionales en velocidad y densidad de almacenamiento. Sin embargo en la actualidad necesitan intensidades de corriente altas para poder mover las paredes de dominio magnético, lo que las hace menos eficientes energéticamente que otras memorias como STT-MRAM o las memorias Flash. Otra dificultad que presentan es el carácter estocástico del movimiento de las paredes de dominio magnético [13].

5. Aplicaciones emergentes de los dispositivos de espintrónica: Computación neuromórfica con uniones túnel magnéticas

Hasta ahora se han tratado algunas de las aplicaciones más convencionales de la espintrónica, en las que se lleva trabajando desde el descubrimiento de la transferencia de espín. Recientemente han surgido nuevas propuestas para aplicaciones de MTJs y dispositivos de espintrónica. A continuación se describen algunas de ellas, pertenecientes al campo emergente de la computación neuromórfica.

El objetivo de la computación neuromórfica es desarrollar arquitecturas de computación basadas o inspiradas por el cerebro. Es un campo emergente de gran interés potencial para intentar resolver desafíos llegados de campos de gran actualidad como la inteligencia artificial o el big data.

En primer lugar veamos por qué es interesante tomar inspiración del cerebro para realizar dispositivos de computación. Los sistemas neuronales tienen una arquitectura masivamente

paralela compuesta de unidades de procesamiento (neuronas) muy interconectadas (mediante sinapsis) que actúan como memorias. Los ordenadores convencionales tienen la memoria y el procesador separados físicamente con lo que la información debe trasladarse de uno al otro, consumiendo más energía y haciendo el proceso más lento que si memoria y procesamiento estuvieran entrelazados. Esto es especialmente notable cuando tratamos con grandes cantidades de datos (Big Data). Los sistemas neuronales, gracias a su arquitectura paralela y a tener memoria y procesador entrelazados, son más eficientes y más rápidos. Otra ventaja de los sistemas neuronales es su tolerancia a fallos. Un ejemplo de ello es su capacidad de reconocimiento facial a partir de datos incompletos o en presencia de ruido.

Las interconexiones entre neuronas son plásticas, su capacidad de transmitir información es adaptable, lo que permite el aprendizaje. El rendimiento de los sistemas neuronales depende fuertemente del grado de conexión, el ratio entre número de conexiones y número de neuronas. Esto obliga a reducir el tamaño de las interconexiones todo lo posible.

Una prueba de las ventajas y capacidades de utilizar redes neuronales la podemos ver prácticamente día a día con asistentes de Smartphones capaces de reconocer comandos de voz. Sin embargo las redes neuronales en software siguen consumiendo mucha energía, ya que las operaciones a bajo nivel las realiza un ordenador con una arquitectura que no es de un sistema neuronal. El objetivo, por tanto es implementar redes neuronales en hardware.

Es posible imitar arquitecturas neuronales con CMOS [14]. Sin embargo las neuronas y sinapsis CMOS son demasiado grandes. Para poner gran cantidad de neuronas y sinapsis en un chip hacen falta dispositivos más pequeños, de escala nanométrica. Existen diferentes propuestas de dispositivos que pueden replicar la función de neuronas o sinapsis. Este trabajo se centra en la posibilidad de usar uniones túnel magnéticas como neuronas y sinapsis.

Veamos por qué es interesante usar espintrónica para implementar la red neuronal. Las neuronas biológicas reciben estímulos eléctricos de neuronas precedentes y responden a estos de manera no lineal, los estímulos recibidos aumentan el voltaje en la membrana neuronal. La neurona a su vez emite pulsos eléctricos con una frecuencia media que depende de forma no lineal en el voltaje. En espintrónica, por ejemplo, los nano-osciladores de ST convierten su input de corriente d.c en oscilaciones cuya frecuencia depende de manera no lineal de esa corriente, lo que sugiere que pueden utilizarse para imitar la no-linealidad de las neuronas. Por otro lado, la plasticidad de las sinapsis es la propiedad que permite a las sinapsis reconfigurar la intensidad de la conexión entre neuronas de acuerdo al historial de actividad entre ellas. En el cerebro es esta propiedad la que permite crear y almacenar información. En la redes neuronales artificiales la plasticidad de las sinapsis permite el aprendizaje y la adaptabilidad a nuevos entornos. El dispositivo de estado sólido que mejor reproduce las propiedades de las sinapsis en hardware es el memristor. Los memristores son un elemento de circuito con resistencia programable, lo que los hace buenos candidatos para imitar la plasticidad de las sinapsis. Existen muchos tipos de memristores diferentes. En este trabajo se describen memristores basados en uniones túnel magnéticas.

