

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIA
Departamento de Física



**SINTESIS Y CARACTERIZACION DE VALVULAS DE ESPÍN CON
ANISOTROPIA FUERA DEL PLANO MODULADA POR LA MORFOLOGÍA
SUPERFICIAL**

JOSÉ MANUEL HERMOSILLA AVILA

Profesor Guía:

Simón Oyarzun Medina

Juan Luis Palma Solorza

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

Santiago – Chile

Año

2019

Resumen

En este trabajo se fabricaron Pseudo válvulas de espín de Pd/Co con anisotropía magnética perpendicular depositadas mediante pulverización catódica sobre un sustrato de arreglos de domos hexagonal, fabricados mediante el proceso de anodización de Aluminio. Se estudio el efecto de la variación del diámetro de los domos del sustrato. Estas muestras se caracterizaron magnetoeléctricamente a partir de mediciones de magnetización, magnetorresistencia y Efecto Hall.

Se observó que la geometría del domo induce un aumento en el campo coercitivo de las muestras en la curva de magnetización para un tamaño pequeño y que a medida que se aumenta el diámetro de los domos se va perdiendo la transición tipo escalón que separa los sistemas ferromagnéticos de las PVE. Se obtuvieron curvas de magnetorresistencia y efecto Hall a una temperatura de 300 K para estas muestras, mostrando que la geometría del domo produce un aumento de la región de campo y una mejor definición de la magnetorresistencia, obteniendo resultados consistentes entre la caracterización eléctrica y magnética. La obtención de máximos bien definidos de magnetorresistencia a 300 K, con una amplia región de campo, llegando a valores porcentuales de 0,18%, permite que las pseudo válvulas de espín depositadas sobre arreglos de domos, tengan un gran potencial para ser usadas en la fabricación de memorias magnéticas de acceso aleatorio (MRAM).

Palabras clave: Pseudo válvulas de espín, anisotropía magnética perpendicular, nanoestructuras, magnetorresistencia gigante, anodización de aluminio, espintrónica.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a Francisca Valdivia, porque te has convertido en un pilar fundamental de mi vida, por tu preocupación, paciencia y dedicación, por ser el complemento perfecto. Te amo y gracias por estar conmigo siempre.

A mi familia, a mi Padre Osvaldo, a mi madre Cecilia quienes me apoyaron y entregaron las herramientas para estudiar y seguir la carrera que yo quisiera. Por aguantarme en todo momento incondicionalmente, a pesar del estrés o las dificultades.

A mi abuelo José, quien desde que tengo memoria me inculcó las matemáticas y el amor por descubrir cosas nuevas. Porque sin sus enseñanzas no estaría donde me encuentro el día de hoy

Dedico además este trabajo a mis compañeros, amigos y toda persona con quien compartí en esta etapa de Universidad, ya que de cada uno de ellos rescaté un granito de arena. Gracias por todo

José Manuel

Agradecimientos

Agradezco al Dr. Simón Oyarzun por ser mi profesor guía, y darme las herramientas necesarias para el desarrollo de esta tesis.

Al Profesor Juan Luis Palma, por su apoyo y colaboración en la fabricación de las muestras de esta tesis.

Al Profesor Juliano Denardin y Juan Escrig por facilitarme los equipos para la síntesis y mediciones

Al Centro para el Desarrollo de la Nanociencia y Nanotecnología CEDENNA por disponer de sus instalaciones para el desarrollo de esta tesis.

Al Laboratorio de Nanosíntesis de la Universidad Central por prestar sus instalaciones para la fabricación de muestras.

A todos los profesores que estuvieron presentes en mi formación de Ingeniero Físico.

A todos mis colegas del Laboratorio de Magnetismo, por la ayuda recibida durante este proceso.

Tabla de Contenido

INTRODUCCIÓN.....	1
1 FUNDAMENTOS DEL MAGNETISMO.....	4
1.1 ENERGÍAS PARA UN SISTEMA MAGNÉTICO.....	6
1.1.1 <i>Energía de intercambio.....</i>	6
1.1.2 <i>Energía de Zeeman.....</i>	7
1.1.3 <i>Energía magnetoestática.....</i>	7
1.2 ANISOTROPÍA MAGNÉTICA.....	7
1.3 TRANSPORTE DEPENDIENTE DE ESPÍN.....	9
1.4 MAGNETORRESISTENCIA GIGANTE (MRG).....	10
1.5 PSEUDO VÁLVULAS DE ESPÍN (PVE).....	12
1.6 COEFICIENTES DE TRANSPORTE ELÉCTRICO.....	15
1.6.1 <i>Resistividad eléctrica.....</i>	15
1.6.2 <i>Efecto Hall.....</i>	15
2 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.....	17
2.1 HIPÓTESIS DE TRABAJO.....	17
2.2 OBJETIVOS.....	17
2.2.1 <i>Objetivos generales.....</i>	17
2.2.2 <i>Objetivos específicos.....</i>	17
3 MÉTODO EXPERIMENTAL.....	18
3.1 MÉTODO EXPERIMENTAL.....	18
3.2 FABRICACIÓN DE DOMOS DE ALÚMINA POR ANODIZACIÓN.....	18
3.2.1 <i>Limpieza y pulido de la superficie.....</i>	19
3.2.2 <i>Anodización del Aluminio.....</i>	20
3.3 SÍNTESIS DE SISTEMAS DE PSEUDO VÁLVULAS DE ESPÍN (PVE).....	25
3.4 CARACTERIZACIÓN MAGNÉTICA.....	28
3.5 CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA.....	29
4 RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	30
4.1 SUSTRATOS DE DOMOS DE ALÚMINA.....	30
4.2 FABRICACIÓN DE LAS PVE.....	33
4.2.1 <i>Validación del método de trabajo.....</i>	33
4.2.2 <i>Optimización de PVE.....</i>	34
4.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS PVE SOBRE DOMOS DE ALÚMINA.....	37
4.3.1 <i>Caracterización magnética.....</i>	37
4.3.2 <i>Resultados transporte para las PVE depositadas sobre domos.....</i>	43
4.3.3 <i>Efecto Hall.....</i>	47
5 CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS.....	50
BIBLIOGRAFÍA.....	52

Índice de Tablas

Tabla 3.1: Electrolitos y sus parámetros de trabajo utilizados para casa caso.	22
Tabla 3.2: Voltajes utilizados para la creación de sustratos domos de alúmina	23
Tabla 3.3: Nomenclatura de muestras fabricadas.	28
Tabla 4.1: Diámetro promedio de domos obtenidos.	31

Índice de figuras

Figura 1.1: a) comportamiento esquemático de la Magnetización M en función del campo H aplicado, de un material ferromagnético inicialmente desmagnetizado, a) se observa el comportamiento de los dominios magnéticos para algunos puntos de la curva virgen b) curva $M \times H$ de un material ferromagnético (Spaldin,2010).	5
Figura 1.2: curva $M \times H$ para un material ferromagnético duro (curva roja) y para uno duro (curva azul). (Callister,2009).	6
Figura 1.3: Esquema del comportamiento de la magnetización para un material ferromagnético magnetizado con un campo a lo largo del eje fácil y difícil. (Spaldin, 2003)	8
Figura 1.4: grafico espesor por K_{eff} (t^*K_{eff}) en función del espesor del cobalto para sistemas multicapas Pd/Co (Fang,2013).	9
Figura 1.5: Esquema de bandas para un material ferromagnético (Araneda, 2016) ...	10
Figura 1.6: Magnetorresistencia en sistemas multicapas de Fe/Cr. (a) Magnetorresistencia a temperatura ambiente para una estructura de 5 multicapas, 3 capas de Fe separadas por Cr (Binash,1989). (b) Datos para 3 diferentes sistemas de multicapas, a 4.2K. Para ambos casos la corriente y el campo se aplicaron en el plano de las capas.	11
Figura 1.7: Representación de la MRG, (a) Resistencia alta, debido a la orientación antiparalela a campo magnético nulo. (b) Resistencia baja debido a la orientación paralela en presencia del campo magnético. (Spaldin,2003).....	11
Figura 1.8: esquema de la estructura para una válvula de espín (izquierda) y una pseudo válvula de espín (derecha).....	12
Figura 1.9:representación de la dispersión de los canales de espín, para los distintos casos posibles en la PVE. (Moreno,2013)	13
Figura 1.10: gráfico $M \times H$ para una PVE compuesta por dos sistemas de 10 bicapas Pd(1.5 nm)/Co(0.3 nm), separadas por un espaciador de cobre de 10 nm, con el campo aplicado perpendicular a la muestra. Se tiene la curva de magnetización (azul) y su curva de magnetorresistencia(magenta), pudiendo observar que los máximos de MR se obtienen para las zonas de transición tipo escalón, es decir cuando los momentos magnéticos de la muestra se alinean antiparalelos, y las zonas de saturación donde todos los momentos magnéticos se encuentran alineados con el campo.	14
Figura 1.11: esquema de un material sometido a la acción de una corriente. (Araneda,2016).....	15
Figura 1.12: esquema del efecto Hall para un material conductor. (Araneda, 2016)..	16
Figura 3.1: esquema para el montaje experimental para el proceso de electropulido, a la izquierda se observa el montaje experimental, a la derecha se observa un esquema de cómo actúan las líneas de campo sobre las impurezas.....	19
Figura 3.2: aluminios utilizados para el proceso de electropulido, (a) aluminio antes de electropulir; (b) aluminio electropulido; (c) aluminio dañado durante el proceso de electropulido.(a) y (b) Vega, 2019)	20
Figura 3.3: Esquema de la geometría obtenida en el proceso de anodización del aluminio, se observa que el ancho del poro de la alúmina es de tamaño D y que la forma de su capa barrera es cuasi esférica con diámetro D	21
Figura 3.4: montaje experimental utilizado para el proceso de anodización del Aluminio, a partir de este fue posible obtener 4 sustratos por cada anodización.	22

