

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIA
Departamento de Física



**SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN MAGNETOELÉCTRICA
DE PSEUDO VÁLVULAS DE ESPÍN DE Pd/Co CON
ANISOTROPÍA MAGNÉTICA PERPENDICULAR**

Fabián Nicolás Araneda Martínez

Profesor Guía:

Juliano C. Denardin

Simón Oyarzún

**Tesis para optar al Título Profesional de
Ingeniero Físico**

Santiago – Chile

2016

© Fabián Nicolás Araneda Martínez, 2016

Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial Chile 3.0

Resumen

En este trabajo se fabricaron pseudo válvulas de espín de Pd/Co con anisotropía magnética perpendicular sobre un sustrato de vidrio mediante pulverización catódica (*sputtering*), utilizando un separador de Cu. Se estudió el efecto de la variación del espesor del Cu y el efecto de depositar Co en el separador. Las pseudo válvulas de espín se caracterizaron magnetoeléctricamente a partir de mediciones de magnetización, magnetorresistencia y Efecto Hall.

Se observó que las pseudo válvulas de espín efectivamente poseen anisotropía magnética perpendicular al plano de la película. También se observó que las curvas de magnetización de las pseudo válvulas de espín se caracterizan por presentar una transición tipo escalón, que es el que separa los dos sistemas magnéticos, y que coincide con los dos máximos que entrega la medida de magnetorresistencia, obteniendo resultados consistentes entre la caracterización eléctrica y magnética. También se observó que el campo coercitivo, de la capa dura, aumenta mientras mayor es el espesor del Cu y que al depositar Co en el separador este efecto se acrecienta. Finalmente se obtuvieron dos máximos bien definidos de magnetorresistencia a 300 K, llegando a valores porcentuales de 0,2%, por lo que las pseudo válvulas de espín con las que se trabajó, tienen un gran potencial de ser usadas en la fabricación de sensores magnéticos.

Palabras claves: Pseudo válvulas de espín, anisotropía magnética perpendicular, magnetorresistencia gigante, Efecto Hall extraordinario, espintrónica.

Agradecimientos

Primero que todo, quiero agradecer a mi madre Maritza Martínez y a mi padre Iván Araneda, por la confianza y el apoyo incondicional que me brindaron durante todo el periodo que estuve en la universidad, ya que fueron fundamentales para mi desarrollo académico. También quiero agradecerles a cada uno de mis hermanos, hermanas y familiares, por los buenos deseos que siempre me entregaron. Y de forma especial quiero agradecerle a mi abuela Carmen por todo el cariño y apoyo que me brindó al recibirme en su hogar durante mi último año universitario, transformándose en una segunda madre para mí.

También quiero agradecerle a mi profesor tutor Juliano Casagrande Denardin, por todo lo que me ayudó en mi formación profesional durante el tiempo que estuve trabajando en el Laboratorio de Magnetismo y agradecerle por enseñarme a usar los equipos de caracterización magnetoeléctrica que necesité para el desarrollo de esta tesis. Por otro lado, quiero agradecerle a mi otro profesor tutor, Simón Oyarzún, y al profesor Sebastián Michea, por toda la ayuda que me brindaron para el desarrollo de este trabajo de tesis, y porque siempre estuvieron dispuestos a resolver cada una de las dudas que me iban surgiendo.

Agradecerles también a cada uno de mis compañeros de laboratorio por cada uno de los consejos que me dieron, por la buena disposición que siempre tuvieron conmigo, y por todas las conversaciones que tuvimos respecto a los temas de investigación en los que trabajaba cada uno, conversaciones de las que aprendí bastante y aclaré muchas ideas. En especial agradecerle a Esteban Vargas por todos los buenos consejos que me dio, porque siempre le bajaba el perfil a las dificultades que se me presentaban y me daba ánimo para continuar con el desarrollo de este trabajo de tesis.

Y por último agradecerle a Angelina Bustos, que se ha transformado en uno de los pilares fundamentales de mi vida. Agradecerte principalmente por toda la ayuda y apoyo que me brindaste durante este periodo, y también por tu preocupación, tu paciencia, tu alegría, y sobre todo por el ánimo que siempre me diste.

Fabián Araneda Martínez

Tabla de Contenido

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1	3
1.1 FUNDAMENTOS DEL MAGNETISMO.....	3
1.2 ANISOTROPÍA MAGNÉTICA	7
1.3 ESPINTRÓNICA	9
1.4 MAGNETORRESISTENCIA GIGANTE (MRG).....	10
1.5 PSEUDO VÁLVULAS DE ESPÍN (PVE)	12
1.5.1 Curva de MxH de las Pseudo Válvulas de Espín	15
1.6 COEFICIENTES DE TRANSPORTE ELÉCTRICO.....	17
1.6.1 Resistividad eléctrica	17
1.6.2 Efecto Hall.....	18
1.6.2.1 Efecto Hall ordinario.....	18
1.6.2.2 Efecto Hall Extraordinario	19
CAPÍTULO 2: HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	20
2.1 HIPÓTESIS DE TRABAJO.....	20
2.2 OBJETIVOS.....	20
2.2.1 Objetivos Generales.....	20
2.2.2 Objetivos Específicos.....	20
CAPÍTULO 3: MÉTODO EXPERIMENTAL	21
3.1 SÍNTESIS DE LAS PSEUDO VÁLVULAS DE ESPÍN	21
3.2 EQUIPOS DE CARACTERIZACIÓN	25
3.2.1 Caracterización Magnética.....	25
3.2.1.1 Magnetómetro de Gradiente Alterno (AGM).....	25
3.2.1.2 Magnetómetro de Muestra Vibrante (VSM)	26
3.2.2 Caracterización eléctrica.....	28
3.2.2.1 Equipo de medición de transporte eléctrico.....	28
CAPÍTULO 4: RESULTADOS EXPERIMENTALES	31
4.1 RESULTADOS MAGNÉTICOS.....	31
4.1.1 Número óptimo de bicapas en las pseudo válvulas de espín.....	31
4.1.2 Anisotropía magnética perpendicular de las pseudo válvulas de espín.....	33
4.1.3 Optimización de las pseudo válvulas de espín	36
4.1.4 Resultados magnéticos en función de la temperatura.....	39

4.2 RESULTADOS DE MAGNETOTRANSPORTE.....	40
4.2.1 RESISTIVIDAD.....	40
4.2.2 Efecto Hall.....	41
4.2.2.1 <i>Efecto Hall en función de la temperatura</i>	42
4.2.3 Magnetorresistencia.....	44
CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS	49
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

Índice de tablas

Tabla 3.1: Pseudo válvulas de espín. 24

Índice de Figuras

Figura 1.1: Curva de MxH para un material ferromagnético.....	4
Figura 1.2: Curva de MxH para materiales ferromagnéticos blandos y duros	5
Figura 1.3: Eje fácil y difícil para un material ferromagnético.	7
Figura 1.4: Gráfico de $t * K_{eff}$ vs tCo para multicapas de Pd/Co.	7
Figura 1.5: Esquema de la estructura de banda para un metal ferromagnético.	10
Figura 1.6: Gráficos de las publicaciones originales de Grünberg y Fert.....	11
Figura 1.7: Esquema de los estados de alta y baja resistencia para un sistema de multicapas que presenta MRG.....	11
Figura 1.8: Esquema de la estructura multicapa PVE.	13
Figura 1.9: Esquema de la dispersión sufrida por los electrones con espín \uparrow y espín \downarrow en una estructura de PVE.....	14
Figura 1.10: Circuito equivalente del modelo de dos corrientes de Mott.....	15
Figura 1.11: Curva de MxH de una PVE.....	16
Figura 1.12: Esquema de una metal sometido a la acción de una corriente I.....	17
Figura 1.13: Esquema del Efecto Hall en un conductor.	18
Figura 3.1: Esquema del proceso de pulverización catódica	22
Figura 3.2: Esquema de una PVE de dos sistemas de $[Pd_{1.5nm}Co_{0.3nm}]_{x10}$ separados por un espaciador de Cu.	23
Figura 3.3: Esquema del formato cruz que se utilizó para medir magnetorresistencia y Efecto Hall, en las PVE.	24
Figura 3.4: Esquema del magnetómetro de gradiente alterno AGM	25
Figura 3.5: Esquema del magnetómetro de muestra vibrante VSM.....	26
Figura 3.6: Curvas comparativas de MxH de una PVE medida en el VSM y en el AGM.....	27
Figura 3.7: Representación esquemática del método de van der Pauw, utilizado para medir las PVE.	28
Figura 3.8: Curvas comparativas entre la medida de magnetización del AGM y la de transporte eléctrico del equipo Cryogenic para las PVE.....	29
Figura 4.1: Curvas comparativas de MxH entre 10 y 40 bicapas de paladio-cobalto.	31
Figura 4.2: Curva de MxH magnética para la capa libre $Cu_{3nm}([Co_{0.4nm}/Pt_{1.5nm}]_N$	32
Figura 4.3: Esquema de la orientación del campo externo aplicado a las PVE respecto a la anisotropía de estas.....	33
Figura 4.4: Curvas de MxH , tanto fuera y en el plano de todas las PVE que se fabricaron	34
Figura 4.5: Curvas comparativas de MxH , fuera del plano de las muestras SP02, SP04, SP06 y la referencia	36

Figura 4.6: Curvas comparativas de $M \times H$, fuera del plano de las muestras SP02, SP11, SP12 y la referencia	37
Figura 4.7: Curvas de $M \times H$ de todas las PVE.	38
Figura 4.8: Curvas de $M \times H$ a distintas temperaturas de la muestra SP02.....	39
Figura 4.9: Resistividad en función de la temperatura a cero campo magnético externo para pseudo válvulas de espín de distintos separadores	40
Figura 4.10: Efecto Hall de las muestras SP04, SP06, SP11 y SP12.....	41
Figura 4.11: Efecto Hall de la muestra SP07 a distintas temperaturas	42
Figura 4.12: Efecto Hall de la muestra SP12 a distintas temperaturas.	43
Figura 4.13: Magnetorresistencia de la muestra SP07 en función de la temperatura.	44
Figura 4.14: Magnetorresistencia de la muestra SP02 en función de la temperatura.....	45
Figura 4.15: Comparación entre la magnetorresistencia de las muestras SP07 y SP02 a 300K y 50K.	46
Figura 4.16: Magnetorresistencia y magnetización de la muestra SP02 en función del campo externo aplicado.....	47

Introducción

En la actualidad los materiales nanoestructurados juegan un rol fundamental en el desarrollo de múltiples tecnologías y son uno de los campos más investigados en las distintas áreas de la ciencia (Paterno, 2017, Peters et al, 2016, Thines et al, 2017, Wang, Xiong, Xiao & Duan, 2017). Esto debido a que presentan propiedades físicas únicas cuando el tamaño se reduce a escalas nanométricas, lo que conduce a potenciales aplicaciones en diversas áreas de la industria. Estas posibles aplicaciones tecnológicas van de la mano con el descubrimiento de nuevos fenómenos naturales que surgen al trabajar en la escala nanométrica, como por ejemplo el descubrimiento de la Magnetorresistencia Gigante (MRG), que ocurrió en 1988 de forma independiente por parte de los equipos liderados por Peter Grünberg del Jülich Research Centre y por Albert Fert de la Universidad de París-Sur; descubrimiento que los llevó a recibir el Premio Nobel en Física en el año 2007. Desde que se observó el efecto de la MRG, los estudios de sistemas nanométricos han aumentado considerablemente debido a sus potenciales aplicaciones en dispositivos de grabación magnética (Frey & Sun, 2010, Hsu, Jeong, Laughlin & Lambeth, 2003) y sensores magnéticos (Hartmann, 2000), dando origen a la espintrónica o electrónica de espín. Ahora bien, en el caso de los sensores de Efecto Hall, estos son dispositivos ampliamente usados en la era actual, donde sus aplicaciones van desde la medición de campos magnéticos, sensores de posicionamiento, hasta emisores de señales sin contacto (Daughton, 2000, Parkin et al., 2003). La configuración utilizada para medir este efecto requiere que el campo magnético sea aplicado de forma perpendicular al dispositivo, el que frecuentemente es fabricado como película delgada. Desde este punto de vista, resulta interesante considerar que las películas magnéticas que poseen una orientación de la magnetización fuera del plano favorecen este efecto, además de contribuir con una componente adicional denominada Efecto Hall extraordinario que es proporcional a la magnetización de la muestra.

Las películas magnéticas ultradelgadas con anisotropía magnética perpendicular (AMP) al plano de la película, exhiben un aumento en las propiedades magnéticas como magnetización remanente y coercividad, con respecto a materiales con anisotropía en el plano. Por otra parte, las válvulas de espín son sistemas de películas ultradelgadas acopladas que presentan distintos estados de magnetización y que además revierten de forma individual, debido a que se fija una de las capas magnéticas mediante un acoplamiento antiferromagnético (Liu et al, 2014), permitiendo así el acceso a valores arbitrarios de resistencia asociados a estados de remanencia magnética del potencial sensor. En relación con lo anterior, si se introduce, un separador no magnético entre dos materiales ferromagnéticos, y sin acoplamiento antiferromagnético para ninguno de los dos materiales, es posible obtener pseudo-válvulas de

espín (PVE) que presentan las mismas características anteriormente mencionadas (Fang et al., 2012).

A través de la pulverización catódica (Sarkar, 2014), en inglés *sputtering*, es posible obtener películas delgadas que presentan el efecto de magnetorresistencia (MR) (Callister, 2009, Blundell, 2001). Conforme a esto, se propone un estudio de las propiedades magnetoeléctricas que presentan estos sistemas de películas delgadas con el objeto de estimar las potenciales aplicaciones como sensores de campo magnético y sensores de Efecto Hall.

Capítulo 1

1.1 Fundamentos del magnetismo

Por lo general, gran parte de las personas relaciona el magnetismo con los polos de la tierra, con las brújulas y con los imanes permanentes, e ignoran que los campos magnéticos se originan por cargas en movimiento (Griffiths, 1999). De hecho, la unidad básica en el estudio de las propiedades magnéticas de los materiales son los *momentos magnéticos*, los cuales poseen dos contribuciones: una proveniente del momento angular orbital, que se genera a partir del movimiento del electrón alrededor del núcleo, y la otra contribución proviene del giro de los electrones sobre su propio eje, conocida como el espín del electrón. Por lo tanto, cada electrón en un átomo puede ser imaginado como un pequeño imán que tiene momentos magnéticos orbitales y de espín. Ahora bien, todas las sustancias poseen electrones y uno podría preguntarse porque la mayoría de las cosas no son magnéticas, y esto se debe a que los dipolos magnéticos del material generado por cada uno de sus electrones, se cancelan unos con otros debido a la aleatoriedad de la orientación de los átomos. El momento magnético neto de un material corresponde a la suma de los momentos magnéticos de cada uno de sus electrones constituyentes, incluyendo tanto las contribuciones orbitales como de espín, por lo tanto la configuración electrónica de los átomos del material determina tanto la naturaleza y la magnitud del momento magnético neto, así como también las diferencias entre las propiedades magnéticas que exhiben los materiales. Dentro de estas propiedades se encuentran: el diamagnetismo, el paramagnetismo y el ferromagnetismo; donde cada una de ellas depende de la respuesta de los dipolos magnéticos atómicos del material con respecto a la aplicación de un campo magnético externo. Con respecto a los materiales paramagnéticos y diamagnéticos, su respuesta magnética al someterlos a un campo magnético externo es bastante pequeña y despreciable, en comparación con la respuesta de los materiales ferromagnéticos como el hierro, níquel y cobalto, debido a que en estos materiales los momentos magnéticos individuales de grandes regiones de átomos o moléculas se mantienen alineados entre sí debido a un fuerte acoplamiento entre ellos, aún en ausencia de campo exterior, estas regiones se denominan dominios magnéticos, y actúan como un pequeño imán permanente, y se forman debido al balance de contribuciones energéticas, ya que el sistema siempre busca minimizar su energía. Una de las características principales de los materiales ferromagnéticos es que se magnetizan en el mismo sentido que el campo magnético externo.

Una forma de caracterizar magnéticamente los materiales ferromagnéticos es a través del estudio del comportamiento de la magnetización del material ante la presencia de un campo magnético \vec{H} (ver figura 1.1). A medida que se aplica un campo \vec{H} los dominios cambian de

forma y tamaño debido al movimiento de las paredes de dominio, ya que el sistema busca minimizar su energía. Las estructuras típicas de los dominios están representadas de forma esquemática en algunos puntos de la curva \vec{M} en función de \vec{H} en la figura 1.1a. Al aplicar un campo externo, los dominios que están orientados en direcciones favorables al campo aplicado crecen a expensas de aquellos que no están favorablemente orientados. Este proceso continúa al aumentar la intensidad del campo hasta que la muestra macroscópica se convierte en un solo dominio, el cual está casi completamente alineado con el campo. La saturación en la curva se alcanza cuando este dominio gira y se orienta completamente con el campo \vec{H} (Aharoni, 2000).

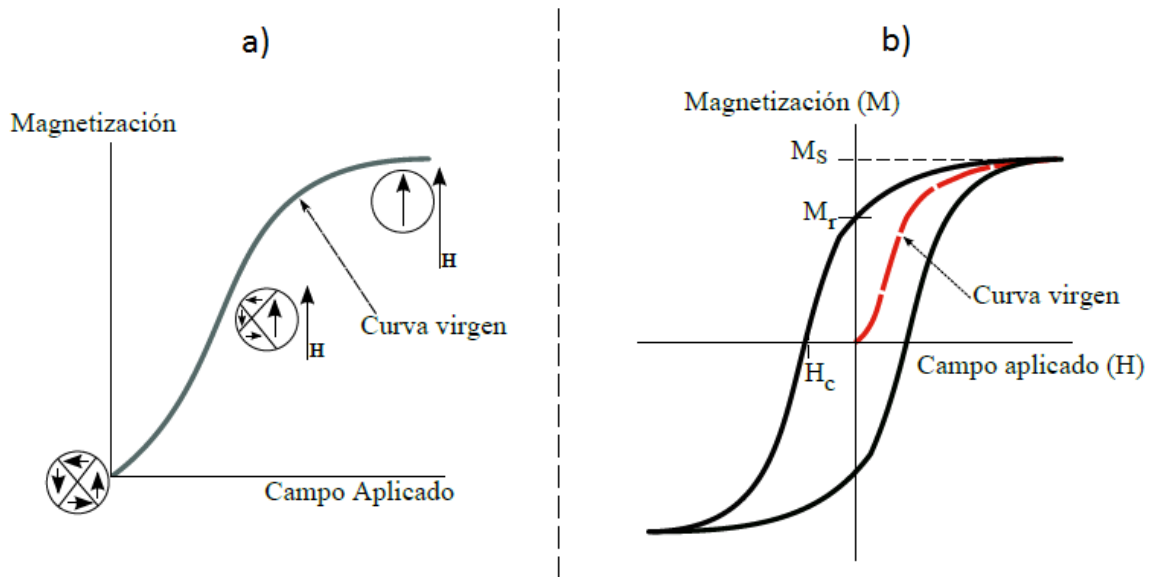


Figura 1.1: (a) Comportamiento de la magnetización \vec{M} en función de un campo magnético \vec{H} de un material ferromagnético que estaba inicialmente desmagnetizado (curva virgen). Se representan las configuraciones de los dominios durante el proceso de la magnetización. (b) Curva de $M \times H$ de un material ferromagnético. (Palma, 2012).

A partir de la magnetización de saturación, punto M_s de la figura 1.1b, a medida que el campo \vec{H} se reduce debido a la inversión de su sentido, la curva no regresa por el mismo camino, sino que se produce un efecto de histéresis en el cual la magnetización va retrasada con respecto al campo aplicado \vec{H} . Cuando el campo \vec{H} llega a cero aún existe un valor residual de la magnetización (punto M_r); denominado magnetización remanente, es decir, el material permanece magnetizado en ausencia de un campo externo \vec{H} .