Es particularmente interesante que dispositivos similares puedan hacer de neuronas y

sinapsis para así implementar toda la red neuronal con el mismo tipo de materiales y dispositivos. Las uniones túnel magnéticas ya están introducidas en la industria y se fabrican en grandes cantidades en placas de tecnología CMOS, y son por tanto una tecnología madura.

5.1. Memristores basados en uniones túnel como sinapsis artificiales

La plasticidad de las sinapsis puede ser implementada en la memoria de los memristores. Un memristor (de *memory resistor*) es un nano-resistor con un efecto de memoria analógica no-volátil controlable con pulsos de voltaje. Tienen gran potencial como memorias digitales multi-nivel y como nano-sinapsis en circuitos neuromórficos para una computación rápida, de bajo consumo energético y tolerante a defectos.

Recientemente se ha desarrollado experimentalmente un memristor de spin-torque basado en una unión túnel en cuya capa libre se estabiliza una pared de dominio magnética [15]. El dispositivo se ha diseñado con una geometría particular (Figura 11b, derecha) para favorecer la creación y el desplazamiento de la pared de dominio. En la figura 11b izquierda se puede ver la estructura de la unión túnel, con la pared de dominio de anchura Δ en la capa libre. Las corrientes para leer o escribir los estados de resistencia son inyectadas perpendicularmente a las capas magnéticas como se puede ver en la figura. Utilizando el efecto de transferencia de espín, la corriente desplaza la pared de dominio magnético hacia el estado AP o P en función del signo de la corriente inyectada. Inyectando corriente de signo negativo la pared de dominio se desplaza hacia el estado AP y con signo positivo se desplaza hacia el estado P. Durante este proceso la pared de dominio magnético queda fijada en los defectos diseñados en los ejes de la superficie de la muestra, lo que da lugar a los múltiples niveles de resistencia que observamos en la figura 11c, que muestra la evolución de la resistencia de la unión túnel en función de la corriente d.c inyectada perpendicularmente a las capas.

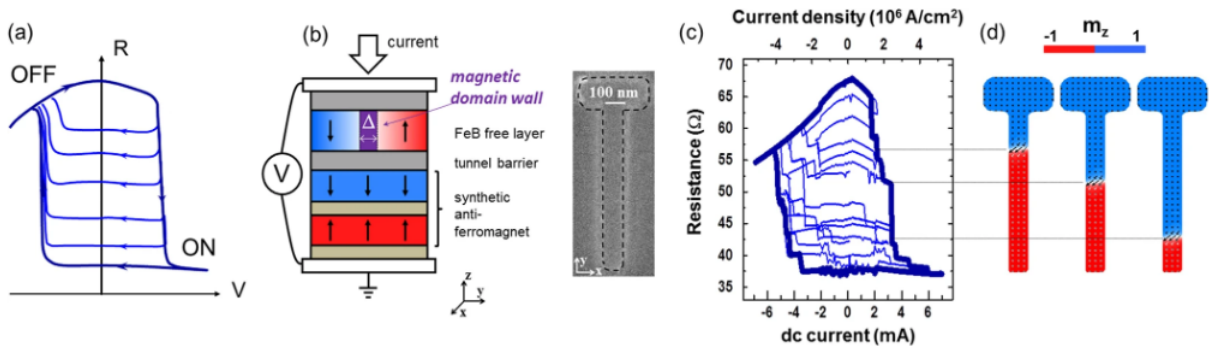


Figura 11: (a): Ciclos de resistencia frente voltaje característicos de un memristor. (b) (izq): Vista lateral del esquema de la unión túnel (dcha): vista aérea de la unión túnel. (c): resistencia como función de la corriente d.c inyectada, nótese la similitud con la figura (a). (d): Simulaciones micromagnéticas de la pared de dominio magnético moviéndose en la "track" magnética [15].

En otro trabajo teórico, *D.Querlioz et al*, se ha demostrado que usando desde 7 a 10

uniones túnel como sinapsis binarias es posible reconocer dígitos escritos a mano con un ratio superior a 75 % [16]. Este resultado teórico, trasladado a memristores, es equivalente [15] a 13-19 niveles de resistencia en un memristor. Para los 5 memristores de espín-torque que midieron encontraron entre 15 y 20 estados de resistencia intermedios, lo que los hace suficientes para realizar tareas de clasificación.