Figura 3.5: grafico representativas del proceso de anodización, se observa anodización a voltajes bajos (20 V, ácido sulfúrico.....	23
Figura 3.6: (a) Esquema del proceso de anodización del aluminio, se construyen los poros de forma desordenada (blancos), generando una matriz en la interfaz Al_2O_3-AL de valles en el aluminio y de “montes” o domos en la alúmina, con un alto grado de ordenamiento. (b) resultado del proceso de anodización, se observa el sector circular central con un diámetro de 10 mm compuesto de $Al_2O_3 - AL$	24
Figura 3.7: Sustratos de alúmina después del proceso de anodización, (a) sustrato obtenido para domos de 50 nm o aquellos que el espesor no fuera manejable, por lo que se procedió a utilizar pintura de uña para aumentar su espesor; (b) sustrato de domos de alúmina de color blanco, obtenido para una anodización 120 V;(c) imagen SEM obtenida para domos de alúmina para un proceso de anodización a 120 V, con un diámetro promedio de 300 nm; (d) esquema del sustrato de alúmina obtenido para cada una de los sustratos sintetizados.....	24
Figura 3.8: Esquema procedimiento de pulverización catódica para la obtención de una bicapa sobre un sustrato. Estos dos blancos se utilizan de manera alternada mediante la utilización de una tapa, solo se utiliza una a la vez.....	26
Figura 3.9: esquema representativo para una PVE, en particular este se encuentra compuesto por $Pd1.5nmCo0.3nm \times 10Co0.3nmCu10nmPd1.5nmCo0.3nm \times 15$ con una capa Paladio $1.5 nm$	27
Figura 3.10: representación del formato tipo cruz utilizado para la medición de coeficientes de transporte eléctrico.	27
Figura 3.11: esquema magnetómetro de gradiente alterno (AGM).....	29
Figura 3.12: Montaje utilizado para las mediciones de transporte (a) configuración para medir magnetorresistencia, (b)configuración utilizada para medir efecto Hall.....	29
Figura 4.1: Imagen SEM donde se observa a la derecha sustrato para domos de 75 nm (sulfúrico), se ven zonas donde hay domos y otras donde estos se abrieron; a la derecha se observa el sustrato para la muestra de 450(fosfórico) nm, donde se observan algunos de los arreglos hexagonales de domos de alúmina obtenidos.....	30
Figura 4.2: Imagen SEM sustrato de domos de alúmina obtenido por anodización con ácido oxálico a 120 V.....	30
Figura 4.3: Imágenes SEM para los distintos sustratos de domos de alúmina obtenidos donde: a) anodización 20 V, b) 40 V, c) 80V., se acompaña cada imagen con su respectivo histograma donde D representa el promedio de la distribución de domos encontrados, y σ el valor de la dispersión de los datos con respecto a la media.	32
Figura 4.4: Grafico $M \times H$ para las muestras de 10 bicapas Pd/Cox10 SP07 antigua(rojo), JH02 nueva (gris) medidas fuera del plano de la muestra.....	33
Figura 4.5: Grafica $M \times H$ para las muestras de (Pd/Co) x10/Cu/(Pd/Co) x10 SP02(rojo), JH05 (azul) medidas fuera del plano.....	34
Figura 4.6: Grafico comparativo de las muestras JH02,JH05 , JH06 y JH08, medidas con el campo aplicado perpendicular a la muestra	35
Figura 4.7: magnetorresistencia de las muestras utilizadas para la optimización de la PVE a temperatura ambiente.....	36
Figura 4.8: Grafico $M \times H$ para las PVE depositadas sobre arreglos de domos de 50 nm medidas en la configuración perpendicular al plano, comparadas con la PVE plana, para la configuración $PdCox10 Cu PdCox10$ (a) y la configuración $PdCox10 Cu PdCox15$ (b).....	37

Figura 4.9: comparación de las curvas MxH para las dos configuraciones de PVE depositadas en domos de 50 nm.....	38
Figura 4.10: curva MxH para las PVE depositadas sobre arreglos de domos de 100 nm medidas en la configuración fuera del plano, comparadas con la PVE plana, para la configuración <i>PdCox10 Cu PdCox10</i> (a) y la configuración <i>PdCox10 Cu PdCox15</i> (b)	39
Figura 4.11: comparación de las curvas MxH para las dos configuraciones de PVE depositadas en domos de 100 nm.....	39
Figura 4.12: curva MxH para las PVE depositadas sobre arreglos de domos de 50 nm medidas en la configuración fuera del plano, comparadas con la PVE plana, para la configuración <i>PdCox10/Cu/PdCox10</i> (a) y la configuración <i>PdCox10/Cu/PdCox15</i> (b).....	40
Figura 4.13 : Comparación de las curvas MxH para las dos configuraciones de PVE depositadas en domos de 200 nm.....	40
Figura 4.14: Grafica MxH para las PVE depositadas sobre domos de diámetro promedio 50, 100 y 200 nm, medidos para un campo aplicado fuera del plano.....	41
Figura 4.15: Grafico MxH para las PVE depositadas sobre domos de diámetro promedio 50, 100 y 200 nm, medidos para un campo aplicado en el plano.	42
Figura 4.16: Resultados experimentales obtenidos por Sebastián Michea para una curva MxH de las multicapas de Co/Pd para multicapas en distintos sustratos medidas con un campo externo aplicado: a) fuera del plano, b) en el plano.	42
Figura 4.17: magnetorresistencia para las PVE depositadas sobre: film (azul), domos de 50 nm (Rojo), domos de 100 nm (verde) y domos de 200 nm (amarillo), a temperatura ambiente (300K).....	43
Figura 4.18:magnetorresistencia para la PVE <i>PdCox10CuPdCox10</i> depositada sobre domos de distintos tamaños, medida con el campo fuera del plano de la muestra a 300K	44
Figura 4.19: magnetorresistencia para la PVE <i>PdCox10CuPdCox15</i> depositada sobre domos de distintos tamaños de diámetro, medida con el campo fuera del plano de la muestra a temperatura ambiente 300 K.....	45
Figura 4.20: representación magnetorresistencia obtenida versus diámetro de domos, para ambas PVE.	46
Figura 4.21: Grafico de efecto Hall para la PVE <i>PdCox10CuPdCox10</i> para el campo aplicado perpendicular al plano	47
Figura 4.22: efecto Hall para la PVE <i>PdCox10CuPdCox15</i> para el campo aplicado perpendicular al plano.	48

Introducción

Debido a los diferentes avances tecnológicos en las últimas décadas, los nanomateriales han adquirido una gran importancia debido a su gran contribución en las tecnologías actuales. Se definen los nanomateriales como aquellos materiales cuyas dimensiones sean menores a 100 nm (J Ramsden, 2009). Estos materiales exhiben propiedades físicas o químicas únicas que pueden ser desarrolladas en potenciales aplicaciones para diseñar nuevos sistemas u optimizar otros ya conocidos (discos duros, CPU, etc.). El almacenamiento de información se basa en las diferentes configuraciones de estructuras magnéticas de escala nanométrica, lo que hace fundamental el estudio de las propiedades magnéticas a esta escala. Los dispositivos de almacenamiento magnético nacieron en el año 1956 con el IBM RAMAC 350, con una capacidad de almacenamiento $\sim 5 Mb$, compuesto con 50 discos de 25 pulgadas de diámetro por 24 pulgadas de ancho, pesando alrededor de 250 kg. En el año 1999 se lanza el IBM Micro drive con una capacidad de $\sim 340 Mb$ en un disco de diámetro de 1 in. Actualmente los dispositivos de almacenamiento alcanzan los $\sim 70 Gb/in^2$. El avance en la miniaturización de los dispositivos de almacenamiento masivo se logró en primer lugar en el desarrollo de técnicas de síntesis de materiales a escala nanométrica y en segundo lugar en la implementación de la Magnetoresistencia Gigante (MRG) en los cabezales de lectura-escritura del IBM Microdrive (1999), este efecto fue descubierto en 1988 (Peter Grunberg, Fert, 1988) para multicapas metálicas, recibiendo el premio Nobel en el año 2007. Este descubrimiento permite utilizar además de la carga, el espín del electrón para diversas aplicaciones. Esto condujo a la creación de una nueva área de investigación llamada espintrónica la cual estudia el transporte eléctrico dependiente del espín para su implementación en dispositivos electrónicos.

Dentro de estas aplicaciones se encuentran las pseudo válvulas de espín (PVE), sistema compuesto de dos capas ferromagnéticas, con distintos campos coercitivos, separadas por un material no magnético, el cual desacopla la interacción de intercambio entre las dos capas. Como cada capa ferromagnética posee distinta coercitividad, se logra observar dos estados de magnetización bien definidos, por lo que revierten de forma individual a distintos campos magnéticos, esto conlleva a la existencia de dos estados con diferentes resistencias eléctricas en función del campo aplicado. Actualmente existen dispositivos de memorias magnéticas de acceso aleatorio STT-MRAM, donde la magnetización es manipulada por una corriente eléctrica. Los sistemas PVE son los

principales candidatos para ser implementados en tecnología no volátil tipo MRAMs, por su bajo consumo energético, rapidez y alta resistencia al proceso escritura/lectura (W. Kang et al, 2014). Este tipo de dispositivos donde la orientación de la magnetización está paralela poseen dimensiones laterales de alrededor de $\sim 90 \text{ nm}$. Sin embargo, si se utilizan dispositivos STT-MRAM donde la magnetización se orienta de manera perpendicular es posible reducir sus tamaños por debajo de 40 nm . Además, al modificar la arquitectura se logra un menor consumo energético en el proceso escritura/lectura, debido a que es necesaria una menor densidad de corriente para inducir el proceso de reversión de la magnetización. (Zhang, 2014). Las válvulas de espín son utilizadas para diseñar memorias magnéticas de acceso aleatorio (MRAMs), ya que este sistema es estable ante fluctuaciones térmicas. Dependiendo de la síntesis de los materiales que constituyen las capas ferromagnéticas de las pseudo válvulas de espín (PVE) se puede obtener una anisotropía magnética perpendicular (AMP).