El comportamiento de la magnetización se explica por la resistencia al movimiento de las paredes de dominio que ocurren en respuesta al aumento del campo magnético en la dirección opuesta. Es por ello que para reducir a cero la magnetización de la muestra (punto H_c de la figura 1.1b), es necesario aplicar un campo \vec{H} de magnitud igual a $-H_c$ en sentido opuesto al campo original; denominado campo coercitivo. Al continuar aplicando el campo en sentido contrario, finalmente se alcanza la reversión de la magnetización. Para completar el ciclo de histéresis se hace una segunda inversión del campo externo hasta llegar al punto de saturación inicial, lo que también provoca una remanencia negativa $-M_r$ y un campo coercitivo positivo $+H_c$.

Por otra parte, dependiendo de las características de la curva de $M \times H$ los materiales ferromagnéticos se clasifican como *blandos* o *duros*. En la figura 1.2 se observa que un material magnéticamente blando posee un bajo campo coercitivo, una alta permeabilidad inicial, y puede alcanzar la saturación con un campo aplicado relativamente pequeño, es decir, son de fácil magnetización y desmagnetización. Por otro lado en la figura 1.2 también se observa que un material magnéticamente duro tiene una alta coercitividad, una alta remanencia, y una baja permeabilidad, por lo tanto es necesario un campo externo grande para desmagnetizarlo (Callister, 2009).

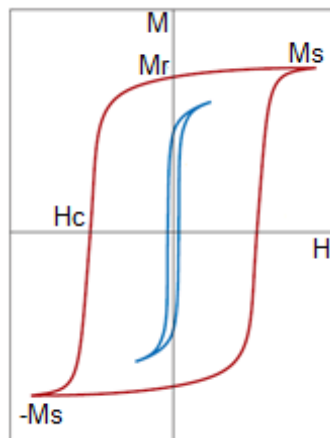


Figura 1.2: Curva de $M \times H$ para un material ferromagnético blando (curva azul) y duro (curva roja). (Callister, 2009).

Las principales contribuciones energéticas a la energía total de un sistema ferromagnético vienen dadas por:

$$E_T = E_{int} + E_Z + E_{dip} + E_{ani} \quad (1.1)$$

E_{int} : Energía de Intercambio.

E_Z : Energía de Zeeman.

E_{dip} : Energía Magnetostática.

E_{ani} : Energía de Anisotropía.

La energía de intercambio E_{int} , proviene del acoplamiento microscópico de los momentos atómicos magnéticos y su origen es el resultado de la repulsión de Coulomb de dos electrones cercanos combinados con el principio de exclusión de Pauli, que prohíbe que dos electrones estén en el mismo estado cuántico. Esta interacción es responsable de la alineación espontánea de los momentos magnéticos.

$$E_{ex}^{par} = -2JS^2 \vec{m}_i \cdot \vec{m}_j. \quad (1.2)$$

La energía de Zeeman E_Z , corresponde a la energía de la interacción de cada átomo con un campo magnético aplicado y en términos de energía representa un mínimo cuando la magnetización está alineada con el campo magnético.

$$e_z = -\vec{\mu}_m \cdot \vec{B}. \quad (1.3)$$

La energía dipolar o magnetostática E_{dip} , se describe por la interacción de la magnetización y el campo desmagnetizante \vec{H}_d . El campo desmagnetizante es producido por la distribución de magnetización de las cargas magnéticas y se relaciona con la magnetización por:

$$\vec{H}_d = -N_d \vec{M}, \quad (1.4)$$

donde N_d es el factor desmagnetizante el cual depende de la forma del cuerpo y la dirección de magnetización.

La energía de anisotropía E_{ani} , se define por la orientación de la magnetización y es generada por diferentes contribuciones (como se verá en el siguiente punto), es decir, el material tendrá una dirección preferente en la cual su energía será mínima.

1.2 Anisotropía magnética

El término anisotropía magnética se refiere a que las propiedades magnéticas de un material, como la magnetización, dependen de la dirección en que se miden dichas propiedades. Por ejemplo la anisotropía magnetocristalina es la energía necesaria para magnetizar un cristal ferromagnético dependiendo de la dirección del campo magnético aplicado con respecto a los ejes del cristal, donde la dirección cristalográfica preferida se denomina eje de fácil magnetización. Diferentes materiales tienen diferentes ejes de fácil magnetización. En la figura 1.3 se observa un esquema de las curvas de histéresis de un cristal ferromagnético, con el campo aplicado a lo largo del eje fácil, así como también a lo largo del eje difícil.

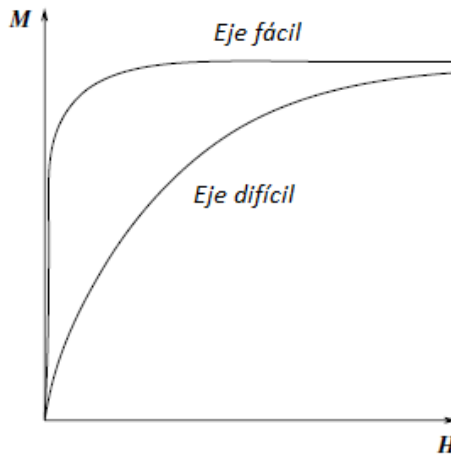


Figura 1.3: Esquema de las curvas de magnetización para un material ferromagnético con el campo aplicado a lo largo del eje fácil y difícil (Spaldin, 2003).

Por otro lado, la anisotropía magnética también puede estar determinada a partir de la forma del material magnético, lo que se denomina anisotropía de forma, de manera que si la muestra no es esférica, donde todas las direcciones tienen el mismo grado de magnetización; la muestra será más fácil de magnetizar en la dirección del eje más largo. Ésta se origina a partir de las interacciones dipolares, las cuales son de largo alcance y dependen de la forma de la muestra. Por lo tanto, la anisotropía de forma llega a ser importante en películas delgadas, donde a menudo tiende a alinear los momentos magnéticos en el plano de las muestras.

Ahora bien, el comportamiento físico de la orientación preferida de los momentos magnéticos en películas ultradelgadas y multicapas puede ser muy diferente al comportamiento que presentan los materiales en el estado masivo, donde su magnetización se orienta a lo largo de una dirección de simetría. Debido a esto, la anisotropía magnética es fundamental en el desarrollo de esta tesis.

La anisotropía magnética perpendicular (AMP) en las multicapas de Pd/Co se debe a la interfaz entre estos dos elementos o también llamada anisotropía superficial (Fang, 2013). La energía de anisotropía magnética efectiva K_{eff} , de la llamada interfaz, se puede atribuir tanto a una contribución de volumen K_V como a una contribución de interfaz K_S :

$$K_{eff} = K_V + 2 \frac{K_S}{t}, \quad (1.5)$$

donde t es el espesor de una capa magnética individual. De tal forma que un K_{eff} positivo representa que la magnetización prefiere estar perpendicular al plano de la película, como se observa en la figura 1.4, que muestra un ejemplo típico de multicapa de Pd/Co (Broeder, Hoving & Bloemen, 1991). El K_V y K_S se determinan a partir de un diagrama de $t * K_{eff}$ en función del espesor de Co (t_{Co}). En la figura 1.4 se observa que la constante de anisotropía efectiva K_{eff} toma valores negativos cuando el espesor de Co es superior a los 12 Å, por lo que la contribución del volumen K_V es la que predomina y favorece que la magnetización de la multicapa esté en el plano de ésta. Sin embargo, la intercepción a cero, t_{Co} , indica que comienza a predominar la contribución de la interfaz K_S , lo que favorece la magnetización perpendicular al plano de las multicapas. Debido a esto, bajo un cierto valor para el espesor t , la contribución de la anisotropía de interfase domina por sobre la contribución del volumen, resultando así un sistema magnetizado perpendicularmente, que es lo que se busca en este trabajo de tesis. Es por esto, que para lograr que las PVE de Pd/Co presenten AMP se usó un espesor de 0.3 nm de Co y un espesor de 1.5 nm de Pd.

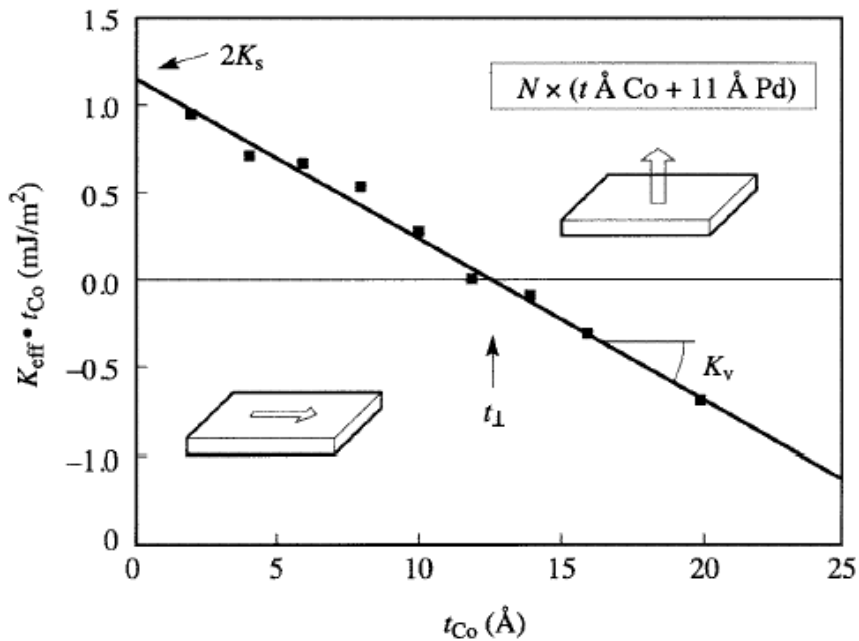


Figura 1.4: Gráfico de $t * K_{eff}$ vs t_{Co} para multicapas de Pd/Co (Fang, 2013).

1.3 Transporte eléctrico dependiente de espín

El descubrimiento de la magnetorresistencia gigante (MRG) se considera el descubrimiento que dio origen al desarrollo de la espintrónica, y como consecuencia se generó una intensiva investigación sobre materiales magnéticos y películas magnéticas delgadas, de tal forma que en un comienzo los dispositivos espintrónicos eran los cabezales de lectura de las unidades de disco duro y a lo largo de los años estos dispositivos han sido usados en variados aspectos de la industria tecnológica como: sensores de campo magnético, componentes de los dispositivos de grabación magnética, memorias magnéticas, aislantes galvánicos, entre otros (Spaldin, 2003).

Conforme a lo anterior, dos propiedades intrínsecas de los electrones son su carga y su espín, pero la mayoría de los dispositivos electrónicos convencionales sólo explotan la carga de los electrones en los mecanismos de conducción, mientras ignoran el espín como un grado de libertad adicional. La espintrónica o electrónica de espín, estudia y utiliza la carga y el espín de los electrones, lo que abre la puerta a numerosos fenómenos interesantes y nuevos dispositivos.

Por otra parte, los metales ferromagnéticos como el Fe, Co y Ni, a diferencia de los metales normales donde hay igual número de espines up (\uparrow) y down (\downarrow) para el nivel de Fermi, poseen más estados para una dirección de espín que la otra, como se muestra en la Figura 1.5, lo que permite diferentes propiedades de conducción para cada canal de espín. Por lo tanto, los materiales ferromagnéticos pueden actuar como polarizadores de espín, de tal forma que si una corriente pasa a través de dos capas ferromagnéticas desacopladas a través de un separador no magnético, los electrones entrantes al pasar a través de la primera capa ferromagnética se polarizan en la dirección de la magnetización de dicha capa, luego los electrones pasan por la capa no magnética, manteniendo su polarización, por lo que la resistencia total del sistema dependerá de la dirección relativa entre la magnetización de la primera y de la segunda capa. Si la orientación relativa entre los vectores de magnetización de las capas ferromagnéticas es de forma paralela, la mayoría de los electrones pueden pasar fácilmente a través de la segunda capa magnética, mientras que los electrones minoritarios están fuertemente dispersados. A diferencia del caso anterior, cuando las dos capas ferromagnéticas están orientadas de forma antiparalela, la mayoría de los electrones al venir polarizados por la primera capa, sufrirán una fuerte dispersión dependiente de su espín por lo que tendrán una gran dificultad para pasar por la segunda capa, de tal forma que el sistema tendrá una resistencia alta. Tanto la dispersión dependiente de espín dentro de las capas magnéticas como en las interfaces contribuyen al efecto de MRG.

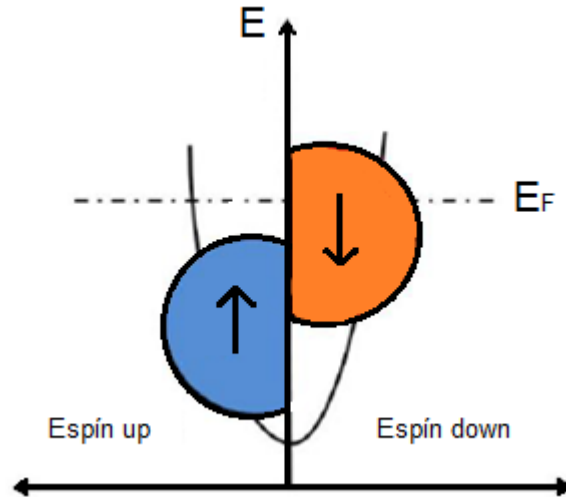


Figura 1.5: Esquema de la estructura de banda para un metal ferromagnético.

1.4 Magnetorresistencia Gigante (MRG)

La magnetorresistencia (MR) se refiere al cambio en la resistencia eléctrica de un material cuando se aplica un campo magnético en una dirección determinada. Este fenómeno es ampliamente conocido y ha sido usado en la industria para el almacenamiento de información (Hewlett Packard, 1995). El cambio porcentual de la magnetorresistencia se define por:

$$MR(\%) = 100 \frac{R_H - R_0}{R_0} \quad \Rightarrow \quad MR(\%) = 100 \frac{\Delta R}{R_0}, \quad (1.6)$$

donde R_H corresponde al valor de la resistencia eléctrica del material en presencia de un campo magnético externo y R_0 a la resistencia en ausencia de éste. Ahora bien hay distintos tipos de MR: magnetorresistencia ordinaria (MRO), magnetorresistencia anisotrópica (MRA), magnetorresistencia gigante (MRG) y magnetorresistencia colosal (MRC). Este trabajo de tesis se basa en el efecto de la MRG.

La MRG fue observado por primera vez en 1988 por Peter Grünberg y Albert Fert, en películas de multicapas de Fe/Cr (Binasch, Broto & Fert, 1988, Binasch, Grünberg, Saurenbach & Zin, 1989) acopladas antiferromagnéticamente, por lo que se les galardonó con el premio Nobel en Física en el año 2007. Los datos de las publicaciones originales de los grupos de Grünberg y Fert se muestran a continuación:

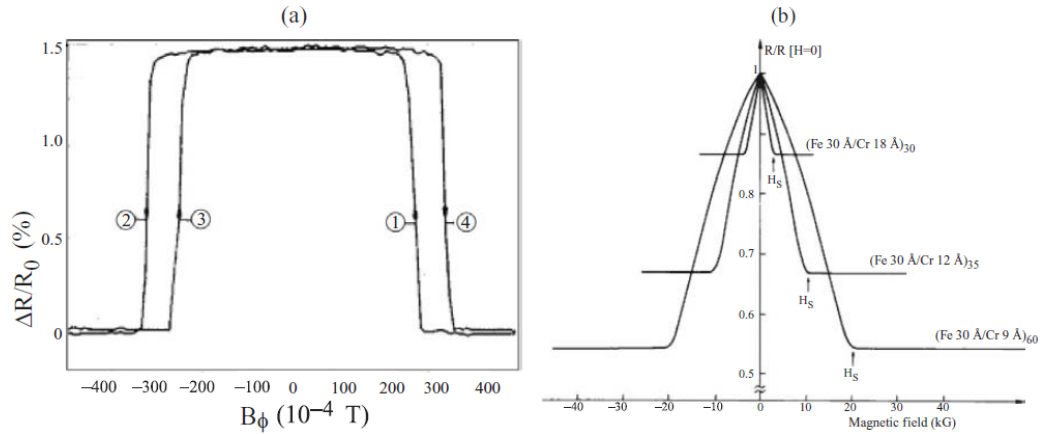


Figura 1.6: Magnetorresistencia gigante en sistemas de multicapas. (a) Magnetorresistencia a temperatura ambiente en una estructura de 5 multicapas, 3 capas de Fe separadas por Cr (Binasch, 1988). (b) Datos a 4.2K para 3 diferentes sistemas (Binasch, 1989). En ambos casos la corriente y el campo aplicado son en el plano de las capas.

La MRG ocurre cuando en ausencia de un campo magnético externo, las capas magnéticas se orientan de forma antiferromagnéticamente y al aplicar un campo magnético al arreglo de multicapas cambia la orientación relativa de las capas magnéticas a una orientación paralela, como se observa en la figura 1.7.

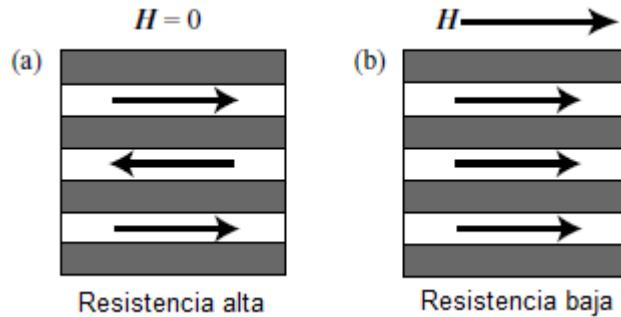


Figura 1.7: Esquema de los estados de resistencia alta (a) y baja (b) para un sistema de multicapas que presenta MRG. (Spaldin, 2003).

Ahora bien, el motivo del acoplamiento antiferromagnético en ausencia de campo magnético entre las capas magnéticas separadas por un espaciador no magnético, es debido a la interacción RKKY (Ruderman, Kittel, Kasuya y Yosida) o intercambio indirecto (Bloemen et al, 1994), que es un acoplamiento oscilatorio que decae en función de la distancia, por lo que si se escoge un separador cuyo espesor es superior a 2 o 3 nm, esta interacción es despreciable. Sin embargo, para valores de espesor inferiores a 3 nm, se puede controlar el tipo de acoplamiento entre las capas magnéticas y lograr un acoplamiento antiferromagnético en ausencia de un campo magnético externo.

Por otro lado, el cambio en la resistencia con la aplicación de un campo magnético externo resulta de la dispersión de los electrones al atravesar la estructura de multicapas, y este cambio en la resistencia es dependiente del espín de los electrones en relación con las capas magnéticas que atraviesan. Cuando el sistema se encuentra en un estado antiparalelo posee una resistencia alta debido a que los electrones con un espín up son fuertemente dispersados en regiones con una magnetización espín down (\downarrow) y viceversa. Por otro lado, cuando las capas magnéticas se encuentran alineadas de manera ferromagnéticamente, los electrones de conducción que poseen un espín compatible con el tipo de magnetización son capaces de moverse a través de las estructuras heterogéneas con una mínima dispersión, por lo que la resistencia del material es menor.

1.5 Pseudo Válvulas de Espín (PVE)

El primer autor en emplear el término válvula de espín fue Diney (1991a). El nombre magnetorresistencia gigante a veces se intercambia con el término válvula de espín, no obstante, el término válvula de espín se utiliza para estructuras MRG específicas (Diney et al, 1991b). El origen del término válvula de espín hace referencia al funcionamiento microscópico del efecto MRG donde la estructura multicapa se considera como una válvula que determina cuales son los electrones más fáciles de transmitir, espín \uparrow o espín \downarrow .