5.2. Neuronas artificiales basadas en uniones túnel

Un nano-oscilador de ST es un dispositivo que emplea una corriente d.c. para inducir una precesión en la magnetización. En presencia de un campo magnético externo la imanación precesa alrededor de este campo y se relaja en su dirección debido al *damping*. Al aplicar corriente, gracias a la transferencia de espín, se puede compensar el *damping* logrando una precesión estable de la imanación. Este efecto tiene gran potencial en tecnologías de información y comunicación. Una de sus ventajas es que pueden abarcar un amplio espectro de frecuencias (desde centenas de MHz a varias decenas de GHz) cambiando los materiales y geometrías de las que dependen las órbitas de precesión. Además, debido a su naturaleza no lineal puede modificarse la frecuencia fácil y rápidamente variando la corriente aplicada.

Las neuronas y los nano-osciladores de espín presentan importantes paralelismos, uno de los más importantes es su naturaleza no lineal. La característica más importante de las neuronas es que realizan una transformación no lineal de los inputs que reciben de neuronas precedentes. Esto es lo que permite a las neuronas realizar complejas tareas de computación, tanto en el cerebro como en las redes neuronales artificiales. Entrar en profundidad y detalle en esto queda fuera del objetivo de este trabajo. Los Nano-osciladores de ST son buenos candidatos a imitar el comportamiento de las neuronas biológicas en sistemas neuromórficos ya que son dispositivos pequeños, eficientes energéticamente y su naturaleza es no lineal, ya que como se mencionó anteriormente los STOs convierten su input de corriente d.c en oscilaciones cuya frecuencia depende de manera no lineal de esa corriente. Una dificultad en utilizar nano-dispositivos magnéticos como neuronas es que debido a su pequeño tamaño estos dispositivos tienden a ser muy sensibles a fluctuaciones térmicas.

A pesar de esta dificultad, en 2017 los osciladores de transferencia de espín se utilizaron en la primera demostración experimental de una nano-neurona [17]. En este trabajo se demostró que a pesar de su pequeño tamaño, estos dispositivos son suficientemente estables para ser capaces de reconocer dígitos pronunciados por distintos oradores con un reconocimiento superior al 99.6 % gracias a la combinación de su no-linealidad, su estabilidad y alto factor de calidad (alta relación señal/ruido).

En esta línea cabe resaltar el reciente logro de fabricar una red neuronal de 4 neuronas de nano-osciladores de ST interconectados que ha demostrado capacidades de aprendizaje para reconocer vocales habladas [18].

Otros trabajos proponen usar osciladores de transferencia de espín utilizando una estrategia alternativa. El cerebro y sus componentes operan en lo que se conoce como el límite térmico [19]. Las neuronas tienen comportamiento estocástico [20], por eso consumen muy

poca energía. A pesar de ello las operaciones en el cerebro son fidedignas [21], una explicación de esta propiedad del cerebro es que el cerebro compensa el ruido y variabilidad de los elementos individuales que lo componen con redundancia [22]. El cerebro encuentra el balance óptimo entre reducir el consumo de energía y la fidedignidad de sus operaciones muy cerca del límite térmico. En espintrónica podemos lograr una estrategia similar utilizando uniones túnel magnéticas estocásticas. Estos dispositivos son diseñados para tener una capa libre superparamagnética, cuya imanación se invierte de manera estocástica por fluctuaciones térmicas. Esta estocasticidad se ha utilizado para imitar la estocasticidad de las neuronas, consiguiendo imitar la curva de aprendizaje de las neuronas y probando que poblaciones de uniones pueden realizar transformaciones no lineales con precisión [23].

Al trabajar en el límite térmico el consumo de estos dispositivos se reduce mucho y permite reducir su tamaño por debajo de 20 nm.

6. Conclusiones

La espintrónica ha abierto las puertas a una gran variedad de nuevos dispositivos candidatos a complementar o sustituir en ciertas tareas a memorias y arquitecturas de computación clásicas para una computación de bajo consumo y mayor densidad de almacenamiento. Algunos de estos dispositivos ya están en el mercado, como las cabezas lectoras de discos duros o las memorias STT-RAM. En este trabajo se ha querido destacar además el potencial que tienen las uniones túnel magnéticas para el diseño de arquitecturas de computación más novedosas, inspiradas por el cerebro.

Se espera que estas arquitecturas sean más rápidas, de menor consumo que los ordenadores convencionales y capaces de realizar tareas cognitivas como clasificación, lo que supone un factor clave en la era del Big Data y la Inteligencia Artificial.