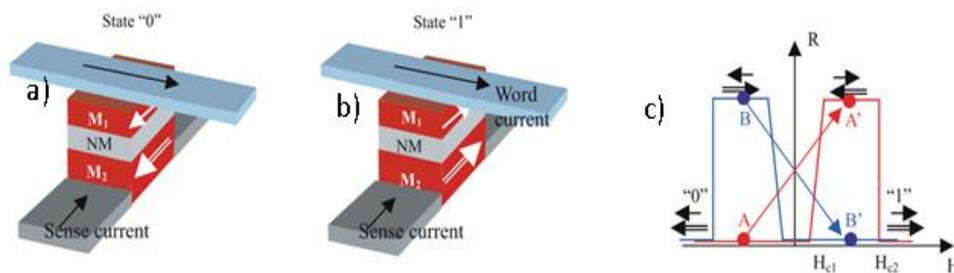


Figura 1: Esquema de MRAM construida en base a una VE con AMP, (a) bit 0, (b) bit 1 y (c) grafico representativo para la magnetorresistencia en de una PVE MRAM. (Bretislav, 2005)

En la figura 1 se despliega una representación de una PVE MRAM, en esta se diseñan patrones de PVE en franjas submicrométricas, por lo que la magnetización se puede encontrar en 4 estados posibles: dos paralelos (A y B') y dos antiparalelos (B y A'). Las PVE MRAM utilizan solo los dos estados de la capa dura para almacenar información (S. Tehranie et al, 1999), estos son los estados de remanencia o donde todos los momentos magnéticos se encuentran alineados (Figura1. a) y b)). Es por ello que, controlar la anisotropía magnética, por ejemplo, modificando la morfología del sustrato, podría impactar directamente en el proceso de escritura/lectura, ya que el comportamiento de la magnetización estará determinado por la geometría de este, determinando la magnitud de corriente necesaria para inducir el proceso de reversión magnética.

El objetivo de este trabajo de tesis es la fabricación y caracterización de sistemas de pseudo válvulas de espín con anisotropía magnética perpendicular, depositados mediante pulverización catódica sobre un arreglo hexagonal de domos de alúmina

obtenidos a partir de un proceso de anodización, cuyo diámetro promedio va desde 50 nm hasta 200 nm.

En el primer capítulo se describirán los fundamentos físicos a trabajar para un estudio de las películas con anisotropía magnética perpendicular y las pseudo válvulas de espín, detallando las contribuciones de anisotropía que existen en estos sistemas y como se logra obtener que la magnetización se oriente de forma perpendicular al plano de la película. En el segundo capítulo se describirán los objetivos generales y específicos del trabajo de tesis. En el tercer capítulo se detallará el procedimiento experimental llevado a cabo, utilizando el procedimiento de pulverización catódica para la síntesis de ella. realizando un estudio en primera instancia de la PVE en un sustrato de vidrio. Luego por el proceso de anodización de aluminio, se procedió a la fabricación de sustratos de alúmina porosa, con domos que van desde los 50 nm a 200 nm, caracterizados mediante microscopia electrónica de barrido (SEM). Una vez obtenidos los sustratos se depositó mediante pulverización catódica las PVE estudiando como influye el cambio en la morfología de la superficie en las propiedades magnetoeléctricas y determinar a partir de estos resultados sus posibles aplicaciones.

1 Fundamentos del magnetismo

Hace un poco más de un siglo con el desarrollo de la mecánica cuántica se logró describir el comportamiento magnético de los materiales a partir del momento magnético del electrón. Este posee dos contribuciones: un momento angular orbital, que se genera a partir del movimiento alrededor del núcleo, y la otra proveniente del momento angular intrínseco, llamado espín. A partir de esto se puede considerar cada electrón como un pequeño imán, cuyo momento magnético puede apuntar en dos sentidos posibles, arriba o abajo.

La interacción entre momentos magnéticos con un campo magnético externo determina las propiedades magnéticas de los materiales a nivel microscópico y macroscópico. Entre los tipos de materiales se encuentran: los diamagnéticos, paramagnéticos y ferromagnéticos. El diamagnetismo es una forma muy débil de magnetismo que no es permanente y persiste sólo mientras el campo externo está presente. La magnitud del momento magnético inducido es extremadamente pequeña y en una dirección opuesta a la del campo aplicado. En los materiales paramagnéticos en ausencia de un campo magnético externo las orientaciones de los momentos son aleatorias, por lo que no poseen una magnetización neta permanente. En presencia de un campo magnético externo, estos momentos se alinean de forma individual, sin que exista interacción entre ellos. Por lo general los materiales diamagnéticos y paramagnéticos son considerados materiales no magnéticos debido a que solo presentan magnetización en presencia de un campo externo. (Callister,2009)

Los materiales ferromagnéticos, como el Hierro, Cobalto o Níquel, poseen un momento magnético permanente en ausencia de un campo externo aplicado, esto debido al espín de los electrones no cancelados como consecuencia de la estructura electrónica. En ausencia de un campo externo, existen regiones denominadas dominios magnéticos, que actúan como un pequeño imán permanente, y se forman debido al balance de las diferentes contribuciones energéticas, al minimizar su energía.

Para la caracterización de los materiales ferromagnéticos se realiza un estudio del comportamiento de la magnetización en presencia de un campo magnético \vec{H} mediante una curva de histéresis (ver figura 1.1). A medida que aumenta el campo \vec{H} los dominios magnéticos empiezan a ser modificados con desplazamientos de las paredes de dominio, acomodándose y alineándose ya que aquello es energéticamente más favorable, dando origen finalmente a un solo dominio, donde los momentos magnéticos se orientan paralelos al campo aplicado. Se representa este proceso de transformación de los dominios en la figura 1.1 de forma esquemática. La saturación de la curva se alcanza cuando todos los momentos magnéticos se orientan paralelamente con \vec{H} , que se representa en la figura 1.1 por el punto M_s . A medida que el campo disminuye, se observa que la curva no regresa por el mismo camino si no que se produce el efecto de histéresis en el cual la magnetización esta retrasada con respecto al campo \vec{H} . Se observa en la figura que existe un punto de la magnetización cuando el campo llega a cero denominado magnetización remanente (M_r), lo que nos dice que sigue magnetizado en ausencia de \vec{H} . Esto debido a que los dominios magnéticos del material no pueden regresar a su orientación original a la velocidad que varía el campo magnético.

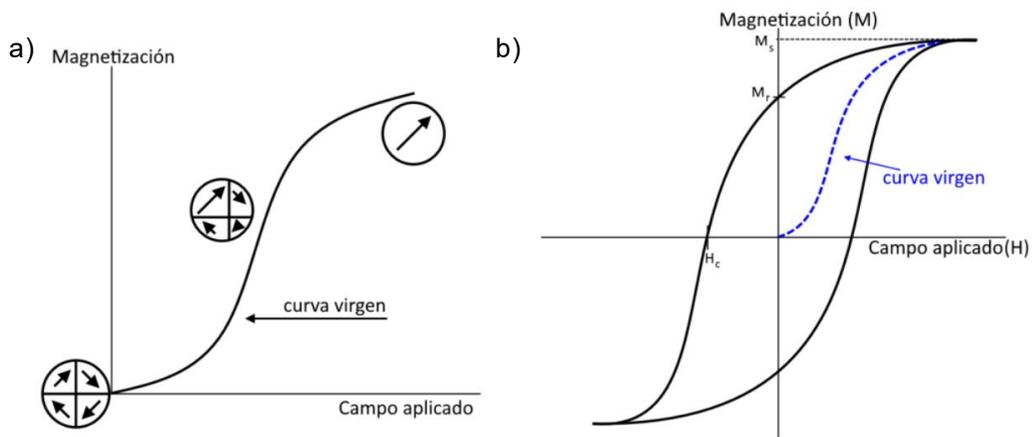


Figura 1.1: a) comportamiento esquemático de la Magnetización \vec{M} en función del campo \vec{H} aplicado, de un material ferromagnético inicialmente desmagnetizado, a) se observa el comportamiento de los dominios magnéticos para algunos puntos de la curva virgen b) curva $\mathbf{M} \times \mathbf{H}$ de un material ferromagnético (Spaldin,2010).

Para lograr desmagnetizar el material es necesario aplicar un campo \vec{H} en la dirección opuesta a la que inicialmente se había aplicado para saturarlo. A esta cantidad de campo externo se le denomina campo coercitivo H_c (ver figura 1.1 b)). Aumentando la magnitud del campo aplicado en este sentido se logra la reversión de la magnetización $-M_s$. Al invertir el campo \vec{H} hasta el punto de saturación inicial M_s , provocará una remanencia negativa $-M_r$ y un campo coercitivo positivo.

A partir de la curva de $\mathbf{M} \times \mathbf{H}$ se pueden clasificar los materiales ferromagnéticos como: *blandos*, lo cuales poseen un bajo campo coercitivo y alcanzan una magnetización de saturación a un campo relativamente pequeño, pudiendo ser magnetizados y desmagnetizados de forma fácil. Los materiales *duros* son aquellos con un alta coercitividad y , alta remanencia, por lo que se requiere de un campo externo más grande para desmagnetizarlo (Callister,2009), ambos casos se observan en la figura 1.2. Definir el parámetro de campo coercitivo H_c es importante ya que dependiendo de si son materiales blandos o duros, será la potencial aplicación a la que se destinará. Por lo tanto, se hace necesario controlar este parámetro en los materiales ferromagnéticos (Adeyeye, Bland et al, 1998) utilizando para ello distintas técnicas, ya sea tratamiento térmico, inserción de impurezas al material o creando anisotropías introduciendo estructuras periódicas de tamaño controlable, por ejemplo, arreglos de domos pueden inducir un aumento en el campo coercitivo de multicapas de Co/Pt (L. Piraux et al, 2012, Michea 2017).

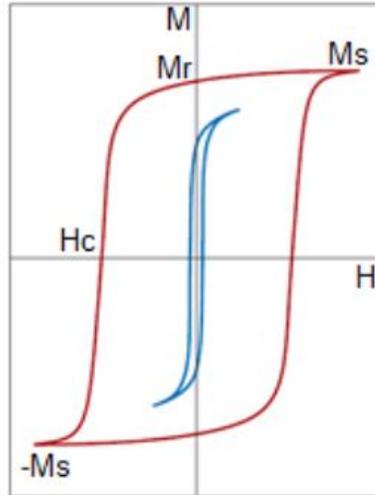


Figura 1.2: curva $M \times H$ para un material ferromagnético duro (curva roja) y para uno duro (curva azul). (Callister,2009).

1.1 Energías para un sistema magnético.

Las principales contribuciones de energéticas para un sistema ferromagnético vienen dadas por:

$$E = E_{ex} + E_Z + E_{ani} + E_{dip} \quad (1.1)$$

Donde E_{ex} es la energía de intercambio; E_Z energía de Zeeman; E_{ani} es la energía de anisotropía magnética; E_{dip} energía magnetoestática.