Los materiales que se utilizan para la implementación física de las estructuras multicapas determinarán las propiedades de la válvula de espín. Las válvulas de espín se caracterizan por utilizar dos capas ferromagnéticas separadas por una capa conductora, donde una de las capas ferromagnética es depositada sobre una capa antiferromagnética, para así dejar fija dicha capa y la otra libre, tal como se observa en la figura 1.8(a). En este trabajo de tesis se utilizaron pseudo válvulas de espín (en inglés, *pseudo spin valves*, PSV), que se caracterizan en no fijar una de las capas magnéticas con un acoplamiento antiferromagnético, sino que para obtener estados de magnetización paralelos y antiparalelos se utilizan dos materiales ferromagnéticos con coercitividad distintas, como se observa en la figura 1.8(b), donde la capa con la coercitividad más grande se llama la capa dura, y la que posee la coercitividad más pequeña se llama la capa blanda (Thiyagarajah & Bae, 2008, Liu, Ho, Chen & Adeyeye, 2012). Estas capas pueden ser constituidas por materiales puros o aleaciones como NiFe, CoFe entre otros materiales. La capa separadora se implementa con materiales conductores no ferromagnéticos como el Cu o Ru, entre otros. Por lo general se utilizan multicapas ultradelgadas de Co/Pd o

Co/Pt para lograr la anisotropía magnética perpendicular en las PVE (Liu et al, 2014, Yang, Zhu, Chen, Zeng & Pan, 2010), debido a lo que se explicó en el apartado 1.2 de anisotropía magnética. En el capítulo 3, correspondiente al procedimiento experimental, se describirá en detalle la estructura empleada en esta tesis.

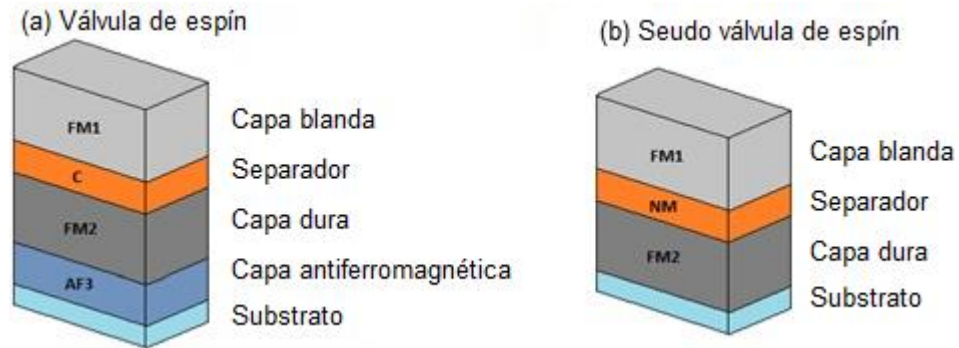


Figura 1.8: Esquema de la estructura multicapa PVE.

Las pseudo válvulas de espín con AMP han tenido un creciente interés desde el punto de vista de aplicaciones como dispositivos de magnetorresistencia, grabación magnética y memorias de acceso remoto (MRAM) (Thiyagarajah, Joo & Bae, 2009, Gopman et al., 2014, Ikeda et al., 2010, Zhao, Ding, HuangFu, Zhang & Yu, 2013). La principal característica de estos sistemas es la presencia de multicapas magnéticas con AMP separadas por un metal no magnético como Cobre o Tántalo, donde el papel del separador no magnético es desacoplar las dos multicapas magnéticas, generando estados de magnetización antiparalelos durante la reversión de la magnetización. Con esto se busca controlar los campos de reversión magnética y obtener altos valores de magnetorresistencia.

El efecto de la MRG se manifiesta en las PVE debido a la dependencia de espín en la conducción eléctrica en materiales ferromagnéticos. En estas estructuras la dispersión sufrida por los electrones está en función del espín y del alineamiento de los vectores de magnetización entre las capas ferromagnéticas. En una de las capas ferromagnéticas la mayoría de las cargas se caracterizan por ser espín \uparrow , mientras que en la otra capa ferromagnética la mayoría de cargas tienen espín \downarrow , el resultado es una estructura con dos orientaciones magnéticas en sentido opuesto. Cuando el campo magnético externo es nulo, las capas se encuentran en acoplamiento antiparalelo (figura 1.9b). En cambio, bajo la influencia de un campo magnético externo de suficiente intensidad el momento magnético de las capas ferromagnéticas adopta la configuración paralela como muestran las figuras 1.9a y 1.9c.

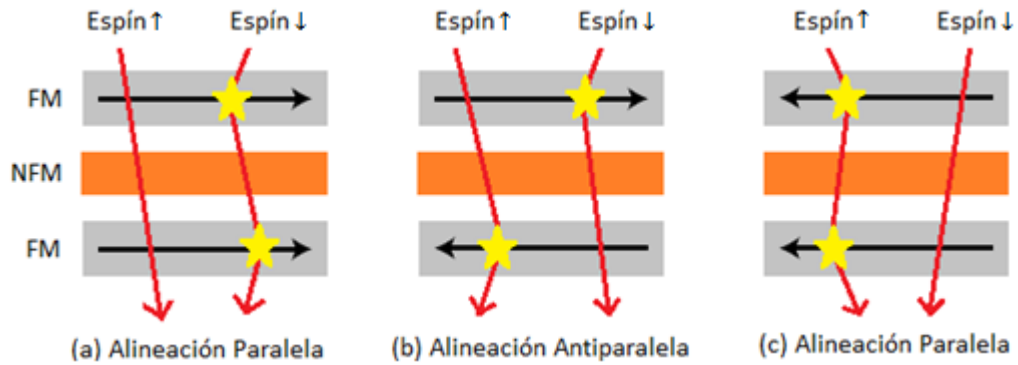


Figura 1.9: Esquema de la dispersión sufrida por los electrones con espín ↑ y espín ↓ en una estructura de PVE (Moreno, 2013).

El efecto MRG es el resultado de la dependencia de la resistencia eléctrica sufrida por los electrones si su dirección de espín es paralela o antiparalela en relación a la magnetización de la capa ferromagnética que atraviesa. Cuando las dos capas ferromagnéticas tienen orientación paralela, al menos un grupo de electrones (espín ↑ o espín ↓) tendrán espín paralelo en ambas capas y podrán moverse fácilmente a través de la estructura, por lo tanto la resistencia del material será pequeña. En cambio, si los vectores de magnetización de las capas ferromagnéticas presentan una orientación antiparalela, tanto los electrones con espín ↑ y espín ↓ tendrán espín antiparalelo en una de las capas magnéticas, por lo tanto los electrones tendrán dificultad al atravesar por la estructura y la resistencia será alta.

Otra forma de explicar el efecto magnetorresistivo que ocurre en las PVE es aplicar el modelo de Mott, de dos corrientes, desarrollado experimentalmente por A. Fert (Mott, 1936, Petroff, 2007) en el estudio de la MRG. El modelo propone que la corriente que pasa a través de una estructura multicapa está compuesta por dos canales de corriente en paralelo correspondientes a los electrones con espín ↑ y a los electrones con espín ↓. A través de cada capa FM los electrones tienen una resistividad paralela ρ_{\uparrow} o una resistividad antiparalela ρ_{\downarrow} en función de la relación de su espín y la orientación de la magnetización de la capa FM. La figura 1.10 representa el circuito eléctrico equivalente para una configuración antiparalela de las capas FM y las dos posibles configuraciones paralelas de las capas FM.

La resistencia total del sistema depende de la dirección relativa entre la polarización de los electrones sufrida al pasar por la primera capa, y la magnetización de la segunda capa. Si las dos capas de magnetización están orientadas de forma paralela, la mayoría de los electrones pueden pasar fácilmente a través de la segunda capa magnética, por lo que la resistencia será baja; y si las dos capas de magnetización son antiparalelas habrá una fuerte dispersión de los

electrones polarizados por la primera capa al intentar atravesar la segunda capa ferromagnética, por lo que la resistencia será alta.

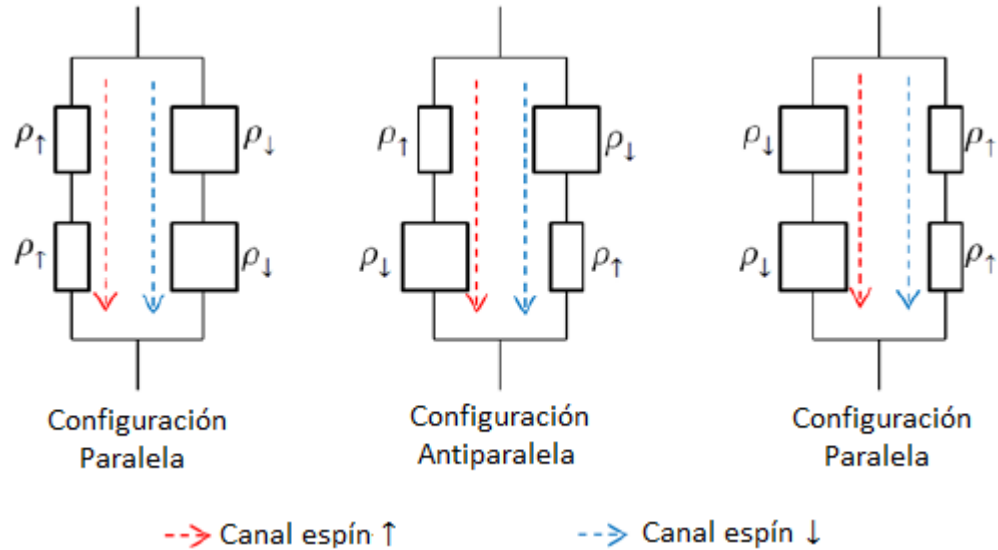


Figura 1.10: Circuito equivalente del modelo de dos corrientes de Mott. (Moreno, 2013).

En las configuraciones paralelas, un grupo de electrones experimenta ρ_{\uparrow} a través de las dos capas ferromagnéticas, mientras que otro grupo experimenta ρ_{\downarrow} en ambas capas. Por lo tanto la resistividad equivalente es:

$$\rho_{\uparrow\uparrow} = \rho_{\downarrow\downarrow} = \frac{\rho_{\downarrow}\rho_{\uparrow}}{\rho_{\downarrow} + \rho_{\uparrow}} \quad (1.7)$$

En la configuración antiparalela cada canal de espín experimenta ρ_{\uparrow} y ρ_{\downarrow} en serie, por lo tanto, la resistencia equivalente es:

$$\rho_{\downarrow\uparrow} = \frac{\rho_{\downarrow} + \rho_{\uparrow}}{2} \quad (1.8)$$

El cambio de una configuración paralela a una configuración antiparalela, de las capas ferromagnéticas al aplicar un campo magnético externo, es de manera progresiva. Así es como la resistencia que ofrece este tipo de estructura depende de la orientación relativa entre los vectores de magnetización de las capas ferromagnéticas (Ilievski, Perkinson & Ross, 2007).

1.5.1 Curva de magnetización en función del campo magnético aplicado de las Pseudo Válvulas de Espín

Como se mencionó anteriormente las PVE corresponden a dos sistemas magnéticos separados por un espaciador no magnético, donde el papel del separador no magnético es desacoplar las dos multicapas magnéticas para generar estados de magnetización antiparalelos durante la reversión de la magnetización, tal como se observa en la figura 1.11.

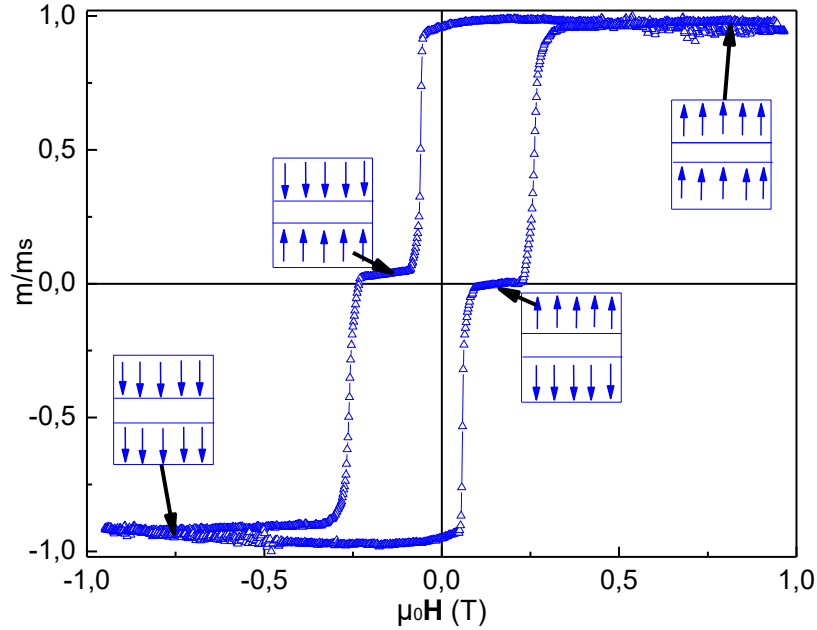


Figura 1.11: Curva de $M \times H$, de una PVE de dos sistemas de diez bicapas de $Pd_{0.3nm}/Co_{1.5nm}$ separados por un espaciador de cobre de 2 nm.

En la figura anterior se observa como es la curva de $M \times H$ para las PVE. Esta se caracteriza por presentar una transición tipo escalón que separa los dos sistemas magnéticos presentes en las PVE. Además en la figura se observa esquemáticamente la orientación de la magnetización de los dos sistemas magnéticos (a través de las flechas en los recuadros), la capa blanda (o libre), y la capa dura, de tal forma que cuando se aplica un campo positivo cercano a 1.0 T la magnetización de ambos sistemas está en la orientación Up ($\uparrow\uparrow$), y cuando se aplica un campo negativo cercano a -1.0 T la magnetización de ambos sistemas está en la orientación down ($\downarrow\downarrow$). Otra característica de la curva de $M \times H$ de las PVE son los cuatro campos coercitivos, dos por cada sistema magnético. Donde los campos coercitivos del segundo y cuarto cuadrante corresponden a la capa blanda, que es la que revierte primero, y los campos coercitivos del primer y tercer cuadrante corresponden a la capa dura, que es la que revierte después. A pesar de que ambos sistemas magnéticos son idénticos (diez bicapas de Pd/Co), existe una diferencia entre los campos coercitivos de ambos sistemas. Esta diferencia se debe a que la presencia del separador de Cu relaja el sistema y hace que la anisotropía no esté orientada completamente fuera del plano de las multicapas, entonces, para que la capa dura comience a revertir su magnetización se necesita aplicar un campo externo mayor.

1.6 Coeficientes de transporte eléctrico

1.6.1 Resistividad eléctrica

Al aplicar una corriente I a un metal (ver figura 1.12), que se encuentra a temperatura constante y homogénea, se genera una diferencia de potencial V entre los puntos a y b que depende linealmente de la corriente I . La constante de proporcionalidad entre el voltaje y la corriente se denomina resistencia y se denota por la letra R . Esta relación es la que se conoce como la ley de Ohm:

$$V = IR \quad (1.9)$$

En una muestra homogénea y uniforme, como se observa en la figura 1.12, la resistencia depende linealmente de la distancia L que separa los terminales sobre los que se mide la caída de tensión V , y depende inversamente de la sección transversal $S=dc$ de la muestra que es perpendicular a la corriente aplicada.

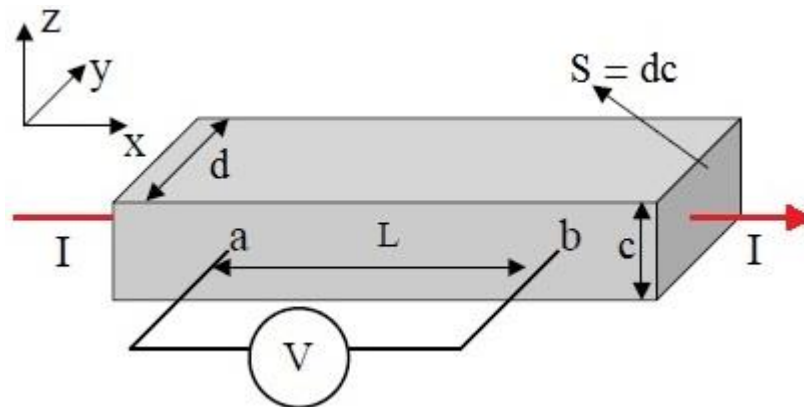


Figura 1.12: Esquema de una metal sometido a la acción de una corriente I .

La resistividad eléctrica ρ depende de los mecanismos microscópicos de dispersión electrónica que inducen pérdida de energía de los portadores de carga, y se define como un coeficiente independiente de las dimensiones de la muestra, dada por la siguiente relación:

$$R = \frac{L}{S} \rho \quad (1.10)$$

Donde L es la distancia que separa los dos terminales entre los que se mide la diferencia de potencial y S es la sección transversal perpendicular al flujo de corriente. De tal forma que ρ corresponde a una propiedad intrínseca del material, la cual puede cambiar en presencia de un campo magnético.

1.6.2 Efecto Hall

El Efecto Hall se relaciona con la dependencia que tiene la resistividad transversal de un material con respecto a un campo magnético externo aplicado. Cuando la muestra a la que se le aplica un campo magnético es un metal, el fenómeno se conoce como Efecto Hall ordinario, y cuando el campo magnético se aplica a un material ferromagnético el fenómeno se conoce como Efecto Hall extraordinario o Efecto Hall anómalo.

1.6.2.1 Efecto Hall ordinario

El Efecto Hall ordinario fue descubierto por E. H. Hall en el año 1879 mientras experimentaba con materiales conductores. Hall se percató que al aplicar un campo magnético externo perpendicular a la dirección de la corriente, se generaba un voltaje transversal que era perpendicular a la corriente y al campo magnético aplicado (Hall, 1879), como se observa en la figura 1.13.

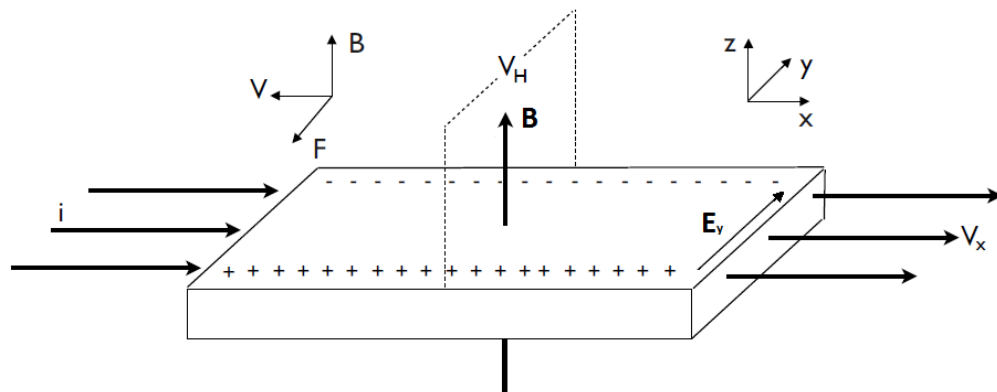


Figura 1.13: Esquema del Efecto Hall en un conductor.

En metales ordinarios en ausencia de un campo magnético externo los electrones pueden moverse libremente en línea recta a través de un sólido entre eventos de dispersión.

En el caso de un gas de electrones libres este comportamiento se mantiene aún en presencia de un campo magnético externo aplicado. Lo que sucede es que el campo externo ejerce una fuerza (fuerza de Lorentz) sobre los electrones desviándolos de su trayectoria, y el campo eléctrico creado por el desplazamiento de los electrones balancea la fuerza de Lorentz y, en equilibrio, los electrones se mueven por el mismo camino recto. Esto es lo que se conoce como el Efecto Hall y se ilustra en la figura 1.13. En este esquema los electrones se mueven con velocidad \vec{v} en la dirección x y son inicialmente desviados hacia la dirección y por un campo H

aplicado en la dirección z. Como resultado del balance entre la fuerza de Lorentz y el campo eléctrico inducido E_y , los electrones recuperan su trayectoria lineal, por lo que en un gas de electrones libres la resistencia no variará con la aplicación de un campo magnético (Spaldin, 2003). Sin embargo, en un metal real los electrones de conducción tienen distintas velocidades medias, y a pesar que el campo Hall se equilibra con el campo magnético externo, los electrones viajan de forma individual en trayectorias curvas, debido a la fuerza de Lorentz ($q\mathbf{v}\times\mathbf{B}$), haciendo que los electrones viajen una distancia mayor y a su vez incrementando la probabilidad de sufrir algún evento de dispersión, lo que provoca un aumento en la resistencia eléctrica del material, la cual tiene una dependencia lineal con respecto al campo magnético aplicado.