7. Bibliografía

- [1] F. Mott, Proc. Roy.Soc A153,699 (1936)
- [2] A. Barthélémy et al, Magnetoresistance and spin electronics (2002)
- [3] Baibich, Mario Broto, Jean-Marc Fert, AF F, Nguyen Petroff, Frederic Etienne, P.E. Creuzet, G Friederich, A Chazelas, J. (1988). Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices. Physical review letters. 61. 2472-2475. 10.1103/PhysRevLett.61.2472.
- [4] Dieny, B. (1994). Giant magnetoresistance in spin-valve multilayers. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 136(3), 335–359. doi:10.1016/0304-8853(94)00356-4.
- [5] M. Julliere (1975). "Tunneling between ferromagnetic films". Phys. Lett. 54A (3): 225–226. Bibcode:1975PhLA...54..225J. doi:10.1016/0375-9601(75)90174-7
- [6] J. C. Slonczewski, Current-driven excitation of magnetic multilayers, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 159, pp. L 1-L7, 1996.
- [7] Berger L. Emission of spin waves by a magnetic multilayer traversed by a current. Phys Rev B Condens Matter. 1996;54(13):9353-9358. doi:10.1103/physrevb.54.9353
- [8] S. Parkin et al, Current-Controlled Magnetic Domain-Wall Nanowire Shift Register (2008)

- [9] Singh, J. P., Bhardwaj, R., Sharma, A., Kaur, B., Won, S. O., Gautam, S., Chae, K. H. (2019). Fabrication of Magnetic Tunnel Junctions. *Advanced Applications in Manufacturing Engineering*, 53–77. doi:10.1016/b978-0-08-102414-0.00002-1.
- [10] Huai, Yiming. (2008). Spin-transfer torque MRAM (STT-MRAM): Challenges and prospects. *AAPPS Bulletin*. 18.
- [11] Parkin, S., Yang, S. Memory on the racetrack. *Nature Nanotech* 10, 195–198 (2015).
- [12] Vlaminck, V. Bailleul, M. *Science* 322, 410–413 (2008).
- [13] Kumar, D.; Jin, T.; Risi, S. Al; Sbiaa, R.; Lew, W. S.; Piramanayagam, S. N. (March 2019). "Domain Wall Motion Control for Racetrack Memory Applications". *IEEE Transactions on Magnetics*. 55 (3): 2876622.
- [14] M. Walker, P. Hasler and L. Akers, "A CMOS neural network for pattern association," in *IEEE Micro*, vol. 9, no. 5, pp. 68–74, Oct. 1989, doi: 10.1109/40.45828.
- [15] Lequeux, S., Sampaio, J., Cros, V. et al. A magnetic synapse: multilevel spin-torque memristor with perpendicular anisotropy. *Sci Rep* 6, 31510 (2016).
- [16] D. Querlioz, O. Bichler, A. F. Vincent and C. Gamrat, "Bioinspired Programming of Memory Devices for Implementing an Inference Engine," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 103, no. 8, pp. 1398–1416, Aug. 2015, doi: 10.1109/JPROC.2015.2437616.
- [17] Torrejon, J., Riou, M., Araujo, F. et al. Neuro-morphic computing with nanoscale spintronic oscillators. *Nature* 547, 428–431 (2017).
- [18] Romera, M., Talatchian, P., Tsunegi, S. et al. Vowel recognition with four coupled spin-torque nano-oscillators. *Nature* 563, 230–234 (2018).
- [19] R. B. Stein, E. R. Gossen, and K. E. Jones, "Neuronal variability: Noise or part of the signal?" *Nature Rev. Neurosci.*, vol. 6, no. 5, pp. 389–397, May 2005.
- [20] A. A. Faisal, L. P. J. Selen, and D. M. Wolpert, "Noise in the nervous system," *Nature Rev. Neurosci.*, vol. 9, no. 4, pp. 292–303, Apr. 2008.
- [21] M. D. McDonnell and L. M. Ward, "The benefits of noise in neural systems: Bridging theory and experiment," *Nature Rev. Neurosci.*, vol. 12, no. 7, pp. 415–426, Jul. 2011.
- [22] B. B. Averbeck, P. E. Latham, and A. Pouget, "Neural correlations, population coding and computation," *Nature Rev. Neurosci.*, vol. 7, no. 5, pp. 358–366, May 2006.
- [23] Mizrahi, Alice Hirtzlin, Tifenn Fukushima, Akio Kubota, Hitoshi Yuasa, Shinji Grollier, Julie Querlioz, Damien. (2018). Neural-like computing with populations of superparamagnetic basis functions. *Nature Communications*. 9. 10.1038/s41467-018-03963-w.