1.1.1 Energía de intercambio

La energía de intercambio E_{ex} , proviene del acoplamiento de los momentos atómicos magnéticos y su origen es el resultado de la repulsión de Coulomb de dos electrones cercanos en conjunto con el principio de exclusión de Pauli, el cual prohíbe que dos electrones se encuentren en el mismo estado cuántico. Esta interacción es la responsable de la alineación espontánea de los momentos magnéticos, que corresponde a una alineación paralela (o antiparalela) de estos. Se puede describir la interacción de intercambio de dos espines contiguos (S_i, S_j) con el siguiente Hamiltoniano:

$$H = -2JS_i \cdot S_j \quad (1.2)$$

Donde J corresponde a la constante de intercambio. Esta constante mide la intensidad de la interacción.

1.1.2 Energía de Zeeman

Si un material ferromagnético se encuentra bajo un campo magnético aplicado, sus momentos magnéticos se alinearán con el campo minimizando así la energía del sistema. La energía de Zeeman esta dada por:

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

1.1.3 Energía magnetoestática

La energía dipolar o magnetoestática E_{dip} , descrita 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 la magnetización.

1.2 Anisotropía magnética

La anisotropía magnética se origina por el acoplamiento entre el espín del electrón y su momento angular orbital, induciendo que los espines tiendan a alinearse en ciertas orientaciones privilegiadas. La anisotropía magnética tiene diferentes contribuciones, por ejemplo, la anisotropía magnetocristalina, la cual depende de la dirección del campo aplicado con respecto a los ejes del cristal. Se denominara eje *fácil* de magnetización, a la dirección energéticamente favorable, donde se requiera menor campo para lograr saturar el material. Se observa en la figura 1.3 una representación para un eje *fácil* de magnetización y un eje *difícil*, donde se requerirá de la aplicación de un campo mayor para lograr magnetizar completamente la muestra.

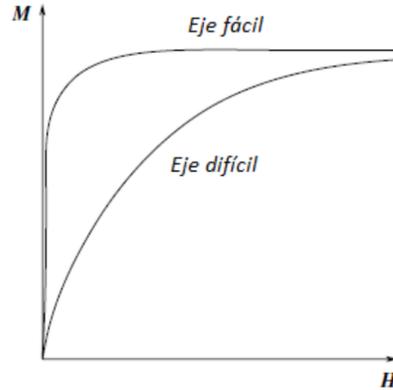


Figura 1.3: Esquema del comportamiento de la magnetización para un material ferromagnético magnetizado con un campo a lo largo del eje fácil y difícil. (Spaldin, 2003)

La anisotropía magnética también puede estar determinada a partir de la forma del material magnético, esta anisotropía se da en materiales policristalinos que no poseen un eje cristalográfico preferencial. La muestra será más fácil de magnetizar por ejemplo a través de su eje más largo (Spaldin,2011). Esta anisotropía se origina a partir de las interacciones dipolares, las que son de largo alcance y dependen de la forma de la muestra, y está relacionada con la energía magnetoestática.

En las películas delgadas y multicapas, el comportamiento de la orientación preferencial de los momentos magnéticos puede ser muy diferente, por lo que el estudio de la anisotropía magnética es fundamental para el desarrollo de esta tesis. En sistemas de multicapas cuya composición es Co/Pd o Co/Pt la magnetización se puede orientar fuera del plano de la película, debido a la interfaz entre estos dos elementos ,logrando así, bajo ciertas condiciones una anisotropía magnética perpendicular (AMP).

La constante de anisotropía efectiva K_{eff} , es descrita por una contribución volumétrica K_v , y a una contribución superficial K_s , la cual depende del espesor y de la anisotropía magnetocristalina (Fang,2013), y se relacionan como:

$$K_{eff} = K_v + \frac{2K_s}{t} \quad (1.5)$$

donde t es el espesor de una capa magnética individual, además K_v y K_s con unidades de $\left[\frac{J}{m^3}\right]$ y $\left[\frac{J}{m^2}\right]$. En la figura 1.4 se observa el comportamiento de K_{eff} en función del espesor de Cobalto para sistemas multicapas de Pd/Co. Sistemas análogos a los de estudio, donde se observa que para espesores de Co menores a 12\AA K_{eff} toma valores positivos, por lo que la contribución superficial K_s predomina y favorece que la magnetización se oriente fuera del plano. En el caso contrario, para espesores mayores a 12\AA , predomina la K_v , favoreciendo que la magnetización se oriente en el plano de la película.

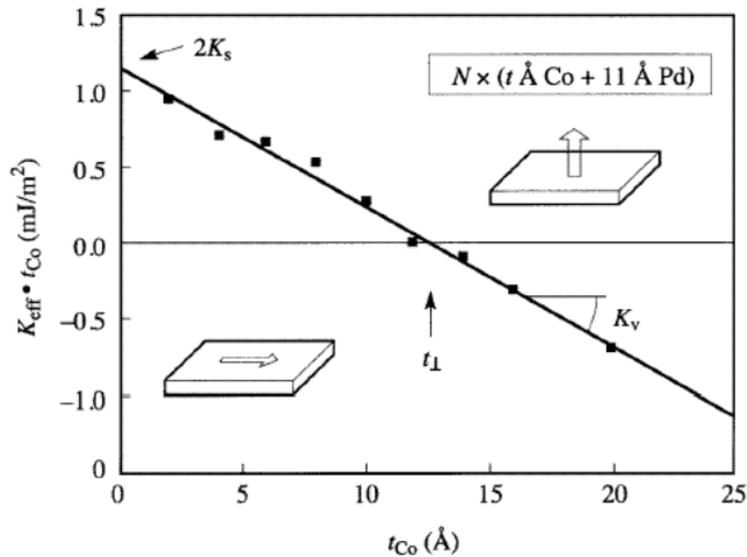


Figura 1.4: grafico espesor por K_{eff} ($t \cdot K_{eff}$) en función del espesor del cobalto para sistemas multicapas Pd/Co (Fang,2013).

El origen de la AMP en las multicapas de Pd/Co se atribuye a la diferencia de los parámetros de red entre el Co y el Pd (Engel et al., 1991, Néel,1954). Para obtener AMP en multicapas de Pd/Co se debe comenzar depositando Co sobre Pd, para que de esta forma exista una tensión en el sistema (Guo et al.,2012). La tensión es generada por la diferencia existente entre los parámetros de red de ambos materiales, ya que el Pd tiene una estructura cúbica centrada en la cara (FCC) cuyos parámetros de red son $a=b=c=3,8908 \text{ \AA}$ y el Co una estructura cristalina hexagonal compacta (HCP) con constantes de red $a=b=2,5140 \text{ \AA}$ y $c=4,1050 \text{ \AA}$, y al crecer como una cubica centrada en las caras tiene constantes de red $a=b=c=3,5441 \text{ \AA}$.

1.3 Transporte dependiente de espín

Hasta antes del descubrimiento de la magnetorresistencia gigante (MRG) en 1988, en los dispositivos electrónicos se utilizaba solo la carga del electrón, luego de este descubrimiento nacieron los primeros dispositivos que comenzaron a utilizar el espín del electrón como grado de libertad adicional. Los primero dispositivos espintrónicos fueron los cabezales de lectura de las unidades de disco duro; otras aplicaciones industriales son: sensores de campo magnético, componentes de los dispositivos de grabación magnética, aislantes galvánicos, entre otros. (Spaldin, 2003)

La electrónica de espín estudia el transporte dependiente del espín del electrón y su posterior implementación en distintas aplicaciones, lo que genera nuevos fenómenos interesantes como torque por transferencia de espín, efecto Hall de espín, entre otros. Los metales de transición como: Fe, Co y Ni se diferencian de los metales nobles como Cu o Au, debido que poseen un mayor numero de espines en una dirección que en la otra al nivel de Fermi, a diferencia de los metales nobles que tienen igual número (Figura 1.5) . Esto que genera por ejemplo conductividades diferentes para cada canal de espín.

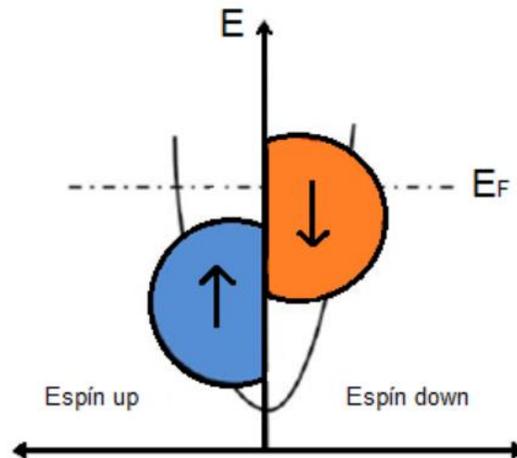


Figura 1.5: Esquema de bandas para un material ferromagnético (Araneda, 2016)

Debido a esta diferencia, los materiales ferromagnéticos actúan por ejemplo como polarizadores de espín, de tal forma que si una corriente pasa a través de dos capas ferromagnéticas desacopladas por un separador no magnético, los electrones al pasar a través de la primera capa se polarizan en la dirección de la magnetización de esta, manteniendo su polarización en el separador no magnético, para luego llegar a la segunda capa, donde la resistencia total del sistema dependerá de la dirección relativa de la magnetización entre la primera y la segunda capa. Si la orientación relativa entre los vectores de magnetización entre ambas capas es mayoritariamente paralela, entonces la resistencia del sistema será baja, ya que la mayoría de los electrones logrará pasar fácilmente a través de la segunda capa. En cambio, si la orientación relativa entre los vectores de magnetización es mayoritariamente antiparalela, la mayoría de los electrones al pasar por la segunda capa serán fuertemente dispersados, lo que producirá un valor de resistencia alto.

1.4 Magnetorresistencia Gigante (MRG).

La magnetorresistencia (MR) se describe como el cambio en la resistencia eléctrica porcentual en un sistema, cuando se aplica un campo magnético externo en alguna dirección. Es decir:

$$MR(\%) = 100 \left(\frac{R_H - R_0}{R_0} \right) \text{ ó } MR(\%) = 100 \left(\frac{\Delta R}{R_0} \right) \quad (1.6)$$

Donde R_H corresponde al valor de la resistencia eléctrica del material al aplicar el campo magnético y R_0 a la resistencia en ausencia de campo. Existen distintos tipos de magnetorresistencia: magnetorresistencia ordinaria (MRO), magnetorresistencia anisotrópica (MRA), magnetorresistencia colosal (MRC) y magnetorresistencia gigante (MRG). Esta última es en la que se basa el trabajo de tesis.