1.6.2.2 Efecto Hall Extraordinario

En 1880 E. H. Hall, un año después de haber descubierto el Efecto Hall ordinario, observó que el voltaje transversal que se generaba al aplicar un campo magnético perpendicular a la corriente, aumentaba hasta un factor de 10 veces cuando se utilizaba un material ferromagnético en comparación con un material no magnético (Hall, 1881). Este efecto es originado por la interacción espín-órbita de los electrones de la banda de conducción debido a la asimetría de la dispersión magnética y es proporcional a la magnetización de la muestra (Hurd, 1972). En un material ferromagnético la resistividad Hall es dada por:

$$\rho_H = R_0\vec{H} + 4\pi R_s\vec{M} \quad (1.11)$$

Donde el primer término corresponde a la contribución del Efecto Hall ordinario y el segundo término corresponde a la contribución del Efecto Hall extraordinario, por lo que R_0 y R_s son llamados coeficientes Hall ordinario y extraordinario, respectivamente. Este último ha generado gran interés por las potenciales aplicaciones en el área de los sensores magnéticos (Berger & Bergmann, 1980).

Capítulo 2: Hipótesis y Objetivos

2.1 Hipótesis de trabajo

En este trabajo se estudiaron las propiedades de magnetotransporte de sistemas de pseudo válvulas de espín de Pd/Co con anisotropía magnética perpendicular. Específicamente se investigó el efecto del espesor del separador de Cu entre los dos sistemas de multicapas y además el efecto de agregar cobalto en el separador. El espesor del separador influye directamente en las propiedades magnetoeléctricas de las PVE, ya que determina el campo necesario para revertir la magnetización y así obtener un cambio en la resistencia bien definido a temperatura ambiente.

2.2 Objetivos

2.2.1 Objetivos Generales

Estudiar sistemas de multicapas de Pd/Co con anisotropía magnética perpendicular. Producir PVE preservando la anisotropía perpendicular en función de diferentes espesores en los espaciadores de Cu y Cu con Co.

2.2.2 Objetivos Específicos

- Fabricar PVE de Pd/Co que presenten AMP, mediante pulverización catódica.
- Utilizar diferentes espaciadores de Cu, y Cu con Co en la fabricación de las PVE.
- Caracterizar las muestras a través de la medición de la magnetización, magnetorresistencia y Efecto Hall de las PVE en función de campo aplicado y temperatura, de manera de optimizar el sistema en función de los materiales utilizados y así determinar el rango de posibles aplicaciones como sensores de campo magnético.

Capítulo 3: Método Experimental

La síntesis de las PVE se realizó mediante la pulverización catódica en alto vacío. La posterior caracterización magnética se realizó mediante un magnetómetro de gradiente alterno (AGM) con una capacidad de 1 T y con un equipo CRYOGENIC, en su modalidad de magnetómetro de muestra vibrante (VSM), que tiene acoplado un criostato que permite la medición en un rango de temperaturas entre 2 K a 300 K y de campo magnético entre -5 T y 5 T.

La caracterización eléctrica se llevó a cabo utilizando el método de cuatro contactos, mediante dos sistemas de medición de transporte eléctrico, uno con una capacidad de 1.5 T con el que se realizaron mediciones a temperatura ambiente, y el otro es el CRYOGENIC en su modalidad de magnetotransporte eléctrico para mediciones de MRG y Efecto Hall, donde se utiliza un portamuestra diferente. Todos estos procesos fueron realizados en el Laboratorio de Magnetismo del Departamento de Física de la Universidad de Santiago de Chile.

3.1 Síntesis de las Pseudo Válvulas de Espín

Para la fabricación de las PVE se utilizó la técnica de pulverización catódica en alto vacío. Para llevar a cabo el depósito se debe aplicar una gran diferencia de potencial entre la placa del material a depositar o blanco (cátodo) y el cañón (ánodo) que se utiliza para realizar el depósito. También es fundamental que el depósito se realice en una cámara de alto vacío para obtener películas con un alto grado de homogeneidad, y así evitar que el gas residual contamine las muestras. El alto vacío se consigue utilizando una bomba turbo molecular, donde se alcanza una presión estática del orden de los 10^{-7} torr. Además, para evitar reacciones de oxidación dentro de la cámara y en los blancos a utilizar, el depósito se debe llevar a cabo en condiciones de atmósfera inerte, mediante gas de Argón. Dicho gas es fundamental para obtener la presión óptima de trabajo para el proceso de depósito, correspondiente a una presión dinámica de 10^{-3} torr ya que al aplicar la diferencia de potencial entre el cañón y el blanco, el plasma que se crea en el interior de la cámara debe perdurar durante todo el depósito.

Durante el proceso de depósito, los iones de argón son acelerados y golpean el blanco con la energía suficiente para arrancar átomos de la superficie del cátodo mediante un proceso de transferencia de momento. Cuando un ión golpea la superficie de un material, este transfiere parte de su energía a los átomos circundantes, produciendo así una colisión en cascada. Las múltiples colisiones hacen posible que algunos átomos del material adquieran la suficiente energía para abandonar la superficie, alcanzar el sustrato y adherirse a él, tal como se esquematiza en la figura 3.1. Para mejorar la eficiencia en la tasa de depósito se coloca un imán bajo el blanco, donde el campo magnético producido por el imán confina el plasma, concentrando así las colisiones de los iones en el blanco.

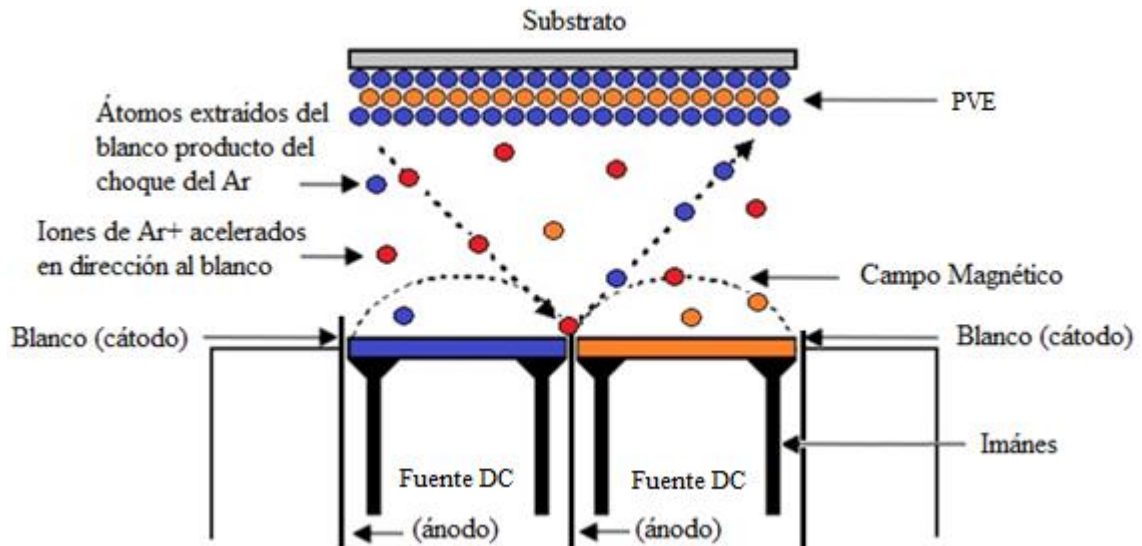


Figura 3.1: Esquema del proceso de pulverización catódica utilizando dos blancos para obtener pseudo válvulas de espín. El depósito se hace de manera alternada con una sola tapa de cañón abierta a la vez.

La mayor parte de la energía proporcionada por los iones incidentes se transforma en calor, lo que hace indispensable la presencia de un sistema de enfriamiento adecuado para evitar el sobrecalentamiento del cátodo y del imán, de tal forma de preservar la vida útil del equipo.

El equipo cuenta con dos fuentes de distinto tipo para poder acelerar los iones contra el blanco. Una de ellas es una fuente DC que utiliza corriente continua y se usa para materiales metálicos, y la otra fuente es una RF que utiliza radio frecuencias en torno a 13,6 MHz y se usa para materiales aislantes.

Para llevar a cabo el depósito del material sobre el substrato hay que seguir los siguientes pasos:

- Fijar los substratos en la cámara de vacío en el portamuestra giratorio.
- Aislar la cámara y encender la bomba mecánica para alcanzar un pre-vacío del orden de 10^{-3} torr.
- Encender la bomba turbo molecular para así alcanzar un vacío del orden de 10^{-7} torr (alto vacío).
- Encender el sistema de enfriamiento.
- Habilitar el flujo de argón al interior de la cámara de vacío y así obtener una presión de trabajo estable del orden de 10^{-3} torr.
- Iniciar la rotación de los substratos, para así asegurar que el material depositado esté homogéneamente distribuido.

- g) Aumentar la diferencia de potencial entre el cátodo y el ánodo para así generar el plasma.
- h) Regular la potencia de la fuente DC para así obtener la tasa de depósito de material deseada.
- i) Iniciar el depósito, mediante la apertura de la tapa del cañón de trabajo.

En este trabajo de tesis las PVE que se fabricaron constan de multicapas de paladio cobalto, utilizando dos fuentes DC para depositar ambos materiales de manera alternada. Específicamente, el equipo cuenta sólo con dos fuentes DC, por lo que para depositar el separador de cobre después de las diez bicapas de paladio-cobalto, se debe cambiar el cable de la fuente DC del cañón donde se encuentra el blanco de paladio al cañón donde se encuentra el blanco de cobre, y al terminar el depósito del separador, se debe volver a conectar el cable de la fuente DC al cañón donde se encuentra el blanco de paladio para depositar las diez bicapas de paladio-cobalto restantes. Por último, el proceso de depósito se automatizó mediante el programa LabVIEW, para así controlar los tiempos de manera exacta, ya que de manera manual no se obtuvieron resultados reproducibles.

Las PVE que se fabricaron corresponden a dos sistemas de diez bicapas de paladio-cobalto, $[Pd_{1.5nm}Co_{0.3nm}]_{x10}$, separadas por un espaciador de cobre (ver figura 3.2), donde se varió el espesor del separador y se agregó una pequeña capa de cobalto. Las tasas de depósito del Pd, Co y Cu son 0.033 nm/s, 0.012 nm/s y 0.033 nm/s, respectivamente. Además, todas las pseudo válvulas de espín se recubrieron con 1.5 nm de paladio para evitar la oxidación.

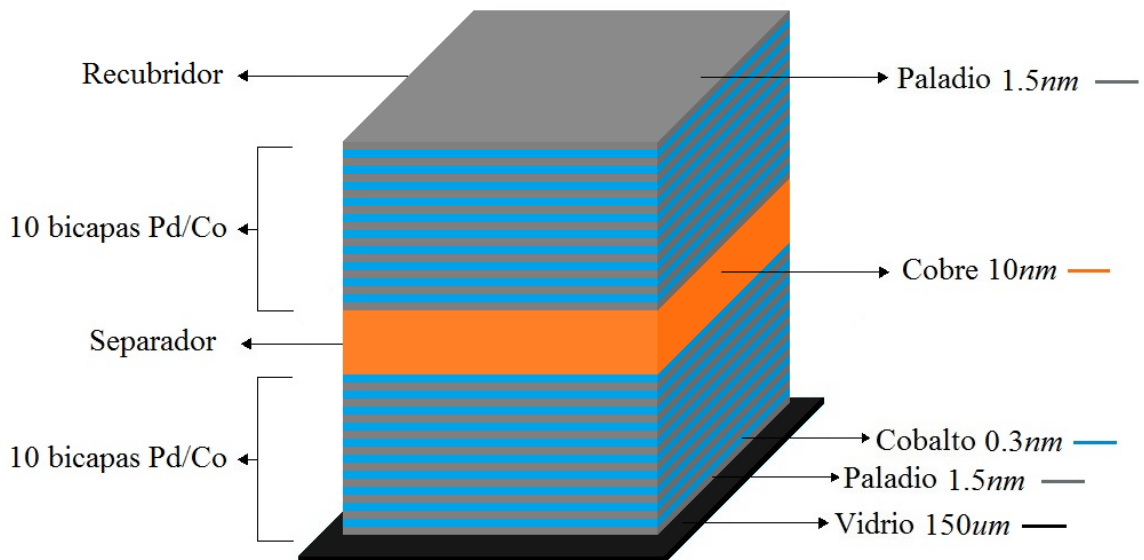


Figura 3.2: Esquema de una PVE de dos sistemas de $[Pd_{1.5nm}Co_{0.3nm}]_{x10}$ separados por un espaciador de Cu.

El detalle de cada PVE fabricada se encuentra en la siguiente tabla:

Nomenclatura	Composición	Espesor (nm)
SP05	$[\text{Pd}_{1.5\text{nm}}\text{Co}_{0.3\text{nm}}]_{\times 40} / \text{Pd}_{1.5\text{nm}}$	73.5
SP07	$[\text{Pd}_{1.5\text{nm}}\text{Co}_{0.3\text{nm}}]_{\times 10} / \text{Pd}_{1.5\text{nm}}$	19.5
SP06	$[\text{Pd}_{1.5\text{nm}}\text{Co}_{0.3\text{nm}}]_{\times 10} / \text{Cu}_{2\text{nm}} / [\text{Pd}_{1.5\text{nm}}\text{Co}_{0.3\text{nm}}]_{\times 10} / \text{Pd}_{1.5\text{nm}}$	39.5
SP04	$[\text{Pd}_{1.5\text{nm}}\text{Co}_{0.3\text{nm}}]_{\times 10} / \text{Cu}_{10\text{nm}} / [\text{Pd}_{1.5\text{nm}}\text{Co}_{0.3\text{nm}}]_{\times 10} / \text{Pd}_{1.5\text{nm}}$	47.5
SP02	$[\text{Pd}_{1.5\text{nm}}\text{Co}_{0.3\text{nm}}]_{\times 10} / \text{Co}_{0.3\text{nm}}\text{Cu}_{10\text{nm}} / [\text{Pd}_{1.5\text{nm}}\text{Co}_{0.3\text{nm}}]_{\times 10} / \text{Pd}_{1.5\text{nm}}$	47.8
SP11	$[\text{Pd}_{1.5\text{nm}}\text{Co}_{0.3\text{nm}}]_{\times 10} / \text{Co}_{0.6\text{nm}}\text{Cu}_{10\text{nm}} / [\text{Pd}_{1.5\text{nm}}\text{Co}_{0.3\text{nm}}]_{\times 10} / \text{Pd}_{1.5\text{nm}}$	48.1
SP12	$[\text{Pd}_{1.5\text{nm}}\text{Co}_{0.3\text{nm}}]_{\times 10} / \text{Cu}_{10\text{nm}}\text{Co}_{0.3\text{nm}}\text{Cu}_{10\text{nm}} / [\text{Pd}_{1.5\text{nm}}\text{Co}_{0.3\text{nm}}]_{\times 10} / \text{Pd}_{1.5\text{nm}}$	57.8

Tabla 3.1: Pseudo válvulas de espín.

Las PVE se depositaron en substratos de vidrio, los cuales tiene dimensiones de 24x50 mm y de 130 a 170 micras de espesor, esto último con la finalidad de poder cortarlo con facilidad para la posterior caracterización de las muestras. Además se utilizó una máscara sobre los substratos de vidrio con la finalidad de obtener las PVE en forma de cruz (como se esquematiza en la figura 3.3) para realizar las mediciones de transporte eléctrico. Las dimensiones de las cruces son de 4 mm de largo, 0.9 mm de ancho y los espesores se muestran en la última columna de la tabla 3.1.

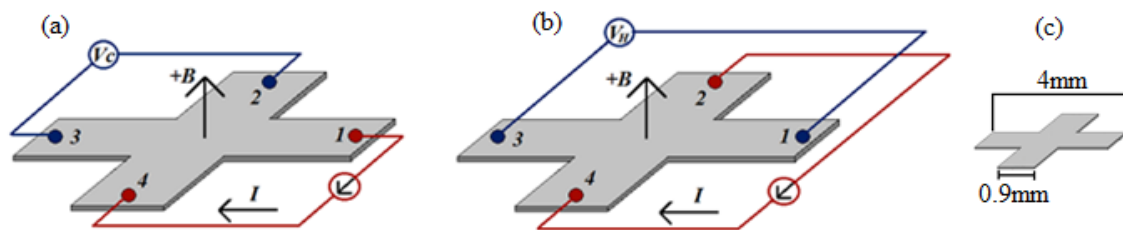


Figura 3.3: Esquema del formato cruz que se utilizó para medir (a) magnetorresistencia, (b) Efecto Hall, y (c) dimensiones de las PVE.

3.2 Equipos de Caracterización

3.2.1 Caracterización Magnética

3.2.1.1 Magnetómetro de Gradiente Alterno (AGM)

La medición del momento magnético mediante el AGM (Flanders, 1988) se consigue montando la muestra en el extremo de un porta-muestra que incluye un elemento piezoeléctrico y a la vez sometiendo la muestra a un campo DC fijo y a un gradiente de campo alterno (como se esquematiza en la figura 3.4). El campo DC es producido por un electroimán, mientras que el gradiente de campo alterno es producido por un par de bobinas pequeñas, y ambos se aplican a lo largo del eje x. El gradiente de campo produce una fuerza alterna sobre la muestra, que está dada por:

$$\vec{F} = -\nabla(-\vec{m} \cdot \vec{H}) \Rightarrow F_x = m \frac{dH}{dx}, \quad (3.1)$$

donde \vec{m} es el momento magnético de la muestra. De la ecuación 3.1 se observa que la fuerza es proporcional al momento magnético. Debido a esta fuerza alterna, la muestra comienza a vibrar flexionando el piezoeléctrico. El material piezoeléctrico del portamuestra genera un voltaje proporcional a la amplitud de la vibración, que a su vez es proporcional al momento magnético de la muestra.

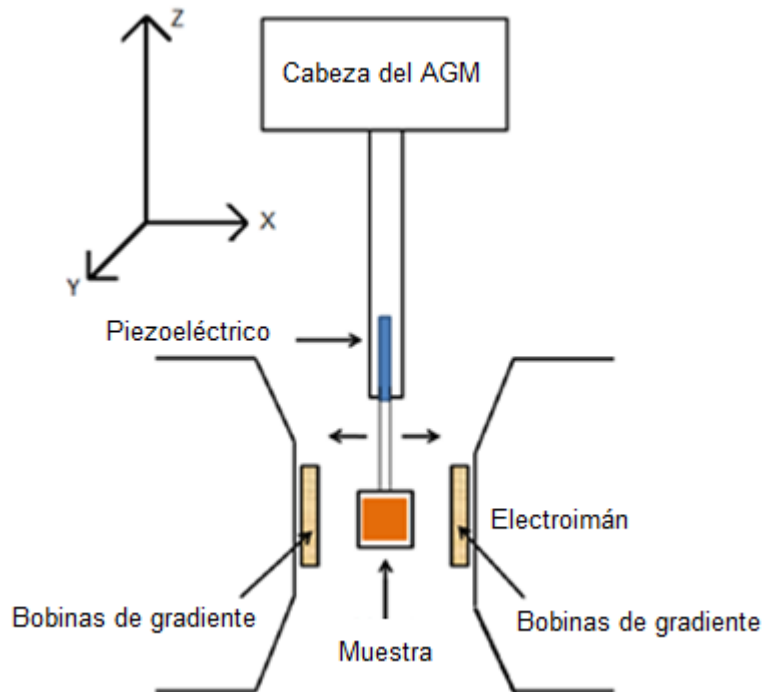


Figura 3.4: Esquema del magnetómetro de gradiente alterno.

Las muestras se midieron en dos orientaciones diferentes: en el plano y fuera del plano con respecto al campo magnético; donde para cada una de estas orientaciones se utilizó una sonda piezoeléctrica diferente.

3.2.1.2 Magnetómetro de Muestra Vibrante (VSM)

Para la caracterización magnética se utilizó el equipo CRYOGENIC en su modalidad de VSM. Este modo usa el efecto de la inducción magnética para la medida del momento magnético mediante la detección de un campo AC producido por la oscilación de la magnetización de la muestra, como se observa en el esquema de la figura 3.5.

La muestra es colocada en la parte baja de una columna y puesta a oscilar de forma vertical, típicamente entre 0.1 mm y 1.5 mm a una frecuencia entre 10 Hz y 100 Hz, usualmente 21 Hz. Si la muestra es ferromagnética, o produce una respuesta a la aplicación de un campo magnético externo, las oscilaciones inducirán una señal AC en el set de bobinas de medición, cuya amplitud de señal es proporcional al momento magnético de la muestra. Todos los análisis de señales asumen que el momento es un dipolo magnético y que el tamaño de la muestra es mucho menor que la dimensión de las bobinas puestas encima y debajo de la muestra.

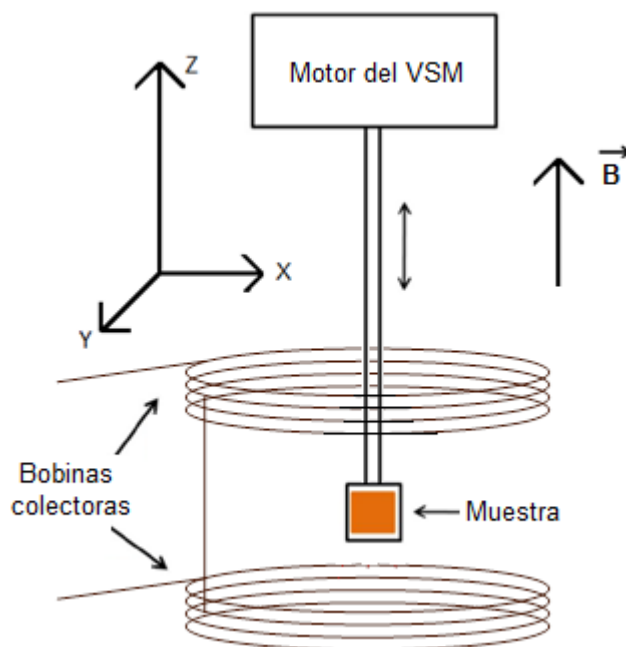


Figura 3.5: Representación esquemática de la muestra y el VSM con las bobinas puestas encima y abajo.

Una vez que la muestra esté en posición, el movimiento hacia arriba de la muestra magnética causa un incremento en el flujo a través de la bobina superior y un decrecimiento en el flujo de la bobina inferior. De esta forma el voltaje inducido, cuando la muestra está vibrando, es proporcional al momento magnético de la muestra, m .

El campo aplicado está en la dirección vertical y las bobinas del VSM están diseñadas para medir la componente vertical del momento magnético de la muestra. Esto es muy importante al momento de medir muestras que presentan algún tipo de anisotropía magnética, como son las muestras que se fabricaron, las cuales presentan anisotropía fuera del plano, por lo que es necesario que queden montadas con el eje de fácil magnetización paralelo al campo externo aplicado.

Ahora bien, para saber cuál de los dos magnetómetros, AGM o VSM, se usará para la caracterización magnética de las PVE, se midió una de las muestras en ambos equipos. Los resultados de la comparación de ambas medidas se observa en el siguiente gráfico:

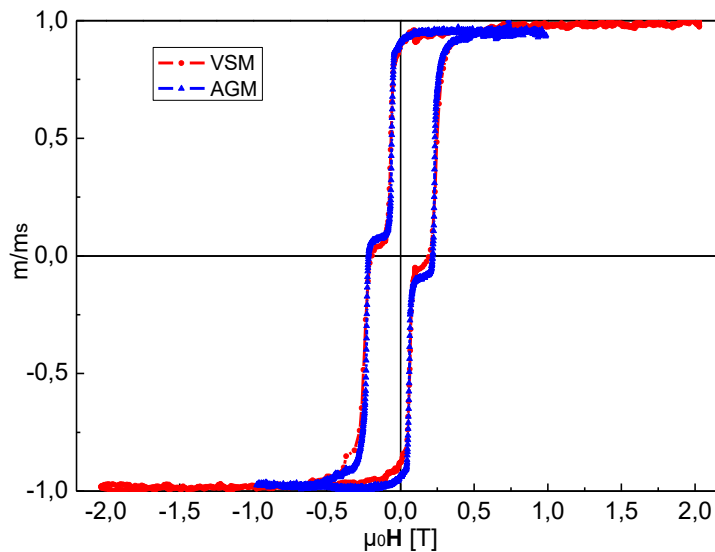


Figura 3.6: Curvas de $M \times H$ de una PVE medidas en el VSM y en el AGM.

Se observa que las medidas son consistentes entre sí, debido a que las curvas de magnetización en función del campo magnético se superponen. Ahora bien, cada equipo tiene sus ventajas y desventajas con respecto al otro. En el VSM se pueden aplicar campos magnéticos mucho más intensos que en el AGM pero su sensibilidad es menor. Sin embargo, no es necesario aplicar campos tan grandes para caracterizar las PVE, ya que como se observa en el gráfico la magnetización satura para campos menores a 1 T, lo que está dentro del rango de campo del AGM. Es por esto que para la caracterización magnética a temperatura ambiente se utiliza el AGM.

En el caso del VSM se pueden realizar mediciones de curvas de $M \times H$ a distintas temperaturas, por lo que para las PVE que se fabricaron, esta es la principal ventaja que tiene el VSM sobre el AGM. Debido a esto se escoge el VSM para caracterizar las PVE magnéticamente en función de la temperatura.

3.2.2 Caracterización eléctrica

La caracterización eléctrica de las PVE se llevó a cabo mediante dos sistemas de medición de transporte eléctrico, uno con una capacidad de 1.5 T a temperatura ambiente, y otro con una capacidad de 5 T (Cryogenic en su modalidad MRG), que tiene acoplado un criostato, con el que se realizaron mediciones en un amplio rango de temperaturas (2-300 K). En ambos equipos las medidas fueron realizadas con el campo magnético externo aplicado perpendicular al plano de las multicapas y la corriente eléctrica aplicada en el plano de las muestras.

3.2.2.1 Equipo de medición de transporte eléctrico

Para las mediciones a temperatura ambiente se utilizó un equipo con capacidad de 1.5 T, con el cual se realizaron mediciones de transporte a temperatura ambiente de las PVE. La técnica que se utilizó fue el método de Van der Pauw, o técnica de cuatro puntas (Van der Pauw, 1958a, Van der Pauw, 1958b) que permite obtener la resistividad y el coeficiente Hall de la muestra sin importar los parámetros geométricos de ésta, siempre y cuando la muestra sea lo más próximo a un sistema 2D, es decir, de un espesor muy pequeño en comparación a su sección transversal.

Para facilitar el montaje experimental, y poder realizar las mediciones de transporte utilizando el método de van der Pauw, se utilizaron muestras en formato cruz con un ancho de 400 micras, y los contactos se hicieron en los extremos de ésta, tal como se esquematiza en la figura 3.7.

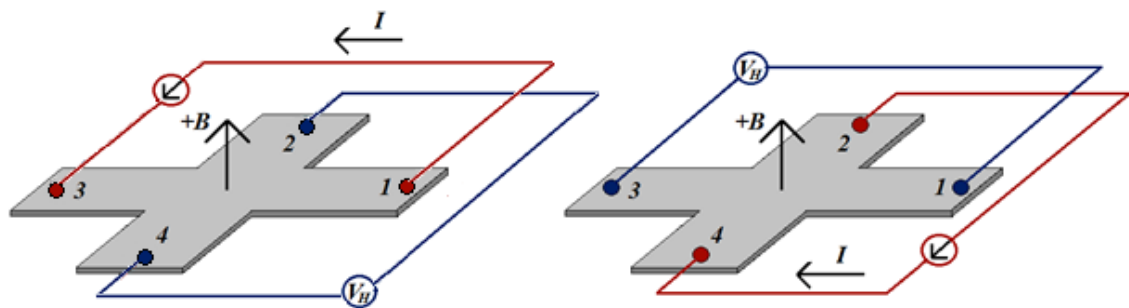


Figura 3.7: Representación esquemática del método de van der Pauw, utilizado para medir las PVE.

El sistema completo de medición está automatizado mediante la plataforma LabVIEW. De los componentes que cabe resaltar, el sistema está compuesto por una fuente de poder (6221 DC AND AC CURRENT SOURCE, KEITHLEY), que es la que suministra la corriente a la muestra, y por un nanovoltímetro (2182A NANOVOLTIMETER, KEITHLEY), para medir el voltaje que se genera en la muestra y una tarjeta matricial (MULTIMETER DATA ACQUISITION, KEITHLEY), para lograr el intercambio de los contactos, y así minimizar los errores en la medición producto de la asimetría de la muestra. Esto último debido a que al medir Efecto Hall también está ocurriendo el efecto de magnetorresistencia, y por la asimetría geométrica de la muestra, en la medida de Efecto Hall puede haber una componente magnetorresistiva.

Las mediciones de transporte eléctrico a bajas temperaturas se hicieron en el equipo CRYOGENIC en su modalidad de transporte eléctrico, donde las mediciones se hicieron en el rango de 5 a 300 K. Para llevar a cabo la medición en este equipo, también se usaron las muestras en formato cruz.

Se analizaron los resultados de la caracterización magnética y eléctrica comparando las medidas de magnetización y Efecto Hall, para la muestra de referencia SP07 y para la muestra SP12. A continuación se observan los resultados obtenidos:

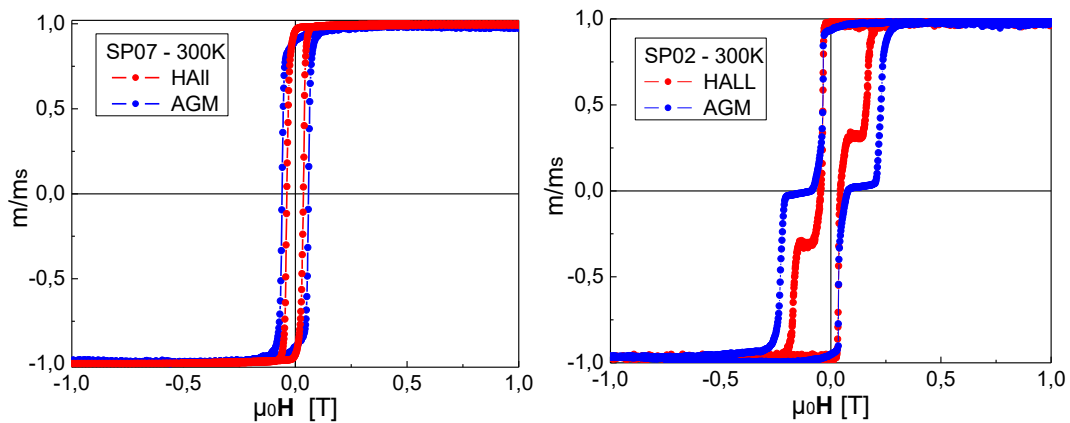


Figura 3.8: Curvas comparativas entre la medida de magnetización del AGM y la de transporte eléctrico del equipo Cryogenic para las PVE.

En la figura 3.8 se observa que hay una leve diferencia con respecto a los campos coercitivos entre la medida de la magnetización realizada en el AGM y la medida de Efecto Hall normalizada, tanto para la PVE de referencia así como también en la capa dura de la muestra SP02, donde el menor valor de campo coercitivo se observa para la medida de Efecto Hall. Una

posible causa de esta diferencia es que la muestra en el portamuestra del AGM no se encuentra completamente perpendicular al campo aplicado, por lo que una pequeña componente en el plano de las multicapas produce un aumento en la coercividad. A pesar de esta leve diferencia que existe entre ambas mediciones, los dos equipos son útiles para caracterizar magnética y eléctricamente las PVE. Por otro lado, en el gráfico se observa que la transición tipo escalón de la muestra SP02, que en la medida magnética está centrada en el origen, en la medida eléctrica se encuentra desplazada. Los posible motivos de este fenómeno serán discutidos en el análisis del siguiente capítulo.

Capítulo 4: Resultados Experimentales

4.1 Resultados Magnéticos

4.1.1 Número óptimo de bicapas en las pseudo válvulas de espín

Para definir el número óptimo de bicapas de Pd/Co de las PVE, se fabricaron sistemas de Pd/Co con diez y cuarenta números de bicapas. Se midió la curva de magnetización en función del campo, lo cual se observa en la figura 4.1.

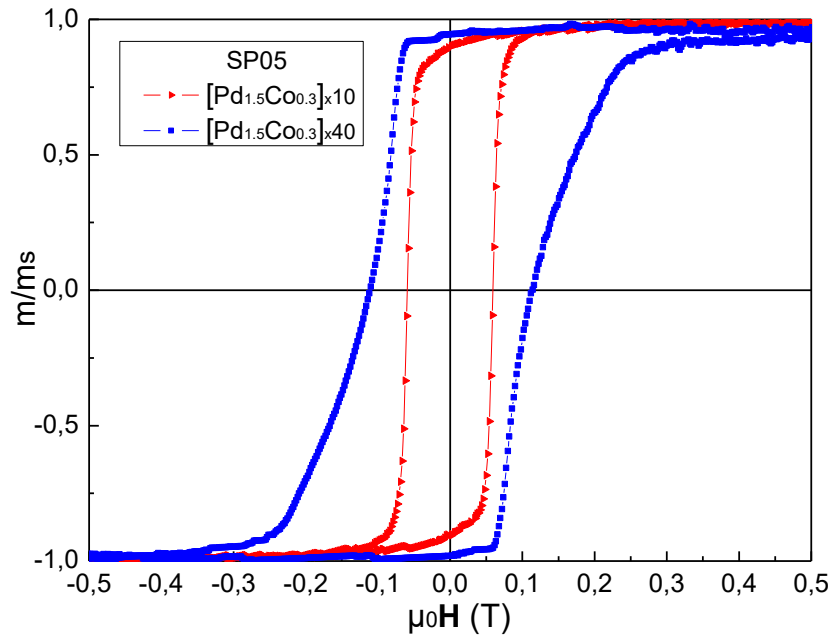


Figura 4.1: Curvas comparativas de $M \times H$ entre 10 y 40 bicapas de paladio-cobalto.

En el gráfico anterior se observa que la anisotropía magnética perpendicular que posee el sistema de diez bicapas de Pd/Co disminuye significativamente cuando el número de bicapas es cuarenta, esto se observa a partir de la magnetización de saturación, que en el caso de la muestra con cuarenta bicapas de Pd/Co se alcanza a un mayor campo externo con respecto a la de diez bicapas. Por otro lado, cuando el número de bicapas de Pd/Co es menor a diez, la señal magnética de la muestra disminuye considerablemente, lo que dificulta la medición magnética mediante el AGM y por tanto la obtención de medidas de magnetización con bajo ruido.

Sin embargo, en el trabajo de Liu et al. (2014), donde hicieron pseudo válvulas de espín de $\text{Co}_{0.4\text{nm}}/\text{Pt}_{1.5\text{nm}}$ con AMP (figura 4.2), se observa un análisis de la curvatura de las curvas de magnetización en función del número de bicapas, partiendo desde dos a cinco bicapas, donde la curva con dos bicapas pasa por el origen sin mostrar magnetización remanente, lo que indica que el eje perpendicular a las multicapas es el eje difícil. Aumentando el número de bicapas mejora la cuadratura de la curva de magnetización, obteniendo una magnetización remanente de igual valor a la magnetización de saturación.

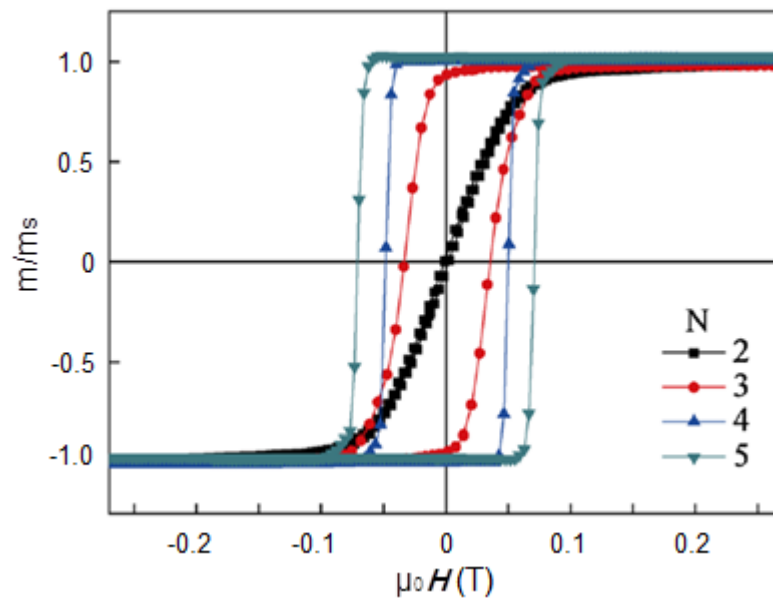


Figura 4.2: Curva de $\mathbf{M} \times \mathbf{H}$ para la capa libre $\text{Cu}_{3\text{nm}}([\text{Co}_{0.4\text{nm}}/\text{Pt}_{1.5\text{nm}}]_N)$ (Liu et al., 2014).

Por esta razón, se fabricaron PVE con diez bicapas de Pd/Co, ya que se asegura que se tendrá la suficiente señal magnética para poder caracterizar las muestras en el AGM y además porque con ese número de bicapas se conserva la AMP del sistema, que es lo que se busca en este trabajo de tesis.

4.1.2 Anisotropía magnética perpendicular de las pseudo válvulas de espín

Uno de los objetivos principales de este trabajo de tesis es la fabricación de PVE con AMP, es por esto que para cada una de las PVE que se fabricaron se realizó una caracterización magnética midiendo la magnetización de las muestras tanto en el plano como fuera del plano, tal como se observa en la figura 4.3. De esta forma se puede corroborar si efectivamente la magnetización se orienta perpendicular a la superficie. Los resultados de estas mediciones son los que se observan en los gráficos de la figura 4.4. En ellos se aprecia claramente que el eje de fácil magnetización de las PVE es cuando el campo externo se aplica perpendicular a la muestra, esto debido a que se necesita un menor campo externo para saturar la magnetización de la muestra con respecto a la orientación en el plano. Una vez que el sistema está saturado, implica que todos los momentos magnéticos del sistema están alineados paralelos al campo externo. Entonces cuando la anisotropía es perpendicular se necesita un menor campo externo para saturar los sistemas que cuando este se aplica fuera del plano de la película. De hecho se observa que cuando el campo se aplica fuera del plano, la magnetización satura alrededor de 0.25 T mientras que cuando el campo externo se aplica en el plano se necesita un campo mayor a 1 T para lograr saturar la magnetización. Se observa en la figura 4.4 que la anisotropía de todas las PVE que se fabricaron es perpendicular al plano de la muestra.