La magnetorresistencia fue observada por primera vez en multicapas de Fe/Cr acopladas antiferromagnéticamente, en el año 1988 por Peter Grünberg y Albert Fert (Binash, Broto & Fert, 1988, Binash, Grünberg, Saurenbach & Zin, 1989), por lo cual fueron galardonados por el premio Nobel de Física en 2007. En la figura 1.6 se despliegan los resultados obtenidos por ambos grupos.

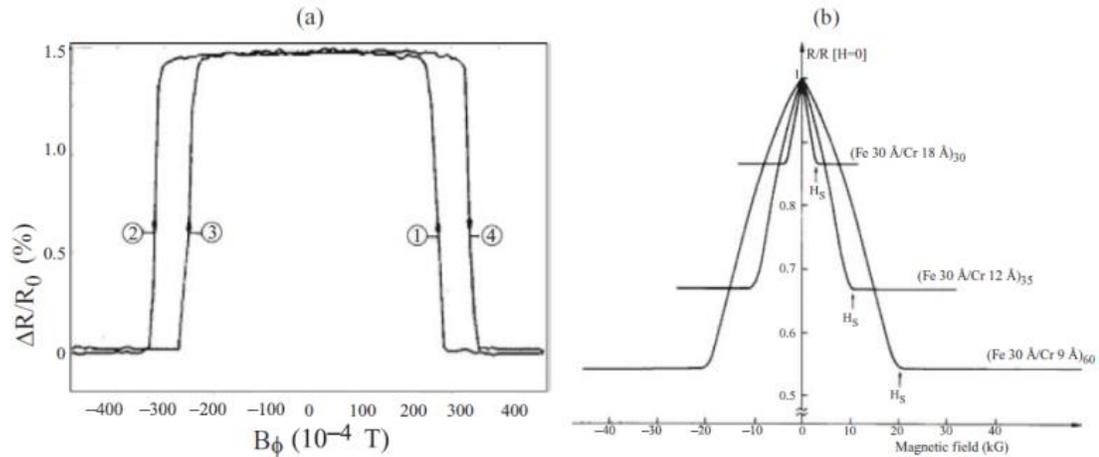


Figura 1.6: Magnetorresistencia en sistemas multicapas de Fe/Cr. (a) Magnetorresistencia a temperatura ambiente para una estructura de 5 multicapas, 3 capas de Fe separadas por Cr (Binash, 1989). (b) Datos para 3 diferentes sistemas de multicapas, a 4.2K. Para ambos casos la corriente y el campo se aplicaron en el plano de las capas.

En ausencia de campo magnético la orientación de la magnetización entre las multicapas de Fe/Cr es antiparalela y al aplicar un campo magnético externo la magnetización se orienta de forma paralela, lo que se observa en la figura 1.7.

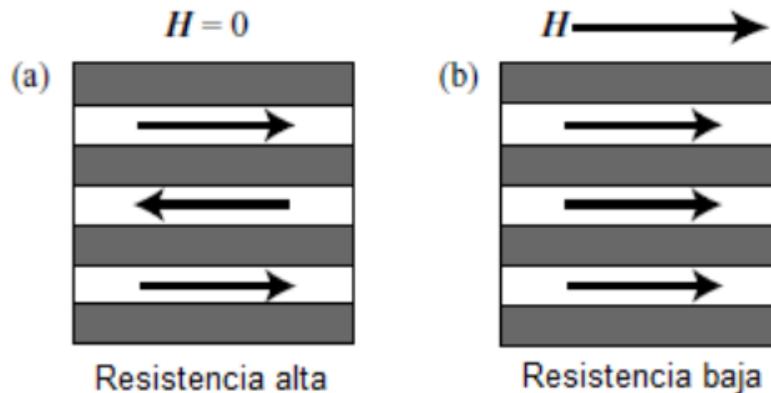


Figura 1.7: Representación de la MRG, (a) Resistencia alta, debido a la orientación antiparalela a campo magnético nulo. (b) Resistencia baja debido a la orientación paralela en presencia del campo magnético. (Spaldin, 2003)

El acoplamiento antiparalelo entre las capas magnéticas separadas por un espaciador no magnético en ausencia de campo magnético es producto de la interacción RKKY (Ruderman, Kittel, Kasuya y Yosida) o intercambio indirecto (Bloemen, 1994), la cual es una manifestación del principio de exclusión de Pauli, que es un acoplamiento oscilatorio inversamente proporcional a la distancia, por lo que, si se escoge un separador con un

espesor mayor a 2 o 3 nm, esta interacción es despreciable. En cambio, para valores de espesor inferior a 3 nm, se puede controlar el tipo de acoplamiento entre las capas magnéticas y lograr un acoplamiento antiparalelo con campo magnético externo nulo.

El cambio en la resistencia con la aplicación de un campo magnético externo es efecto de la dispersión de los electrones dependiendo de la orientación del espín al atravesar las multicapas. Este cambio en la resistencia depende de la orientación relativa de la magnetización con la capa a atravesar. Cuando el sistema se encuentra en un estado antiparalelo posee una alta resistencia debido a que los electrones con un espín up son fuertemente dispersados en regiones con una magnetización espín down (\downarrow) y viceversa. En cambio, si la alineación es paralela, los electrones con espín que estén orientados paralelos con la magnetización podrán moverse a través de las estructuras heterogéneas con muy poca dispersión, es decir la resistencia del material será menor.

1.5 Pseudo Válvulas de Espín (PVE)

El termino válvula de espín fue utilizado por primera vez por Diney (1991.a), el cual hace referencia a los sistemas formados por dos capas ferromagnéticas desacopladas por un separador no magnético, donde una de estas capas se encuentra fijada por una capa antiferromagnética (figura 1.8 a)). Son sistemas con estructuras MRG específicos y el origen de su nombre se debe a que microscópicamente el sistema multicapa actúa como una válvula que determina que electrones son más fáciles de transmitir, aquellos con espín \uparrow o \downarrow . Los materiales utilizados para la fabricación de las multicapas determinarán las propiedades de la PVE.

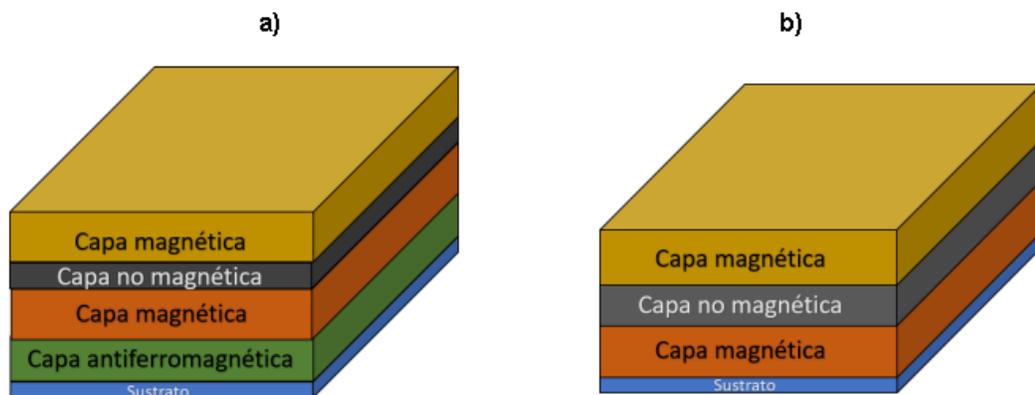


Figura 1.8: esquema de la estructura para una válvula de espín (izquierda) y una pseudo válvula de espín (derecha)

Las pseudo válvulas de espín (PVE) son sistemas de multicapas como las válvulas de espín, pero que no utilizan la capa antiferromagnética para anclar una de las capas (figura 1.8 b)). Mediante la implementación de dos materiales ferromagnéticos con coercitividads distintas, se obtienen los dos estados de magnetización, paralelo y antiparalelo. El que dos capas ferromagnéticas tengan distinta coercitividad puede ser producto de que las capas son de distintos materiales, diferentes espesores, formas distintas de la capa, o diferentes anisotropías. A la capa con coercitividad más grande se le llama *capa dura*, y a la que posee la coercitividad más pequeña *capa blanda* (Coey,2010). Las capas ferromagnéticas utilizadas pueden ser de material puro o

aleaciones como por ejemplo Ni/Fe, Co/Fe entre otros materiales. Para la capa separadora se utilizan materiales conductores no ferromagnéticos como el Cu o Ru, entre otros. Para lograr la AMP en las PVE se utilizan multicapas ultradelgadas de Co/Pt o Co/Pd (debido a lo explicado en el punto 1.2 de anisotropía magnética. En el capítulo 3, se explicará el procedimiento experimental y la estructura para las pseudo válvulas de espín utilizadas en esta tesis.

Las pseudo válvulas de espín con AMP han tenido un gran interés desde el punto de vista tecnológico por sus aplicaciones como dispositivos de grabación magnética y como memorias de acceso aleatorio no volátil (MRAM), debido a su bajo consumo energético (X. Zhang, 2014). Mediante la presencia en estos sistemas con multicapas magnéticas con AMP desacopladas por un metal no magnético como es el Cu o Ta, se logra generar dos estados de magnetización antiparalelos durante la reversión de la magnetización. Con esto se puede controlar los campos de reversión magnética y obtener valores altos de magnetorresistencia. Como observamos en el punto 1.4, el efecto de la MRG se manifiesta en las PVE por la dependencia del espín en la conducción eléctrica en materiales ferromagnéticos, por lo que la dispersión sufrida en estas estructuras depende del espín y la alineación relativa con los vectores de magnetización entre las capas.