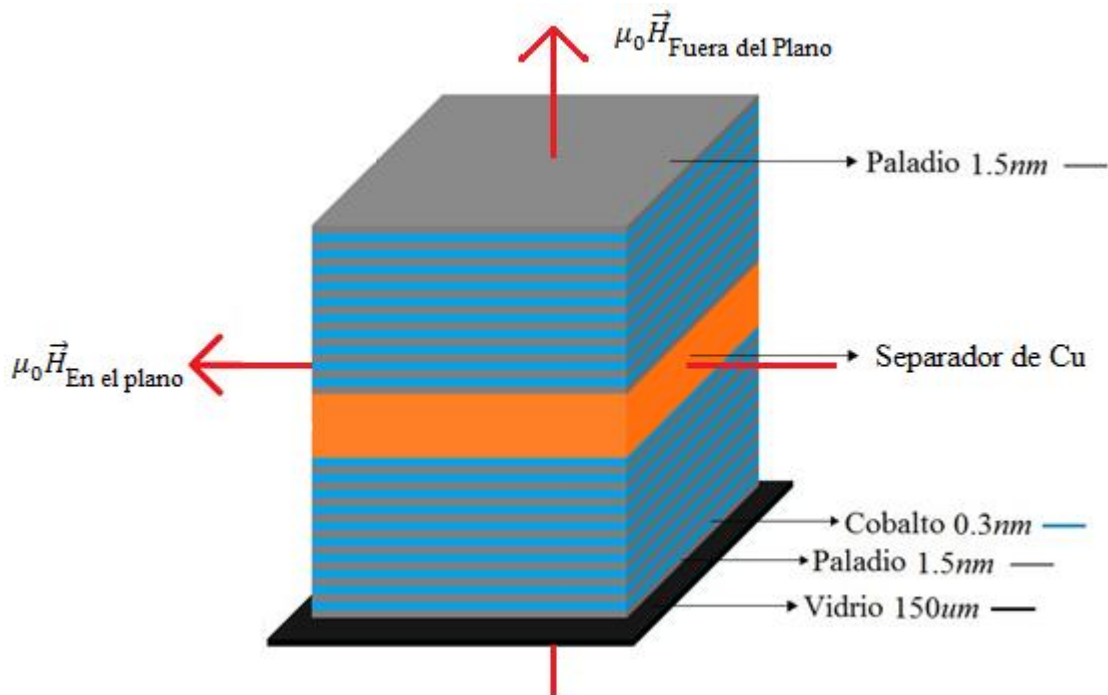


Figura 4.3: Esquema de la orientación del campo externo aplicado a las PVE respecto a la anisotropía de éstas.

En la nomenclatura de los gráficos sólo aparece el separador correspondiente a cada PVE, ya que en todas ellas los dos sistemas magnéticos presentes corresponden a diez bicapas de Pd/Co.

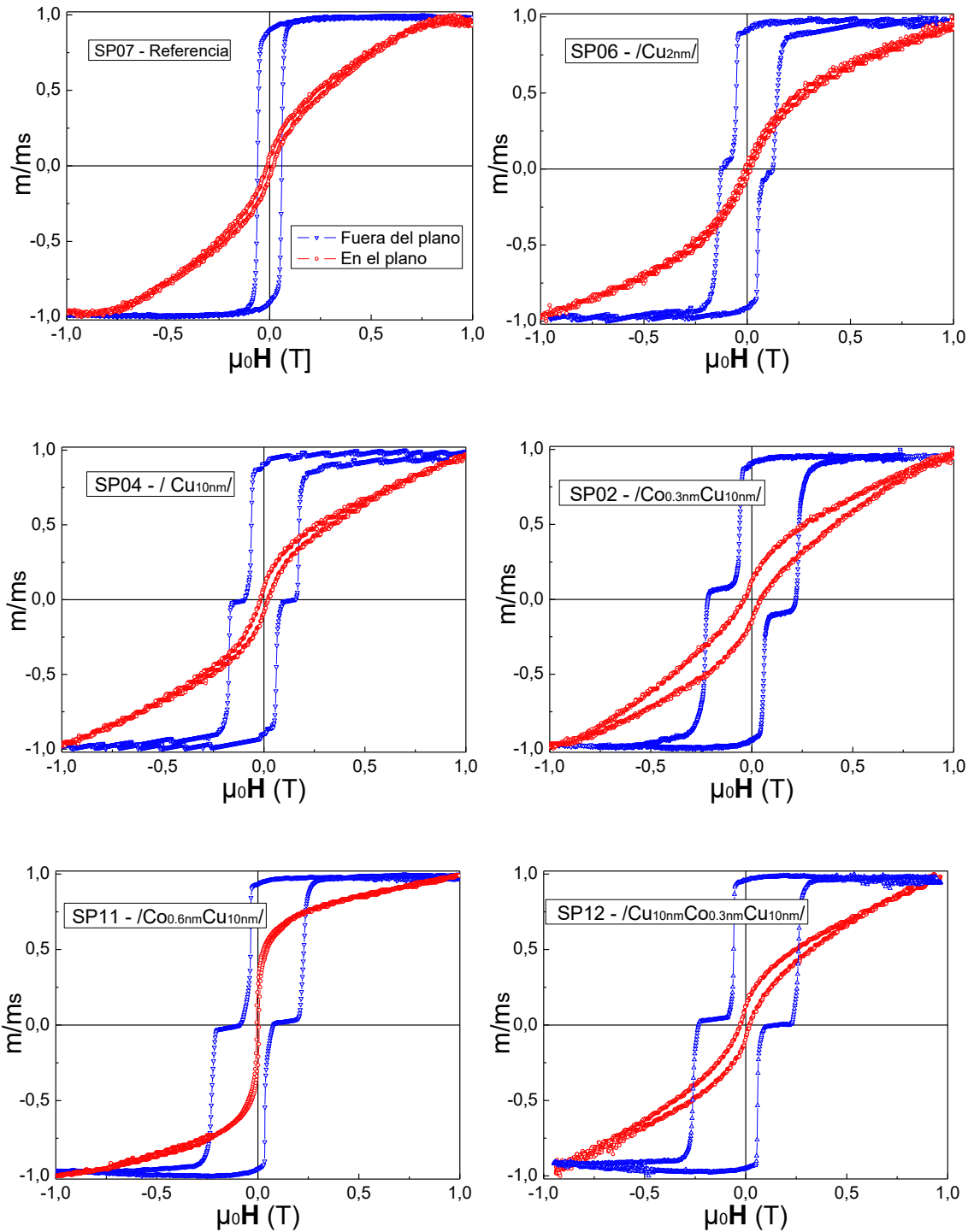


Figura 4.4: Curvas de $M \times H$, tanto fuera como en el plano de todas las PVE que se fabricaron.

El origen de la AMP en sistemas de multicapas de Pd/Co se atribuye a la asimetría de los átomos de Co en la red de Pd (Engel et al., 1991, Néel, 1954), es por esto que cada una de las PVE que se fabricaron comienzan con Pd y luego sobre éste se depositó el Co, para que de esa forma exista una tensión en el sistema y así lograr la AMP (Guo et al., 2012). La tensión generada se debe a la diferencia que existe entre las constantes de red de estos elementos, ya que por un lado el Pd al crecer como un cúbica centrada en las caras su constante de red es de $a=b=c=3,8908 \text{ \AA}$ y el cobalto al crecer con una estructura cristalina hexagonal compacta tiene constantes de red de: $a=b=2,5140 \text{ \AA}$ y $c= 4,1050 \text{ \AA}$, y al crecer como una cúbica centrada en las caras tiene una constante de red de $a=b=c=3,5441 \text{ \AA}$. Por lo que al ser depositado el Co sobre el Pd se obtiene anisotropía fuera del plano, sin embargo esto sólo se logra con pequeños espesores de Co, como se explicó en la introducción en la sección de anisotropía magnética, de tal forma que la contribución de la interfaz predomine por sobre la contribución volumétrica, es por ello que se depositan 0.3 nm de Co, ya que si se deposita mayor cantidad de este elemento el sistema se comienza a relajar y la anisotropía se orienta paralela al plano de la película. Otro factor que influye en la AMP en los sistemas de multicapas de Pd/Co son las propiedades magnetoelásticas de la aleación interfacial de Pd/Co (Gontarz & Lucinski, 1991, Guo et al., 2012, Kim & Shin, 2001).

En los gráficos de la figura 4.4 también se observa que existe una transición tipo escalón entre los dos sistemas magnéticos (transición que es característica de las PVE), a excepción de la muestra SP07 que corresponde al sistema de referencia de solo diez bicapas de Pd/Co. Dicha transición tipo escalón se debe a la presencia del Cu (Thiyagarajah & Bae, 2008), ya que la presencia del separador relaja el sistema haciendo que la anisotropía esté orientada no completamente fuera del plano de las multicapas, entonces, para que la capa dura comience a revertir su magnetización se necesita aplicar un campo externo mayor. Ahora bien, en los gráficos se observa que la transición tipo escalón en algunas PVE es más ancha que en otras, esto se debe a la diferencia que existe entre los separadores de cada una de las PVE, los cuales se fueron variando de forma de obtener una transición tipo escalón más ancha y mejor definida. La diferencia entre los campos coercitivos de la capa libre y la capa dura fue optimizada, con la finalidad de obtener máximos bien definidos en las curvas de magnetorresistencia. La variación en los espesores de las PVE es lo que se analizará en la siguiente sección.

4.1.3 Optimización de las pseudo válvulas de espín

Las PVE que se fabricaron se hicieron con la finalidad de optimizar las propiedades magnéticas de la muestra SP06, que es la que consta de un separador de Cu de 2 nm. Específicamente se busca aumentar la coercitividad de la capa dura de la muestra SP06, para posteriormente en la caracterización eléctrica obtener máximos bien definidos de magnetorresistencia. Es por ello que la muestra SP04 posee 10 nm de Cu en el separador y la muestra SP02 posee 0.3 nm de Co antes de los 10 nm de Cu. En el gráfico de la figura 4.5 se observa el aumento de campo coercitivo en la capa dura de estas dos PVE, comparadas con la referencia (SP07) y la muestra SP04. En la nomenclatura del gráfico sólo aparece el separador correspondiente a cada PVE, ya que en todas ellas los dos sistemas magnéticos presentes corresponden a diez bicapas de Pd/Co.

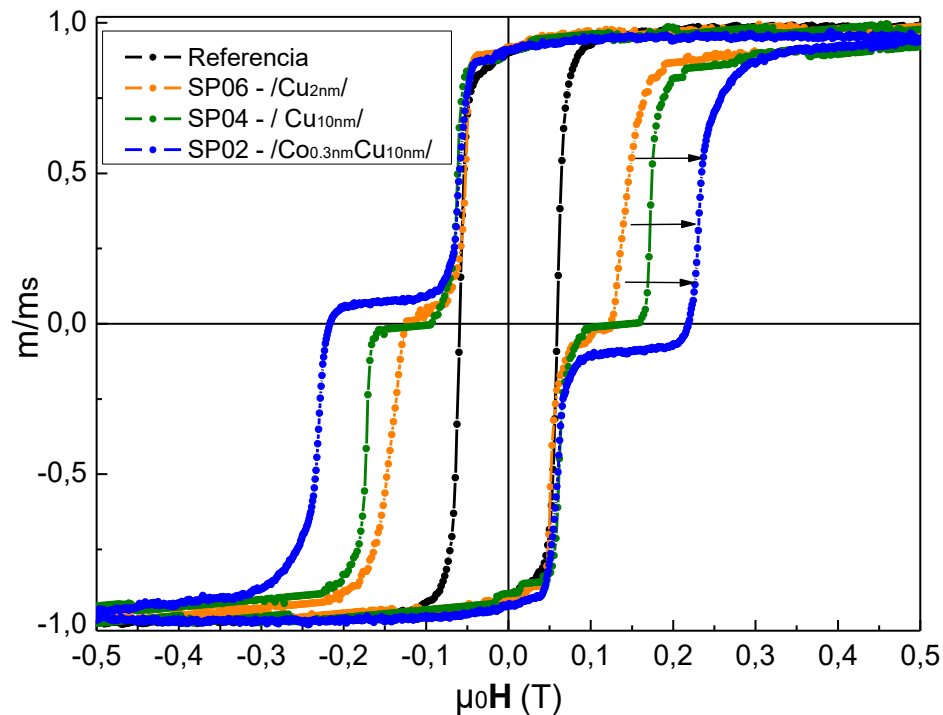


Figura 4.5: Curvas comparativas de $M \times H$, fuera del plano de las muestras SP02, SP04, SP06 y la referencia.

En el gráfico anterior se observa que al depositar mayor cantidad de Cu la coercitividad de la capa dura aumenta de 0.14 T a 0.17 T y que al agregar Co en el separador este efecto se acrecienta, y el campo coercitivo aumenta considerablemente a 0.23 T.

Posteriormente se fabricó la muestra SP11 que posee el 0.6 nm de cobalto antes de los 10 nm de Cu, para así ver si el efecto del aumento en la coercitividad de la capa dura sigue aumentando. Finalmente se hizo la muestra SP12 que corresponde a un sándwich de Cu/Co/Cu. En el gráfico de la figura 4.6 se observan estas últimas dos muestras comparadas con la referencia y la muestra SP02, que fue la que obtuvo los mejores resultados en el análisis anterior.

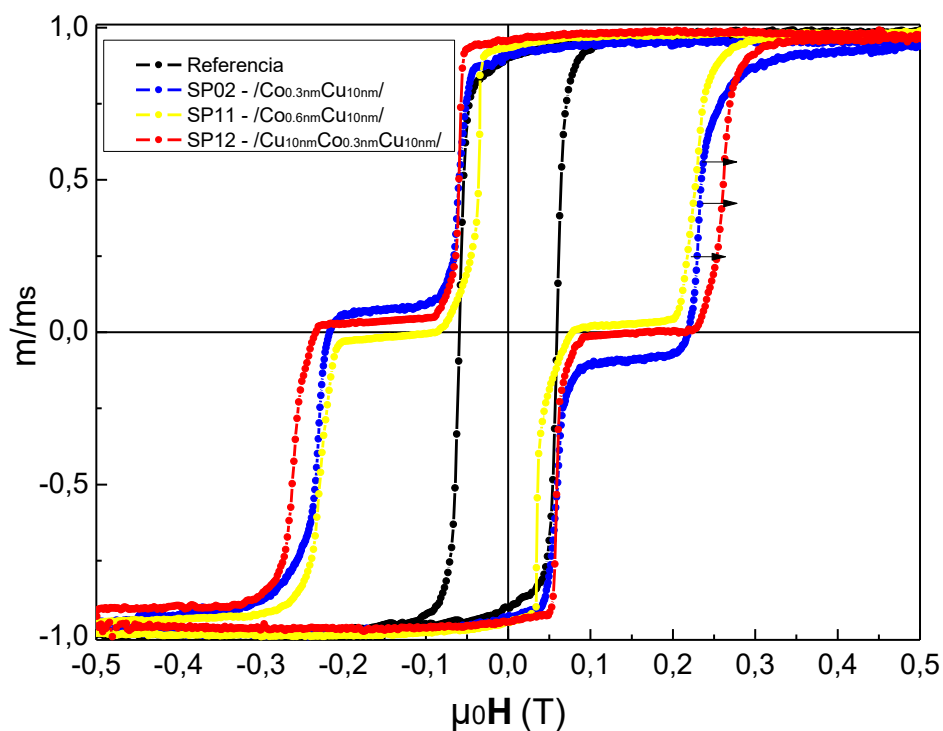


Figura 4.6: Curvas comparativas de $M_x H$, fuera del plano de las muestras SP02, SP11, SP12 y la referencia.

En el gráfico anterior se observa que al aumentar al doble la cantidad de Co antes de los 10 nm de Cu no produce un aumento en la coercitividad de la capa dura y que el sándwich de Cu/Co/Cu sí produce un aumento en la coercitividad de ésta, a un valor de 0.25 T, pero que ese aumento solo se debe a que se agregó el doble de Cu con respecto a las muestras anteriores.

En el gráfico de la figura 4.7 se observan las curvas de magnetización de todas las muestras que se fabricaron, donde se observa claramente la diferencia del valor de campo coercitivo entre ellas.

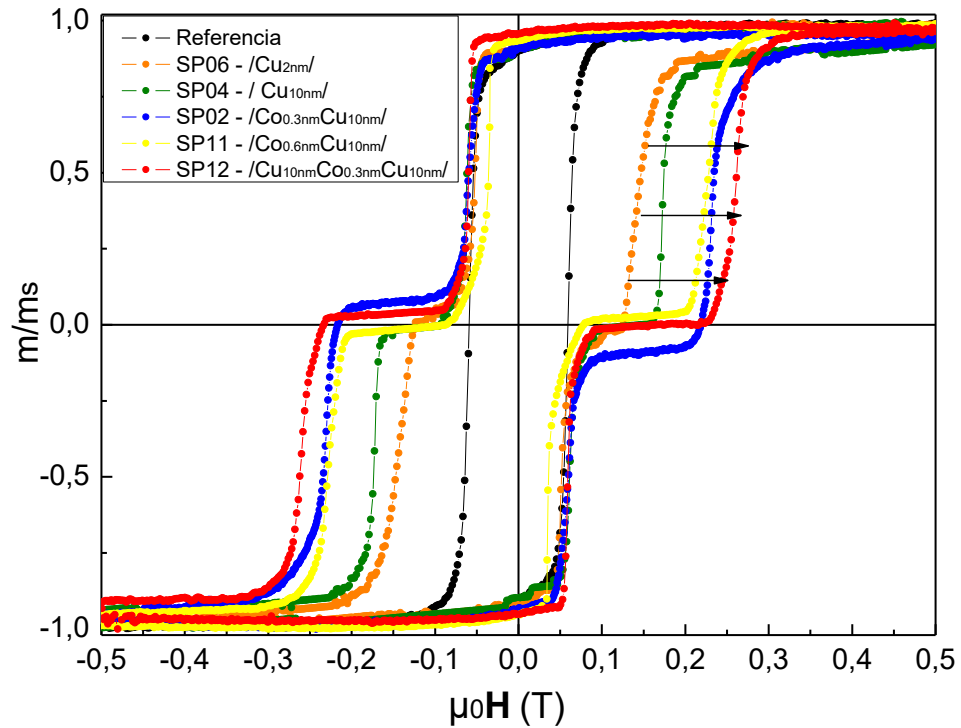


Figura 4.7: Curvas de magnetización de todas las PVE.

A partir de los resultados que se observan en la figura 4.7 sólo a algunas muestras se les realizó mediciones de transporte eléctrico, es decir, a las que presentaron los mayores valores de campo coercitivo en la capa dura.

4.1.4 Resultados magnéticos en función de la temperatura

A continuación se muestra la dependencia de la magnetización en función de la temperatura para la muestra SP02, entre los 5-300 K:

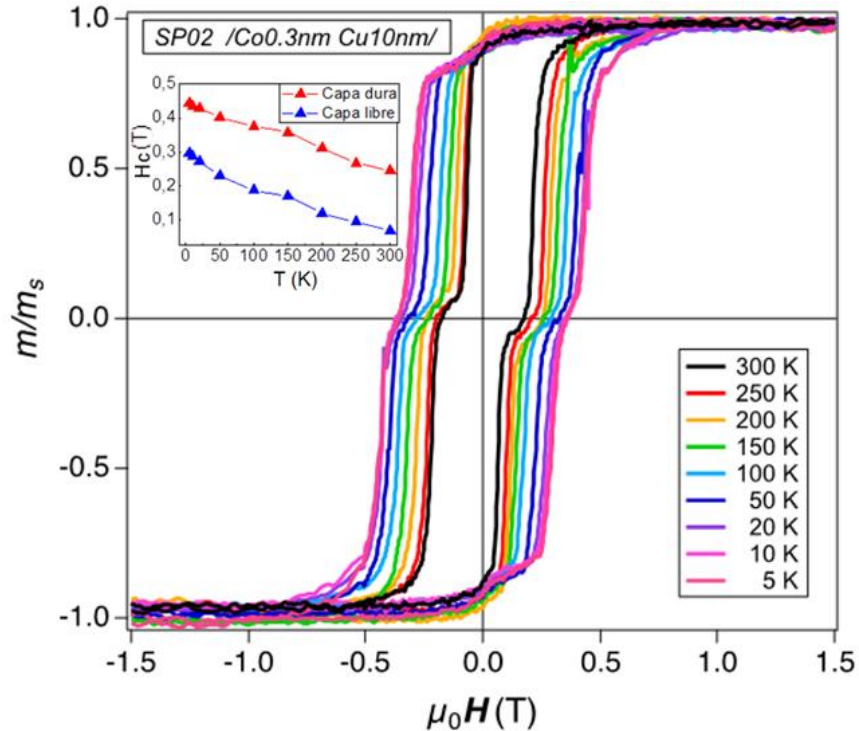


Figura 4.8: Curvas de $M \times H$ a distintas temperaturas de la muestra SP02. En el gráfico interior se observa como aumenta el campo coercitivo de la capa dura y la capa libre de la pseudo válvula de espín al disminuir la temperatura.

En el gráfico de la figura 4.8 se observa como a medida que la temperatura disminuye la coercitividad de ambos sistemas magnéticos aumenta, tal como se observa en el gráfico interior de la figura 4.8. En el caso de la capa libre a una temperatura de 300 K tiene un campo coercitivo de 0.07 T, y a 5 K este aumenta a 0.31 T, mientras que la capa dura a 300 K tiene un campo coercitivo de 0.24 T, a 5 K este aumenta a 0.44 T. El aumento en la coercitividad de ambos sistemas magnéticos se debe a que los momentos magnéticos necesitan una mayor energía para pasar de un estado antiparalelo a uno paralelo a medida que se baja la temperatura. Como se observa en el gráfico interior de la figura 4.8 el aumento en el campo coercitivo de ambas capas pareciera ser simétrico, ya que ambas curvas tienen una pendiente similar, sin embargo, a bajas temperaturas el campo coercitivo de la capa libre tiene un aumento mayor que la capa dura, lo que produce que la transición tipo escalón sea cada vez más pequeña a medida que se disminuye la temperatura, dificultando la distinción entre ambos sistemas magnéticos, y por ende la estabilidad de la PVE se va perdiendo, ya que se requiere una pequeña variación en el campo externo para pasar de un estado antiparalelo a uno

paralelo. Una posible explicación de que la transición tipo escalón disminuya su longitud a medida que disminuye la temperatura es la competencia entre la energía de interacción dipolar y la energía térmica. Para corroborar esta hipótesis habría que hacer un estudio de la magnetización en función de la temperatura y del espesor del separador de cobre, lo que está fuera del alcance de esta tesis.

4.2 Resultados de Magnetotransporte

4.2.1 Resistividad

En el gráfico de la figura 4.9 se observan los resultados de resistividad de las muestras SP07, SP11 y SP12, en función de la temperatura, de 5 – 300 K, y a cero campo magnético (0 T).

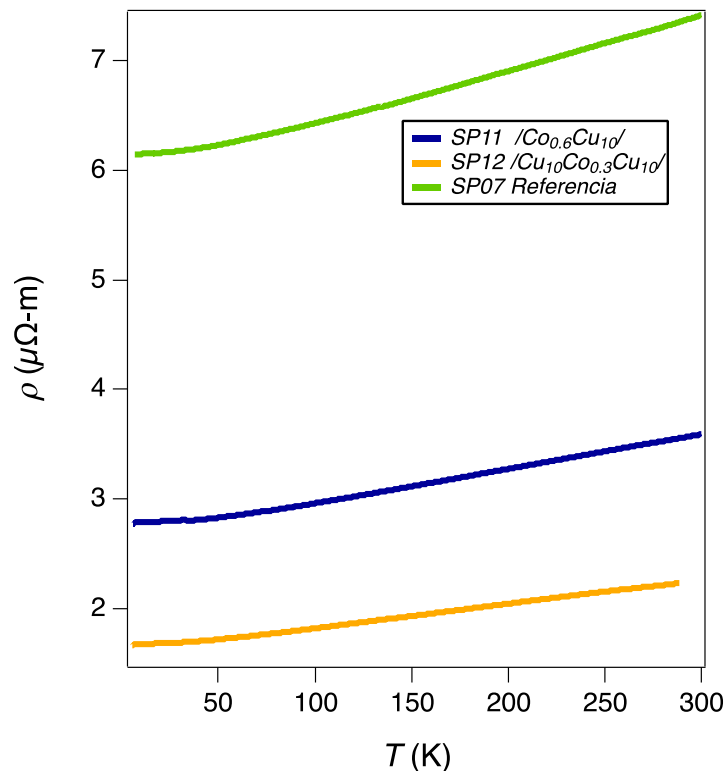


Figura 4.9: Resistividad en función de la temperatura a campo cero, para las muestras SP07, SP11 y SP12.

Se observa que las pseudo válvulas de espín presentan un comportamiento metálico, debido a que la resistividad decae prácticamente proporcional a la temperatura, debido a que al bajar la temperatura se disminuye la agitación térmica de los átomos de la muestra, lo que provoca que haya menos eventos de dispersión, por lo que las muestras son menos resistivas. La

resistencia residual que se observa se da por los defectos o impurezas que puedan haber en la estructura cristalina de las PVE.

En el gráfico también se observa que hay una variación en la resistividad en función del espesor de las PVE, donde el mayor valor se observa para la muestra SP07 (referencia), que es la que posee solo un sistema magnético y no tiene ningún separador, a diferencia de las muestras SP11 y SP12 donde ambas tienen un separador no magnético y conductor, como lo es el cobre, razón por la cual presentan una disminución en la resistividad con respecto a la muestra de referencia.

4.2.2 Efecto Hall

A continuación se muestran los resultados obtenidos de Efecto Hall de las muestras SP11 y SP12, que corresponden a las PVE que presentaron los mayores campos coercitivos en su capa dura, donde se comparan con las PVE que solo poseen Cu como separador, es decir, las muestras SP04 y SP06.

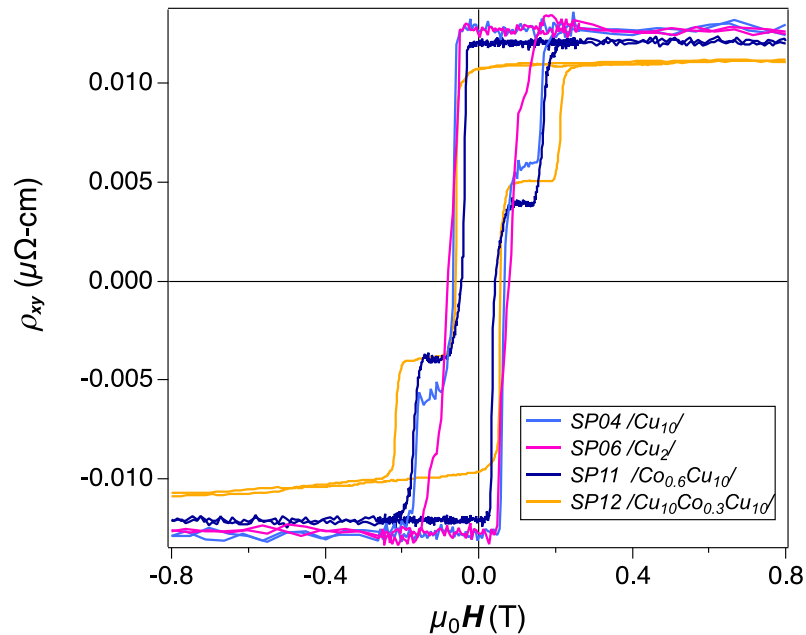


Figura 4.10: Efecto Hall de las muestras SP04, SP06, SP11 y SP12.

Lo primero que resalta a la vista del gráfico anterior es el desplazamiento que existe en el escalón que marca la distinción entre la capa blanda y dura, el cual en las medidas magnéticas estaba centrado en el origen y que en esta ocasión se encuentra desplazado. Una posible causa es que al aplicar la corriente en las muestras no solo está ocurriendo el Efecto Hall, sino

también el efecto de magnetorresistencia, por lo que puede ser que en la medida de Efecto Hall se obtenga una componente magnetorresistiva, que provoca el desplazamiento del escalón. Esto es debido a que la corriente que se aplica a las muestras no es completamente transversal al campo aplicado, por lo que la componente longitudinal podría provocar el desplazamiento vertical del escalón reflejado en un cambio en la resistividad.

4.2.2.1 Efecto Hall en función de la temperatura

Las muestras que se midieron fueron la SP07 y la SP12, donde los resultados que se obtuvieron son los que aparecen en las figuras 4.11 y 4.12.

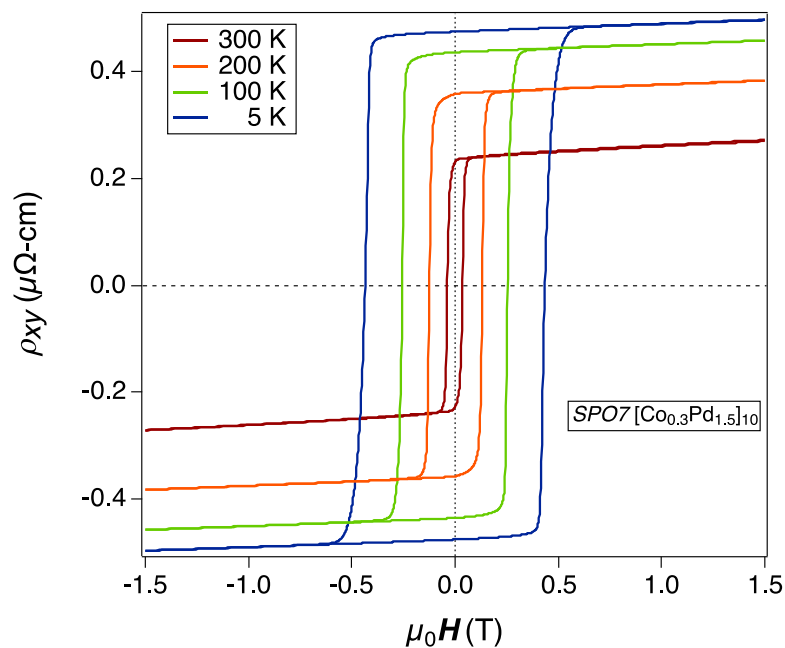


Figura 4.11: Efecto Hall de la muestra SP07 a distintas temperaturas.

En el gráfico de la figura 4.11 se observa como la resistividad Hall de la muestra SP07 va aumentando a medida que disminuye la temperatura, esto se debe a que al disminuir la temperatura la magnetización de la muestra aumenta, y la resistividad Hall es directamente proporcional a la magnetización de la muestra, como se observa en la ecuación 1.11 del capítulo 1, por lo que al aumentar la magnetización también aumenta la resistividad Hall de la muestra. En el gráfico 4.11 también se observa como la coercividad de la muestra SP07 aumenta a medida que se disminuye la temperatura, de manera similar a lo observado en las medidas de magnetización de la muestra SP02 realizadas en el VSM.

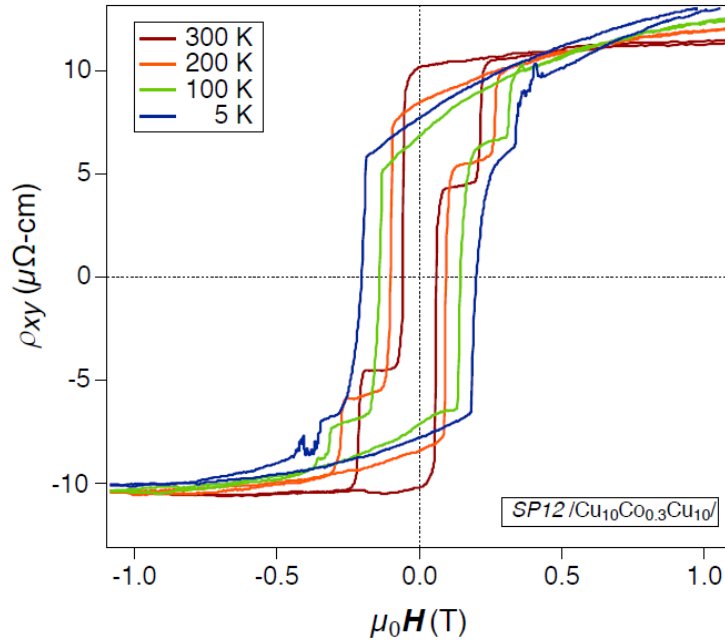


Figura 4.12: Efecto Hall de la muestra SP12 a distintas temperaturas.

En el gráfico de la figura 4.12 se observa que la resistividad Hall de la muestra SP12 disminuye levemente a medida que se baja la temperatura, contrario a lo que ocurre en la muestra SP07 del gráfico 4.11 donde la resistividad aumenta. Esto se atribuye a que la muestra SP12 consta de dos sistemas magnéticos separados por un espaciador de cobre, a diferencia de la muestra SP07 que no posee separador, y como el cobre es muy buen conductor la mayor parte de la corriente pasa a través de este material y así la resistividad Hall casi no varíe al bajar la temperatura. También se observa que a medida que se disminuye la temperatura la transición tipo escalón se aleja del origen, de tal forma que a 5 K es prácticamente indistinguible, esto se atribuye a que al realizar la medida de Efecto Hall, en la muestra también está ocurriendo el efecto de magnetorresistencia, que aumenta a bajas temperaturas, por lo que el desplazamiento del escalón se debe al desplazamiento de los máximos de la medida de magnetorresistencia en función del campo externo aplicado.

4.2.3 Magnetorresistencia

A continuación se muestran los resultados obtenidos en función de la temperatura para la muestra SP07, donde los valores de MR están expresados en porcentaje según la ecuación 1.6 del punto 1.3 del capítulo 1.

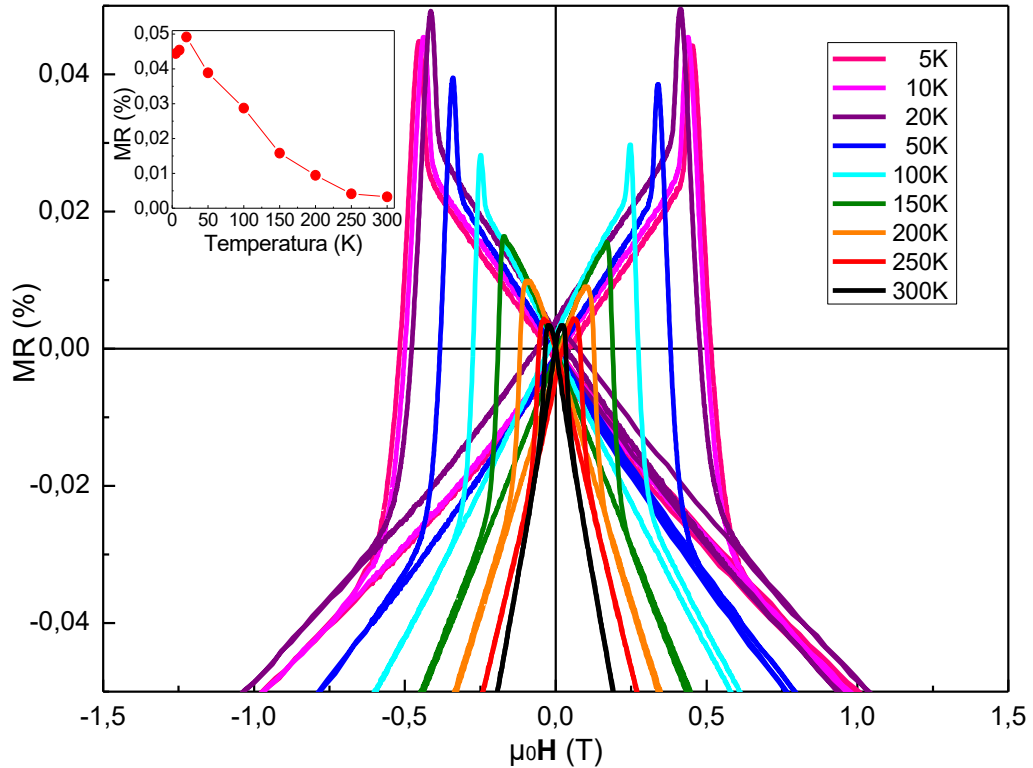


Figura 4.13: Magnetorresistencia de la muestra SP07 en función de la temperatura. En el gráfico interior se observa como aumenta el porcentaje de MR al disminuir la temperatura, llegando a un valor máximo a los 20 K.

En el gráfico de la figura 4.13 se observa que los valores de MR son bastante pequeños, menores que 0.1%, esto se debe a que la muestra SP07 consta de solo un sistema magnético, correspondiente a diez bicapas de Pd/Co, por lo que no existe un estado de alta y baja resistencia en esta PVE, así que la variación de la resistencia que se observa en el gráfico se debe principalmente al efecto del campo magnético en la película de cobalto. Los dos máximos observados ocurren debido al comportamiento magnético que presentan este tipo de muestras según la dirección en que se está aplicando el campo externo

A continuación se muestran los resultados de MR obtenidos en función de la temperatura para la muestra SP02:

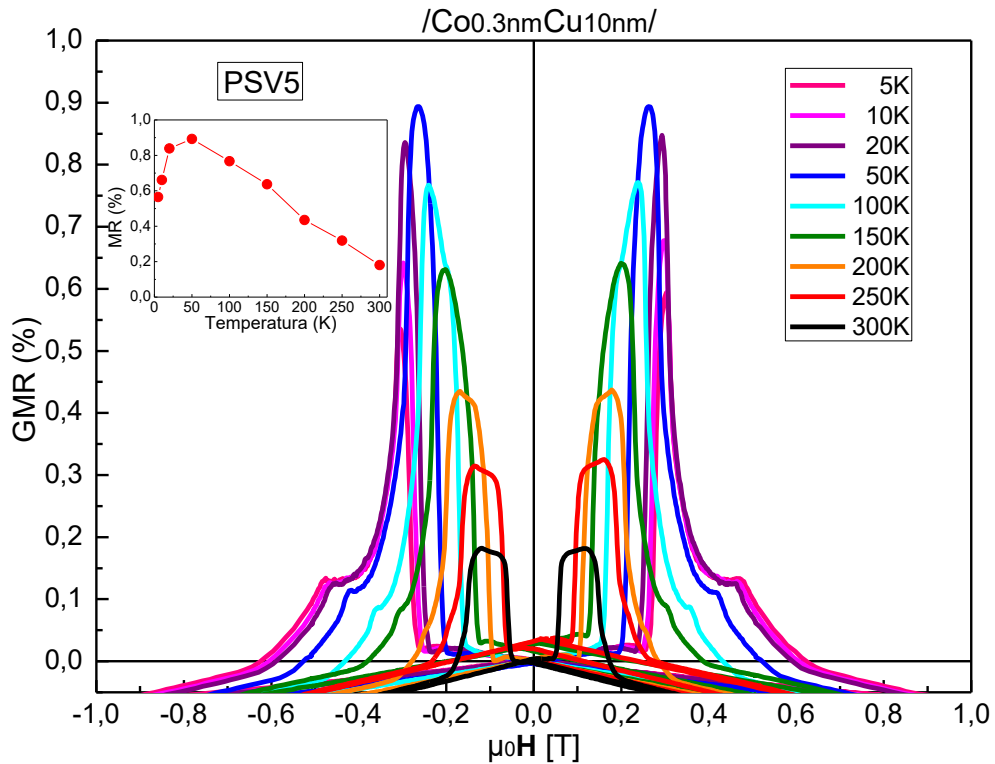


Figura 4.14: Magnetorresistencia de la muestra SP02 en función de la temperatura. En el gráfico interior se observa como aumenta el porcentaje de MR al disminuir la temperatura, llegando a un valor máximo a los 50 K.

En el gráfico de la figura 4.14 se muestran las curvas de MR para diferentes temperaturas. A temperatura ambiente se observa que los máximos de la MR están muy bien definidos, lo que se atribuye a que la transición tipo escalón de la muestra SP02 en la medida magnética es bastante ancha, es decir, hay una gran diferencia entre la coercitividad de la capa libre y la capa dura, que se logró mediante el depósito de 0,3 nm de Co antes de los 10 nm de Cu en el separador. Además se observa que el valor de MR es mucho más grande con respecto a la MR de la muestra SP07, que se muestra en la figura 4.13, esto debido a que la muestra SP02 consta de dos sistemas magnéticos, que a ciertos valores de campo sus momentos magnéticos netos se encuentran no colineales, generando un estado de alta resistencia en la PVE. Ahora bien, con respecto a los valores de MR observados, estos aumentan a medida que se disminuye la temperatura, tal como se observa en el gráfico interior de la figura 4.14, partiendo a 300 K en un valor de 0,2% y llegando a un valor máximo, a los 50 K, de 0,9%. Debido a estos valores de MR obtenidos y al hecho de que los máximos en la curva de MR están bien

definidos, es que las PVE que se fabricaron sirven como una posible aplicación, ya sea en un potencial sensor, así como también en un sistema de grabación magnética (Daughton, 2000, Treutler, 2001, Parkin et al., 2003).