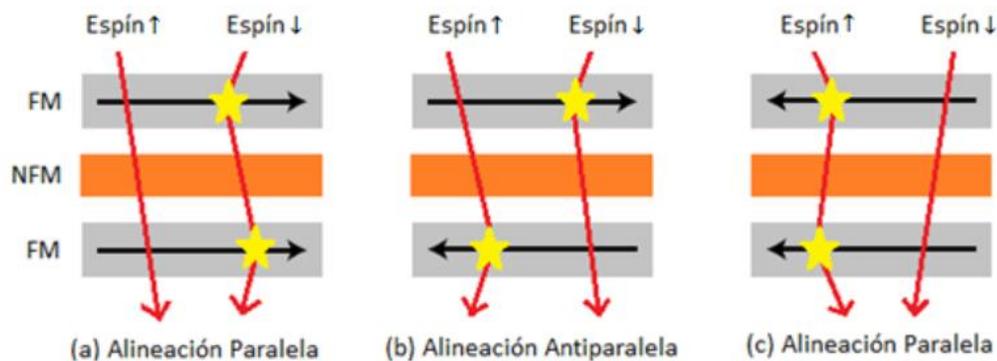


Figura 1.9:representación de la dispersión de los canales de espín, para los distintos casos posibles en la PVE. (Moreno,2013)

Cuando el campo magnético externo aplicado es igual a cero, el acoplamiento de las capas ferromagnéticas será antiparalelo, por lo que la orientación magnética no favorecerá a ninguno de los canales de espín (up ↑ o down ↓), ya que tanto el espín up ↑ como el espín down ↓ serán dispersados por una de las capas ferromagnéticas, generando una MRG alta. Luego bajo la influencia de un campo magnético distinto de cero, la configuración de los vectores de magnetización en las capas será paralela, como se muestran en las figuras 1.9 a y 1.9 c, lo que implica que la resistencia será más baja ya que uno de los canales de espín será paralelo a la magnetización de las capas ferromagnéticas.

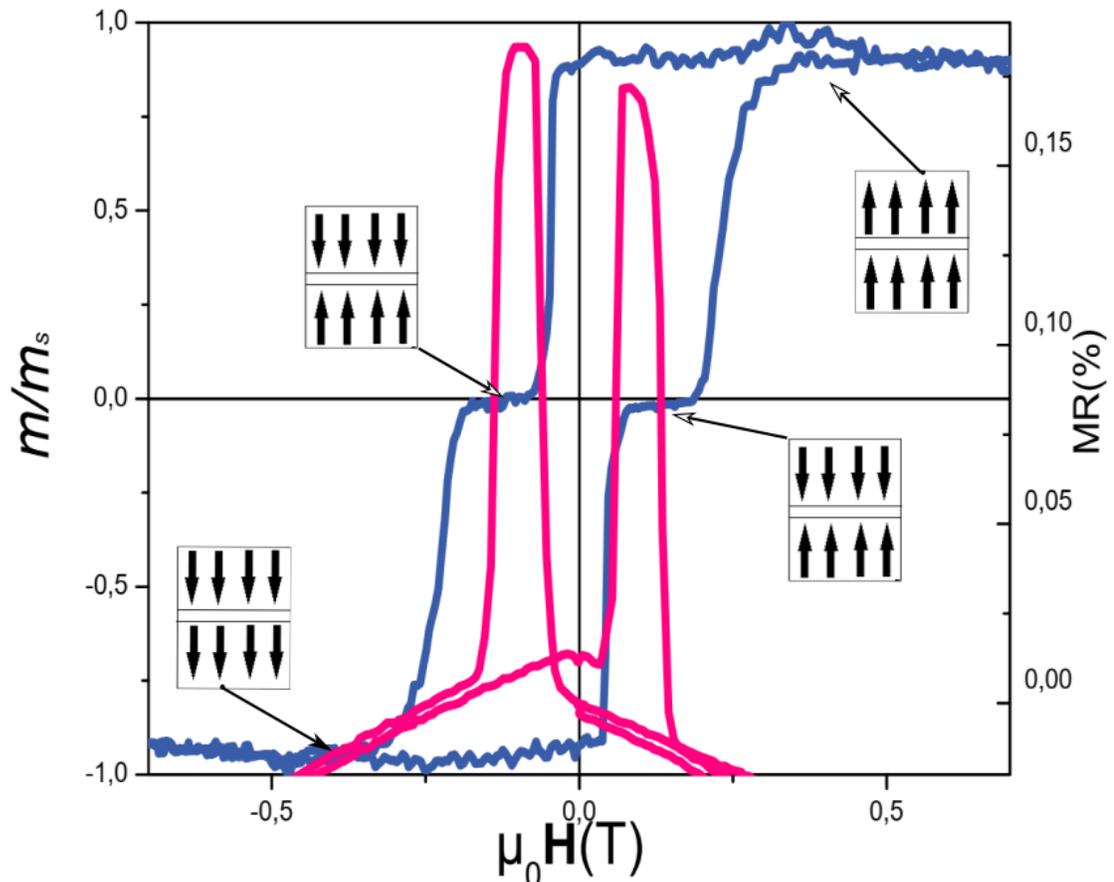


Figura 1.10: gráfico $M \times H$ para una PVE compuesta por dos sistemas de 10 bicapas Pd(1.5 nm)/Co(0.3 nm), separadas por un espaciador de cobre de 10 nm, con el campo aplicado perpendicular a la muestra. Se tiene la curva de magnetización (azul) y su curva de magnetorresistencia (magenta), pudiendo observar que los máximos de MR se obtienen para las zonas de transición tipo escalón, es decir cuando los momentos magnéticos de la muestra se alinean antiparalelos, y las zonas de saturación donde todos los momentos magnéticos se encuentran alineados con el campo.

En la figura 1.10 se despliega una curva de $M \times H$ típica para una PVE, donde se aprecia una transición tipo escalón entre ambas capas. Se realizó en la figura una representación del comportamiento de la orientación de la magnetización, donde se observa que para campos mayores a 0.3 T, se logra la saturación del sistema, por lo que los vectores de magnetización se encuentran mayoritariamente alineados con el campo, lo mismo sucede para un campo bajo los -0.3 T, pero la alineación se realiza en el sentido contrario.

Se observa en el gráfico también la curva de magnetorresistencia de la muestra, donde se aprecia que coinciden los sectores de máxima MR con las transiciones tipo escalón de la curva de magnetización.

1.6 Coeficientes de transporte eléctrico

1.6.1 Resistividad eléctrica.

Se define la resistencia como la oposición de los materiales al paso de una corriente eléctrica. Al someter un material a una diferencia de potencial V entre dos puntos a , b , se genera en este una corriente I en el interior del material, de tal manera que V depende linealmente de I , obteniendo así una constante de proporcionalidad, correspondiente a la resistencia R , y que se relacionan por la ley de Ohm como:

$$V = IR \quad (1.7)$$

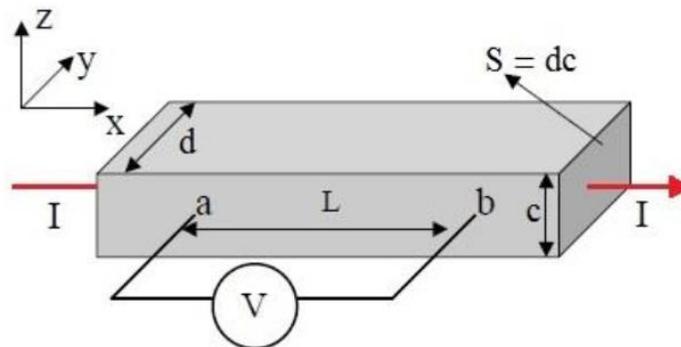


Figura 1.11: esquema de un material sometido a la acción de una corriente. (Araneda,2016)

Para una muestra homogénea y uniforme, como se observa en la figura 1.11, la resistencia dependerá de la distancia L que separa los terminales donde se mide la diferencia de potencial V , y depende inversamente de la sección transversal $S = dc$ de la muestra que es perpendicular a la corriente aplicada. Se define la resistividad ρ como un coeficiente independiente de las dimensiones de la muestra dado por:

$$R = \frac{L}{S} \rho \quad (1.8)$$

A escalas macroscópicas, la resistividad no depende del espesor del material. Sin embargo, en películas delgadas (de un espesor menor o comparable al camino libre medio de los portadores de carga a temperatura ambiente), la resistividad se torna dependiente del espesor (Oyarzun, 2010).

1.6.2 Efecto Hall

1.6.2.1 Efecto Hall ordinario

En un material conductor, bajo un campo magnético externo (\mathbf{B}) normal a la dirección de la corriente se genera una fuerza transversal sobre los electrones de conducción en el material, la cual da lugar a un voltaje Hall (V_H) transversal. Esto es conocido como el Efecto Hall ordinario (Hall, 1879) y es proporcional al campo magnético aplicado, debido

a que la fuerza que actúa sobre los electrones de conducción es la fuerza de Lorentz ($\mathbf{F} = e(\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B})$, Blundell, 2001).

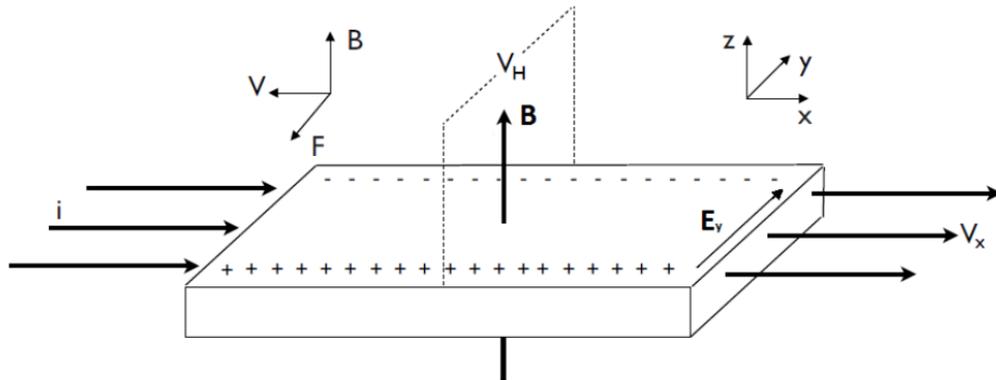


Figura 1.12: esquema del efecto Hall para un material conductor. (Araneda, 2016)

La fuerza de Lorentz \mathbf{F} desvía los electrones de su trayectoria, generando una polarización sobre el material, creando un campo eléctrico \mathbf{E}_y el cual balancea la fuerza de Lorentz, generando un equilibrio que permite que los electrones continúen su camino recto.