Ahora bien, para poder apreciar de mejor forma la diferencia de MR que existe entre la muestra SP07 con respecto a la muestra SP02, a continuación se observan los gráficos de MR de ambas PVE a 300 K y a 50 K, este último valor es donde se observa el máximo de MR para la muestra SP02.

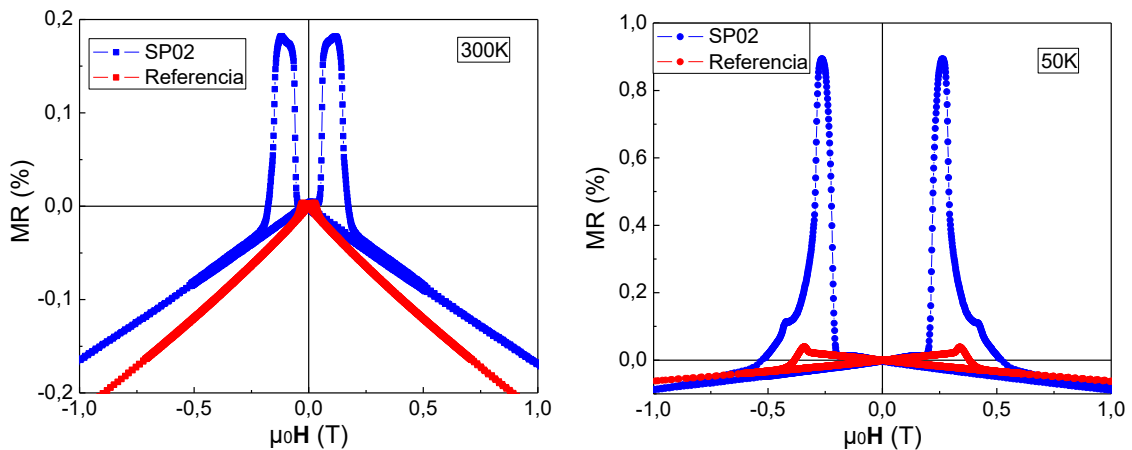


Figura 4.15: Comparación entre la magnetorresistencia de las muestras SP07 y SP02 a 300K y 50K.

En los gráficos de la figura 4.15 se observa una gran diferencia en la magnetorresistencia entre la muestra SP07 y la muestra SP02, esto debido a que la muestra SP07 sólo consta de un sistema magnético, por lo que su respuesta magnetorresistiva sólo depende de cómo varía la resistencia eléctrica de los elementos que la componen en respuesta de un campo magnético externo; mientras que la muestra SP02 al poseer un separador de cobre, el cual desacopla el sistema en dos capas magnéticas, hace que una revierta antes que la otra provocando un estado de alta resistencia. Es por esto que en todo el rango de temperatura los valores de MR son superiores para la muestra tipo pseudo válvula de espín.

El motivo de por qué cuando el momento magnético de ambas capas ferromagnéticas se encuentra de forma antiparalela corresponde a un estado de alta resistencia es, producto de la dependencia de la resistencia eléctrica que sufren los electrones en función de si su dirección de espín es paralela o antiparalela en relación con el momento magnético de la capa ferromagnética que atraviesan; de tal forma que si los vectores de magnetización de las capas ferromagnéticas presentan una alineación antiparalela, tanto los electrones con espín \uparrow y espín \downarrow tendrán espín antiparalelo en una de las capas magnéticas que atraviesan, por lo tanto

los electrones tendrán dificultad en circular por la estructura y la resistencia será alta. Por otro lado, cuando las dos capas ferromagnéticas tienen alineación paralela, al menos un grupo de electrones (espín \uparrow o espín \downarrow) tendrán espín paralelo en ambas capas y podrán moverse fácilmente a través de la estructura, por lo tanto la resistencia del material será pequeña. Es por esto que a las PVE se les considera como una válvula, ya que determinan cuales electrones son más fáciles de transmitir, espín \uparrow o espín \downarrow .

Por otro lado, hay que tener presente que el separador de Cu disminuye el efecto MR de la PVE, debido a que es conductor, sin embargo, es gracias al separador que se obtienen grandes valores de MR en las PVE, debido a que es el separador el que desacopla el sistema en dos capas ferromagnéticas, provocando los estados de alta y baja resistencia. De hecho como se observa en los gráficos de la figura 4.15 se logra una gran diferencia porcentual entre el sistema desacoplado y el libre, obteniendo a 300 K un 0,18% de diferencia, mientras que a 50 K la diferencia es de 0,85%.

Finalmente a continuación se observa en la figura 4.16 un gráfico en conjunto de la curva de MR de la muestra SP02 y de su curva de magnetización, para de esa forma corroborar que ambas medidas son consistentes entre sí.

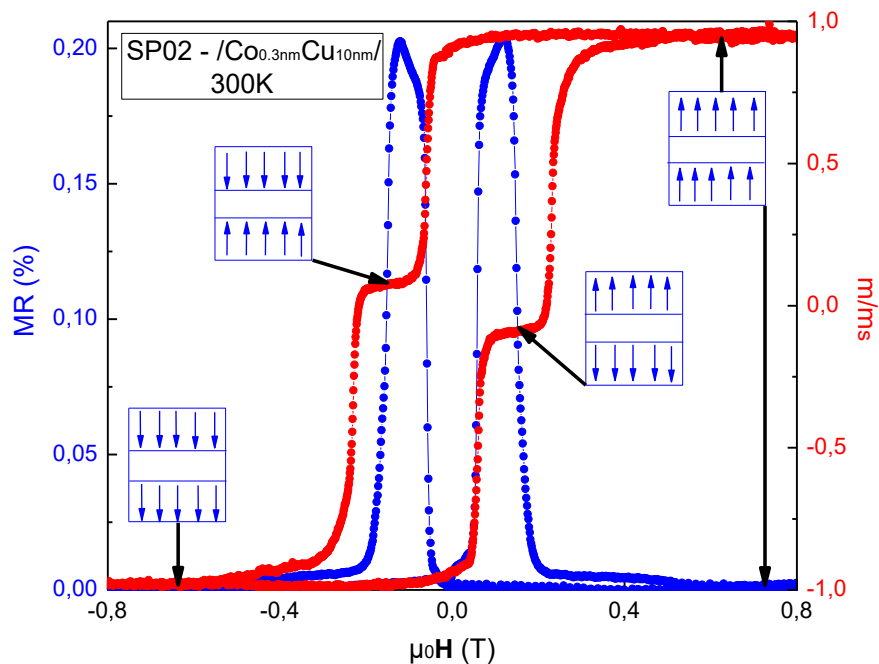


Figura 4.16: Magnetorresistencia y magnetización de la muestra SP02 en función del campo externo aplicado.

En el gráfico anterior se observa que los máximos de MR coinciden con la transición tipo escalón de la medida de magnetización, por lo que se puede concluir que hay consistencia entre el comportamiento magnético y de magnetotransporte eléctrico, ya que los máximos de MR se logran cuando los momentos magnéticos netos de la capa blanda y dura son opuestos entre sí, como está esquematizado en la figura 4.16, y esto mismo ocurre con el escalón de la medida de magnetización, como se explicó en el análisis magnético. Además, como se esquematiza en la figura anterior, las dos configuraciones paralelas significan un estado de baja resistencia, y las dos configuraciones antiparalelas significan un estado de alta resistencia.

Conclusiones y perspectivas

En conclusión se logró fabricar pseudo válvulas de espín de Pd/Co con anisotropía magnética perpendicular, donde se utilizaron diferentes espaciadores de Cu, y Cu con Co en búsqueda de un mayor campo coercitivo en la capa dura. Este efecto se logra al depositar 0.3 nm de Co a continuación de 10 nm de Cu. Además se observó que las curvas de magnetización y Efecto Hall presentan una transición tipo escalón que separa los dos sistemas magnéticos presentes en éstas, y que coincide con los dos máximos que entrega la medida de magnetorresistencia, obteniéndose estados de resistencia alta y baja, donde el primero de estos corresponde cuando los momentos magnéticos de ambas capas ferromagnéticas de la PVE se encuentran en una orientación paralela, y el segundo corresponde cuando la orientación de estas es antiparalela.

Con esto se tiene un rango prácticamente continuo de estados de resistencia, que se escriben mediante la aplicación de un campo magnético externo, que va invirtiendo parcialmente la magnetización de la capa libre. Esta información se almacena en el estado de dominio remanente de la capa libre, y este estado se lee simplemente como la resistencia de la PVE. Por lo tanto, se propone que estas estructuras pueden ser usadas en aplicaciones tales como sensores magnéticos, debido a los estados de resistencia remanente (Fang et al., 2012), y dispositivos de grabación o memorias analógicas magnéticas con un número continuo de estados por celda de memoria, permitiendo así un almacenamiento de información mucho más alto (Thiyagarajah, 2009).

Con respecto a las perspectivas de este trabajo, se propone el uso de materiales aislantes en el separador de las pseudo válvulas de espín de manera de incrementar la resistividad Hall y magnetorresistencia, así como también mediante el depósito de las pseudo válvulas de espín sobre diferentes sustratos como por ejemplo antidots o domos. Además, a través del uso de litografía se podría diseñar estructuras de pseudo válvulas de espín a escala nanométrica para emular los dispositivos de grabación magnética.

Referencias bibliográficas

- Aharoni, A. (2000). *Introduction to the Theory of Ferromagnetism*. New York, United States. Editorial: Oxford University Press Inc.
- Berger, L., y Bergmann, G. (1980). *The Hall Effect and Its Applications*, editado por Chien, C. L., y Westgate, C. R. Nueva York, Estados Unidos, Plenum Press.
- Binasch, G. Grünberg, P., Saurenbach, F., y Zin, W. (1989). Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer Exchange. *Physical Review B*, 39(7), 4828-4830.
- Baibich, M., Broto, J., y Fert, A. (1988). Giant magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices. *Physical Review Letters*, 61(21) 2472-2475.
- Bloemen, P. J., Johnson, M. T., van der Vorst, M. T. H., Coehoorn, R., de Vries, J. J., Jungblut, R., van de Reinders, A., y de Jonge, W. J. M. (1994). Magnetic layer thickness dependence of the interlayer exchange coupling in (001) Co/Cu/Co. *Physical Review Letters*, 72, 764.
- Blundell, S. (2001). *Magnetism in condensed Matter*, Nueva York, Estados Unidos. Editorial: Oxford University Press Inc.
- Broeder, F. J. A., Hoving, W., y Bloemen, P. J. H. (1991). Magnetic anisotropy of multilayers. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 93, 562-570.
- Callister, W. D., (2009) *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Utah, Estados Unidos. Editorial: Wiley.
- Daughton, J. M. (2000) GMR and SDT sensor Applications. *IEEE Transactions on Magnetics*. 36(5), 2773- 2778.
- Diney, B., Speriosu, V. S., Gurney, B. A., Parkin, S. S. P., Wilhoit, D. R., Roche, K. P., Metin, S., Peterson, D. T., y Nadimi, S. (1991a). Spin-valve effect in soft ferromagnetic sandwiches. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 93(2), 101-104.

- Diney, B., Speriosu, V.S., Metin, S., Parkin, S. S. P., Gurney, B. A., Baumgart, P., y Wilhoit, D. R. (1991b). Magnetotransport properties of magnetically soft spin-valve structures (invited). *Journal of Applied Physics*, 69(8), 4774-4779.
- Engel, B. N., England, C. D. Van Leeuwen, R. A., Wiedmann, M. H., y Falco, C. M. (1991). Interface Magnetic Anisotropy in Epitaxial Superlattices. *Physical Review Letters*, 67(14), 1910-1913.
- Fang, Y. (2013). Magnetic Thin Films with Graded or Tilted Anisotropy for Spintronic Devices. *Doctoral thesis*. University of Gothenburg, Sweden.
- Fang, Y., Dumas, R. K., Anh Nguyen, T. N., Mohseni, S. M., Chung, S., Miller, C. W., y Åkerman J. (2012). A Nonvolatile Spintronic Memory Element with a Continuum of Resistance States. *Advanced Functional Materials*.
- Flandes, P. J. (1988). An alternating-gradient magnetometer (invited). *Journal of Applied Physics*, 63(8), 3940-3945.
- Frey N. A., y Sun S. (2010). Magnetic Nanoparticle for Information Storage Applications. En C. Altavilla y E. Ciliberto. (Ed.), *Inorganic Nanoparticles: Synthesis, Applications, and Perspectives* (pp. 33-62). Estados Unidos, editorial: CRC Press, Taylor Francis & Group.
- Gontarz, R., y Lucinski, T. (1991). On magnetic anisotropy in Sputtered Co-Pd alloy films. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 101, 253-255.
- Gopman, D.B., Bedau, D., Mangin, S., Fullerton, E. E., Katine, J. A., y Kent, A. D. (2014) Switching field distributions with spin transfer torques in perpendicularly magnetized spin-valve nanopillars. *Physical Review B*, 89(13);134427.
- Griffiths, D. J., (1999). *Introduction to Electrodynamics*. Nueva Jersey, Estados Unidos. Editorial: Gillian Keiff.
- Guo, Z. B., Mi, W. B., Aboljadayel, R. O., Zhang, B., Zhang, Q., Barba, P. G., Manchon, A., y Zhang, X. X. (2012). Effects of surface and interface scattering on anomalous Hall effect in Co/Pd multilayers. *Physical Review B*. 86, 104433.
- Hall, E. H. (1879). On a new Action of Magnet on Electric Currents. *American Journal of Mathematics*, 2(3), 287-292.

- Hall, E. H. (1881). XVIII. On the "Rotational Coefficient" in Nickel and Cobalt. *Philosophical Magazine*, 12(74), 157.
- Hartmann, U. (2000). *Magnetic Multilayers and Giant Magnetoresistance: Fundamentals and Industrial Applications*. Berlin; Nueva York. Editorial: Springer.
- Hewlett Packard. (1995). Magnetoresistance Overview.
- Hurd, C. M. (1972). *The Hall Effect in Metals and Alloys*. Nueva York, Estados Unidos, Plenum Press.
- Hsu, Y., Jeong, S., Laughlin, D. E., y Lambeth, D. N. (2003). The effects of Ag underlayer and Pt intermediate layers on the microstructure and magnetic properties of epitaxial FePt thin films. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 260, 282-294.
- Ikeda, S., Miura, K., Yamamoto, H., Mizunuma, K., Gan, H. D., Endo, M., Kanai, S., Hayakawa, J., Matsukura, F., y Ohno. H. (2010). A perpendicular-anisotropy CoFeB-MgO magnetic tunnel junction. *Nature Mater*, 9(9):721.
- Ilievski, F., Perkinson, C. J., y Ross, C. A. (2007). Magnetic reversal phenomena in pseudo-spin-valve films with perpendicular anisotropy. *Journal of Applied Physics*, 101, 09D116.
- Kim, S. K., y Shin, S. C. (2001). Alloy-like Co environment in Co/Pd multilayer films having perpendicular magnetic anisotropy. *Journal of Applied Physics*, 89(5), 3055-3057.
- Liu, X. M., Ho, P., Chen, J. S., y Adeyeye, A. O. (2012). Magnetization reversal and magnetoresistance behavior of perpendicularly magnetized $[\text{Co/Pd}]_4/\text{Au}/[\text{Co/Pd}]_2$ nanowires. *Journal of Applied Physics*. 112, 073902.
- Liu, S., Yu, G., Yang, M., Ju, H., Li, B., y Chen, X. (2014). Co/Pt multilayer-based pseudo spin valves with perpendicular magnetic anisotropy. *Rare Metals*.
- Moreno, J. S. (2013). Diseño, fabricación, caracterización y estudio de aplicabilidad de un sensor de corriente eléctrica basado en tecnología válvula de espín y un detector de temperatura basado en rutenio. *Universidad de Valencia, Tesis Doctoral*.
- Mott, N. F. (1936). The Electrical Conductivity of Transition Metals, Proceedings of the Royal Society of London. *Mathematical and Physical Sciences*, vol. 153, 699-717.

- Néel, L. (1954). L'approche a la saturation de la magnétostriction. *Journal Physique Radium*, 15(5), 376-378.
- Palma, J. L. (2012). Influencia de la geometría sobre las propiedades magnéticas en nanoestructuras con orden hexagonal: antidots y nanodomos. *Universidad de Santiago de Chile, Tesis Doctoral*.
- Parkin, S. P., Jiang, X., Kaiser, C., Panchula, A., Roche, K., y Samant, M. (2003). Magnetically engineered spintronic sensors and memory. *Proceedings of the IEEE*. 91(5), 661-680.
- Paterno, L. J. (2017). 1 – Nanomaterials: Solar Energy Conversion. *Nanoscience and its Applications*. 1-33.
- Peters, R. J. B., Bouwmeester, H., Gottardo, S., Amenta, V., Arena, M., Brandhoff, P., Marvin, H. J. P., Mech, A., Moniz, F. B., Quiros Pseudo, L., Rauscher, H., Schoonjans, R., Undas, A. K., Vettori, A. V., Weigel, S., y Aschberger, K. (2016). Nanomaterials for products and application in agriculture, feed and food. *Trends in Food Science & Technology*. 54(), 155-164.
- Petroff, F. "Premio Nobel de Física 2007: "Albert Fert" y "Peter Grünberg", Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, 2007.
- Sarkar, J, (2014). *Sputtering Materials for VLSI and Thin Film Devices*, Nueva York, Estados Unidos. Editorial: William Andrew.
- Spaldin N. (2003). *Magnetic Materials Fundamentals and Applications*, Nueva York, Estados Unidos. Editorial: Cambridge University Press.
- Thines, R. K., Mubarak, N. M., Nizamuddin, S., Sahu, J., Abdullah, E. C., y Ganesan, P. (2017). Application potential of carbon nanomaterials in water and wastewater treatment: A review. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 72, 116-133.
- Thiyagarajah, N., y Bae, S. (2008). Effects of engineered Cu spacer on the interlayer coupling and giant magnetoresistance behavior in Pd / [Pd/Co]₂ / Cu / [Co/Pd]₄ pseudo-spin-valves with perpendicular anisotropy. *Journal of Applied Physics*. 104, 113906.

- Thiyagarajah, N., Joo, H. W., y Bae, S. (2009) High magnetic and termal stability of nanopatterned [Co/Pd] based pseudo spin-valves with perpendicular anisotropic for 1Gb magnetic random Access memory applications. *Applied Physics Letters*, 95, 232513.
- Treutler, C. P. O. (2001). Magnetic sensors for automotive applications. *Sensors and Actuators, A Physical*. 91, 2-6.
- Van der Pauw, L. J. (1958a). Method of Measuring Specific Resistivity and Hall Effect of Discs of Arbitrary Shape. *Philips Research Report*, 13(1), 1-9.
- Van der Pauw, L. J. (1958b). *Philips Technical Review*, 20(8), 220-224.
- Wang, L., Xiong, Q., Xiao, F., y Duan, H. (2017). 2D nanomaterials based electrochemical biosensors for cancer diagnosis. *Biosensors and Bioelectronics*. 89(1), 136-151.
- Yang, P. Y., Zhu, X. Y., Chen, G., Zeng, F., y Pan, F. (2010). Hysteretic giant magnetoresistance curves induced by interlayer magnetostatic coupling in [Pd/Co]/Cu/Co/Cu/[Co/Pd] dual spin valves. *Journal of Applied Physics*, 107, 083902.
- Zhao, C.J., Ding, L., HuangFu, J. S., Zhang, J. Y., y Yu, G. H. (2013). Research progress in anisotropic magnetoresistance. *Rare Metals*, 32(3);213-224.