1.6.2.2 Efecto Hall Extraordinario

En los materiales ferromagnéticos se produce un efecto adicional, conocido como el efecto *Hall Extraordinario* (Hall, 1881), donde el voltaje transversal aumentaba en un orden de magnitud al ser medido en materiales ferromagnéticos, en comparación con un material no magnético. Este efecto depende de la magnetización, y se origina por la interacción espín-orbita entre los electrones de conducción y los momentos localizados. En un material ferromagnético la resistividad de Hall está dada por:

$$\rho_H = R_0 \vec{H} + 4\pi R_e \vec{M} \quad (1.9)$$

Donde R_0 es el coeficiente de Hall ordinario y R_e es el coeficiente de Hall extraordinario, En la ecuación 1.10 describe la resistividad de un material ferromagnético, la cual depende de ambas contribuciones. El coeficiente R_e debido a su dependencia con la magnetización, ha generado un gran interés por sus potenciales aplicaciones en el área de sensores magnéticos (Berger & Bergmann, 1980).

2 Hipótesis y Objetivos

2.1 Hipótesis de trabajo

En este trabajo se estudiaron las propiedades de magnetotransporte a temperatura ambiente de sistemas de pseudo válvulas de espín de Pd/Co con anisotropía magnética perpendicular modulados por la geometría de la superficie. En particular se busca modificar la superficie del sustrato para inducir un cambio en la dirección fácil de magnetización (anisotropía de la muestra) a escala nanométrica, lo que provoca un cambio en la transición entre ambos estados magnéticos, modificando así el valor y la forma de la curva de magnetorresistencia.

2.2 Objetivos

2.2.1 Objetivos generales

Controlar la anisotropía magnética perpendicular en sistemas tipo válvulas de espín modificando la morfología superficial del sustrato a escala nanométrica.

2.2.2 Objetivos específicos

- Fabricar sustratos de domos de Alúmina, a partir del proceso de anodización. El ancho promedio de los domos va desde los 50 nm a los 200 nm. Para lograr este objetivo se utilizaron para este propósito electrolitos de ácido sulfúrico, oxálico y fosfórico.
- Caracterización de los sustratos de alúmina obtenidos mediante microscopía SEM, para seleccionar aquellos que se encuentren aptos para ser utilizados y eliminar aquellos con imperfecciones o defectos.
- Fabricar PVE de Pd/Co que presenten AMP, mediante pulverización catódica, en sustratos de vidrio, buscando la mejor configuración para aumentar al máximo la transición entre los dos estados de magnetización de la muestra. Elegir la configuración óptima mediante la medición y análisis de la curva **MxH**.
- Fabricación de la PVE optimizada anteriormente mediante pulverización catódica sobre sustratos de domos de alúmina porosa.
- Caracterizar las muestras a través de la medición de magnetización, magnetorresistencia y Efecto Hall de las PVE en función del campo aplicado a temperatura ambiente.
- Comparar los resultados para PVE en sustrato de vidrio versus los obtenidos con una PVE en domos de alúmina, para estudiar la dependencia entre la magnetorresistencia del sistema y respecto al ancho de los domos.

3 Método experimental

3.1 Método experimental

La síntesis de las PVE se realizó mediante pulverización catódica en un sistema de alto vacío. Los arreglos de domos fueron obtenidos por un proceso de anodización de aluminio, obteniendo domos de distintos tamaños (entre 50 – 200 nm de diámetro), según el electrolito utilizado en el procedimiento. Mediante microscopia SEM se obtuvieron imágenes, midiendo a partir de estas el ancho promedio de domos de cada sustrato. Utilizando pulverización catódica se depositó PVE sobre los arreglos de domos de alúmina.

La caracterización magnética de las muestras se realizó mediante la utilización de un magnetómetro de gradiente alterno (AGM). Para la caracterización eléctrica se utilizó el método de cuatro contactos en un sistema de medición de transporte eléctrico CRYOGENIC en su modalidad de magneto-transporte eléctrico, obteniendo mediciones de MRG y Efecto Hall a temperatura ambiente. Los procedimientos fueron realizados en el Laboratorio de Magnetismo y Laboratorio de Microscopia del Departamento de Física de la Universidad de Santiago de Chile, en colaboración con el Laboratorio de Nano síntesis de la Universidad Central

3.2 Fabricación de domos de alúmina por anodización

Para lograr obtener domos de alúmina con diámetros promedios distintos, se utilizarán membranas de alúmina porosa. Los domos se obtendrán mediante el proceso de anodización del aluminio, con los cuales se logrará la formación de domos de un ancho promedio controlado.

El aluminio en condiciones atmosférica produce una capa de óxido al reaccionar con el oxígeno del ambiente, la cual está compuesta por alúmina amorfa (Al_2O_3) (Diggle, Downie & Goulding, 1969). El espesor de esta capa puede aumentar a través de diversos procesos, ya sean procesos térmicos, químicos o electrolíticos. En este trabajo de tesis se utilizó la anodización del aluminio, que consiste en la producción de esta capa de óxido electroquímicamente.

En función del electrolito usado se pueden tener distintas configuraciones.

- Si la alúmina no es soluble en el electrolito, el proceso terminará con una capa continua y aislante que actuará como aislante eléctrico y detendrá su crecimiento hasta un espesor límite (Hass, 1949).
- Si la alúmina es altamente soluble en el electrolito, se disolverá completamente sin dejar capa alguna.
- Si la alúmina es parcialmente soluble en el electrolito, genera un recubrimiento poroso sobre la superficie que va creciendo con el tiempo de anodización y puede llegar a tener unas cuantas micras de largo, esto debido a la existencia del

electrolito en el interior de estos poros, lo que genera un contacto eléctrico hacia la capa barrera de la alúmina.

Para la síntesis de nuestros domos se utilizaron electrolitos que disuelven parcialmente la alúmina, entre ellos se encuentran el ácido sulfúrico (H_2SO_4), ácido oxálico ($H_2C_2O_4$) y ácido fosfórico (H_3PO_4). Se conoce que la capa de alúmina porosa que se genera en la superficie del aluminio está constituida por una capa de barrera de óxido, la cual es muy fina (del orden del tamaño de un poro Setoh, 1932), y que los poros se ordenan en una estructura hexagonal con poros cilíndricos, cerrando en forma aproximadamente esférica en su parte inferior, la cual será utilizada para la obtención de nuestros domos (Keller et al, 1953). El método utilizado para el control del crecimiento de la membrana de alúmina porosa está basado en el trabajo realizado por Masuda & Fukuda en 1995, donde se proponen parámetros para la anodización de aluminio.

El proceso de síntesis de los sustratos se detalla a continuación:

3.2.1 Limpieza y pulido de la superficie

En la fabricación de todos los sustratos se utilizó aluminio de alta pureza (*aluminium foil 99.999% - GoodFellow Company*), cortado en láminas de $20 \times 20 \text{ mm}^2$. Debido a la sensibilidad del proceso ante imperfecciones, se realizó una limpieza superficial, para desengrasar y lavar la superficie. Esto se logró mediante la aplicación de detergente desengrasante, que se enjuagó con acetona y agua destilada.

Para la obtención de una superficie de aluminio liso y con mínimas impurezas se utilizó la técnica de electropulido, la que se basa en la eliminación de ellas por acción del campo eléctrico, esto es esencial ya que así se evitan concentraciones del campo eléctrico en el proceso de anodización.

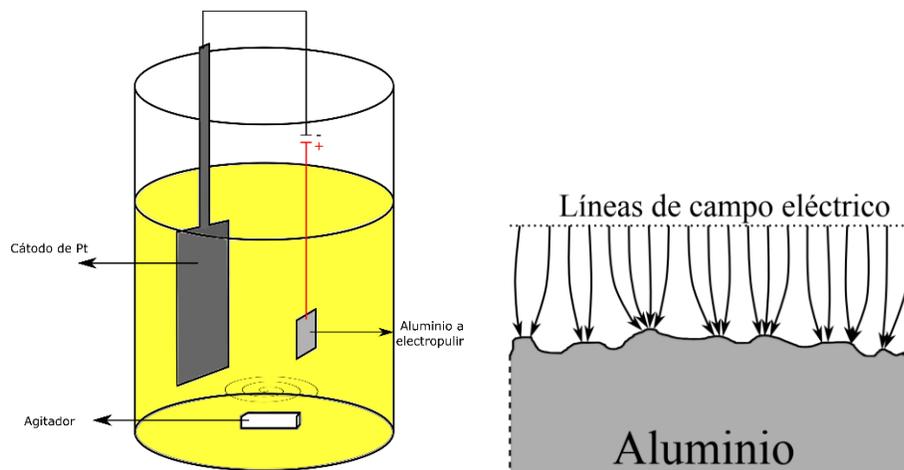


Figura 3.1: esquema para el montaje experimental para el proceso de electropulido, a la izquierda se observa el montaje experimental, a la derecha se observa un esquema de cómo actúan las líneas de campo sobre las impurezas

Se muestra un esquema del proceso en la figura 3.1, este proceso se realiza en un electrolito compuesto de etanol (C_2H_5OH) y ácido perclórico ($HClO_4$) en proporción de 3: 1, respectivamente, donde el ánodo es la lamina de aluminio y el cátodo de Platino. En el proceso, el campo eléctrico generado entre el platino y el aluminio se concentra en las zonas donde existen imperfecciones del aluminio, disolviendo de manera rápida esas zonas. Debido a esta reacción, el aluminio calienta rápidamente el electrolito y el ataque de la reacción se vuelve más agresivo sobre la superficie, pudiendo dañar el aluminio. Es por esto que se debe utilizar un baño frío que mantenga la temperatura del electrolito estable, además de una agitación constante para evitar el calentamiento local en la superficie del aluminio y mantener homogénea la concentración del electrolito.

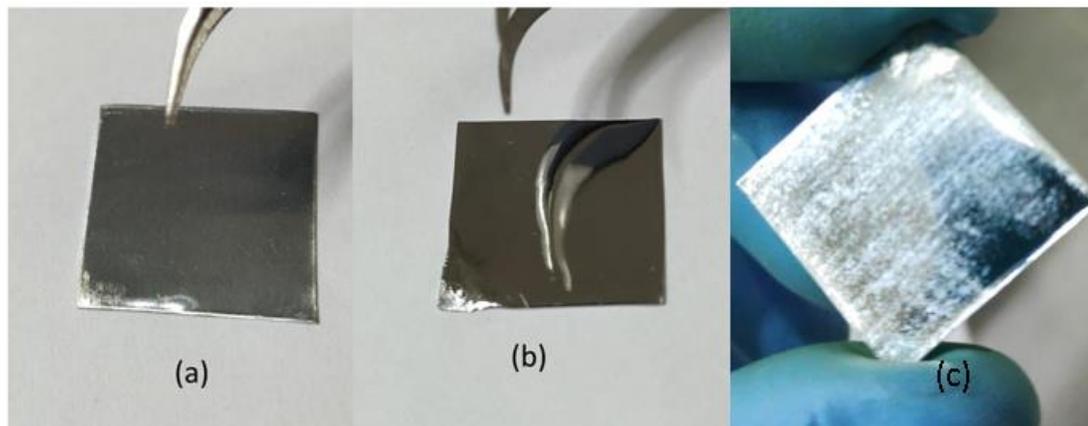


Figura 3.2: aluminios utilizados para el proceso de electropulido, (a) aluminio antes de electropulir; (b) aluminio electropulido; (c) aluminio dañado durante el proceso de electropulido. (a) y (b) Vega, 2019)

Como procedimiento estándar se utilizó un voltaje de 20 V durante 3 min, la temperatura se mantuvo entre 0 – 6°C, utilizando un baño de agua con hielo, con una agitación aproximada de 200 rpm mediante un agitador magnético. Terminado el proceso se deben limpiar las láminas con abundante agua bidestilada y etanol para eliminar completamente la solución de electro pulido. Posteriormente secar las láminas mediante aire comprimido evitando dejar cualquier rastro que pueda dañar la superficie. Finalmente el aluminio se encuentra en condiciones de ser anodizado.

3.2.2 Anodización del Aluminio.

En el proceso de anodización del aluminio, se aplica una diferencia de potencial constante entre la lámina de Al y un electrodo de Pt, que está en un baño electrolítico. Para controlar la geometría básica de la alúmina porosa se deben tener en cuenta los siguientes parámetros:

- **Potencial de anodización:** se ha comprobado que la geometría de los poros y la alúmina dependen del potencial de anodización (Keller, Hunter & Robinson, 1953) de tal manera que la separación de los poros (D) será:

$$D = kV \quad (3.1)$$

Donde la constante de proporcionalidad k tiene un valor $\sim 2.5 \left[\frac{nm}{V} \right]$ y fue medida experimentalmente (Gösele, 1999). Entonces dependiendo del potencial utilizado se relaciona directamente con el diámetro de los domos obtenidos, debido a que los poros se ordenan de forma hexagonal y cilíndrica en su largo, el electrolito modela la interfaz aluminio-alúmina de tal forma que genera interfaz de montes o domos (en la alúmina), con un diámetro del orden de D , y valles con un alto grado de ordenamiento (en el aluminio).

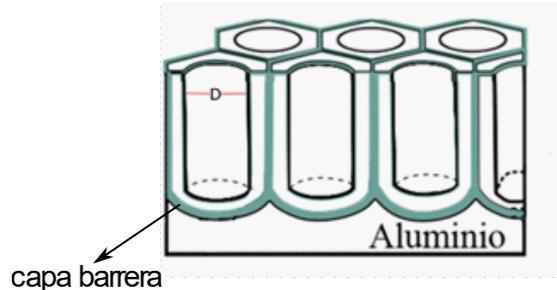


Figura 3.3: Esquema de la geometría obtenida en el proceso de anodización del aluminio, se observa que el ancho del poro de la alúmina es de tamaño D y que la forma de su capa barrera es casi esférica con diámetro D .

- **Tipo de electrolito:** a partir del medio electrolítico escogido, según su conductividad y pH permiten distintos rangos para potenciales de anodización y diferentes diámetros de poros, en consecuencia, diferentes diámetros de domos. Si se llega a utilizar un electrolito con alta conductividad a voltajes altos, podría provocar fracturas en la alúmina.
- **Temperatura del electrolito y agitación:** Como la alúmina es parcialmente soluble en el electrolito, se debe mantener esta condición que puede ser afectada debido a un aumento en la temperatura, provocando que la alúmina se disuelva totalmente. Por lo tanto, el electrolito se debe mantener bajo temperatura ambiente. Además, manteniendo la temperatura en esta condición se evita el calentamiento local, lo que podría provocar una disolución local en la muestra, es decir, concentraciones del campo eléctrico debido a las rugosidades. Por último, la temperatura del electrolito controla la velocidad de crecimiento de las películas de alúmina porosa (a más alta temperatura, el crecimiento es más rápido y viceversa). (Palma,2012). También a la vez de mantener la temperatura controlada, se debe agitar el sistema durante todo el proceso para evitar calentamientos locales y mantener la homogeneidad del pH del electrolito.

Para el proceso de anodización se utiliza el montaje que se muestra en la figura 3.4 el cual consiste en una celda de anodización. El electrodo positivo (ánodo) está fabricado de cobre que está en contacto directo con el aluminio a ser anodizado. Este electrodo está conectado al polo positivo de la fuente de poder (*Keithley 2400*). El electrodo de Pt está conectado al polo negativo de la fuente de poder, inmerso en el electrolito. En función del voltaje aplicado se controlan los parámetros geométricos (Ecuación 3.1), para

el control de la temperatura se utilizó un baño térmico con recirculador de agua (LabTech), programado para mantener la temperatura fija, donde la celda de anodización se posicionó hasta dejar el nivel de agua al mismo nivel que se encuentra el ácido. Las celdas utilizadas están fabricadas de teflón y fibra de vidrio.

Se posiciona la placa de cobre que actuará como ánodo y donde irán posicionados las placas de aluminio ya electropulido. Esto debido a que el cobre genera una mejor conducción tanto para la corriente como para el calor. Para la agitación se utiliza un agitador mecánico el cual consiste en una varilla de teflón con paletas en uno de sus extremos y puesto en un motor eléctrico, girando a ~ 700 rpm para mantener homogénea la solución y no genere burbujas. Se utiliza teflón debido a la resistencia que presenta a diferentes pH. El proceso de anodización comienza una vez que se equilibre la temperatura del electrolito con la del baño térmico.

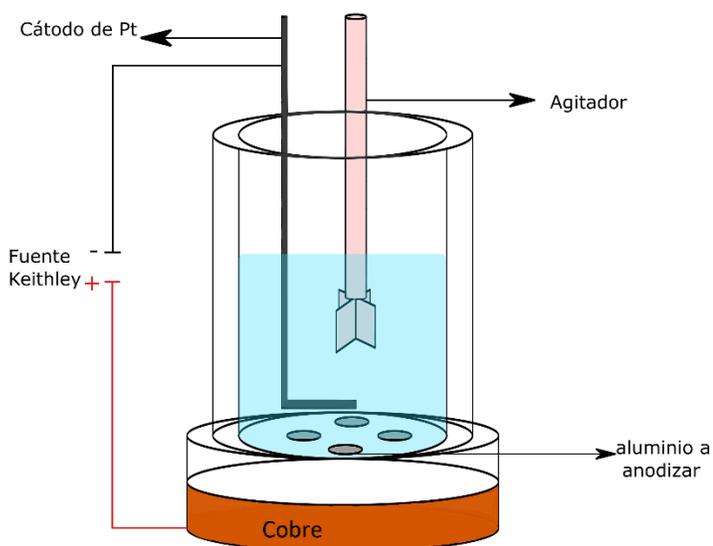


Figura 3.4: montaje experimental utilizado para el proceso de anodización del Aluminio, a partir de este fue posible obtener 4 sustratos por cada anodización.

A través del software LabVIEW se controla la fuente *Keithley 2400* para definir el voltaje, la intensidad de corriente y el tiempo de anodización. Los electrolitos utilizados para la fabricación de domos y sus parámetros generales se muestran a continuación:

Tabla 3.1: Electrolitos y sus parámetros de trabajo utilizados para casa caso.

Electrolito	Concentración	Voltaje de anodización (V)	Temperatura ($^{\circ}C$)
H_2SO_4	0.3M	25 – 35	0 – 2
$H_2C_2O_4$	0.3M	40 – 160	0 – 20
H_3PO_4	0.3M	160 – 190	0 – 1

A partir de los parámetros fijados, el diámetro de los domos dependerá del voltaje que se utilizará para el proceso anodización. Para esta tesis se fabricaron domos que van desde los 50 nm hasta los 200 nm, en la tabla 3.2 se resumen el voltaje aplicado para cada sustrato de domos fabricado:

Tabla 3.2: Voltajes utilizados para la creación de sustratos domos de alúmina

Voltaje (V)	Diámetro de domos nm (D)	Electrolito	Tiempo de anodización (h)
20	50	H_2SO_4	11
30	75	H_2SO_4	11
40	100	$H_2C_2O_4$	8
80	200	$H_2C_2O_4$	8

El procedimiento estándar para anodizaciones con voltajes menores a 100 V (*Soft Anodizing*) fue programar en LabVIEW el voltaje esperado para el proceso de anodización y hacer que aumente 1 volt por segundo, hasta alcanzar el valor esperado, para luego mantenerlo constante durante todo el proceso. Se muestra una representación del grafico de corriente y voltaje a continuación:

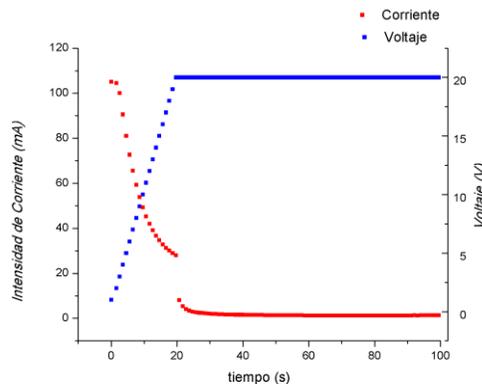


Figura 3.5: grafico representativas del proceso de anodización, se observa anodización a voltajes bajos (20 V, ácido sulfúrico)

El programa utilizado en LabVIEW fue desarrollado por Fabián Vega (Vega,2019) y modificado para la realización de este trabajo de tesis.

Una vez terminado el proceso se procedió a limpiar la muestra con etanol y abundante agua bidestilada para no dejar residuos en la alúmina del electrolito. Se presenta una representación esquemática del resultado obtenido en el proceso de anodización en la siguiente figura:

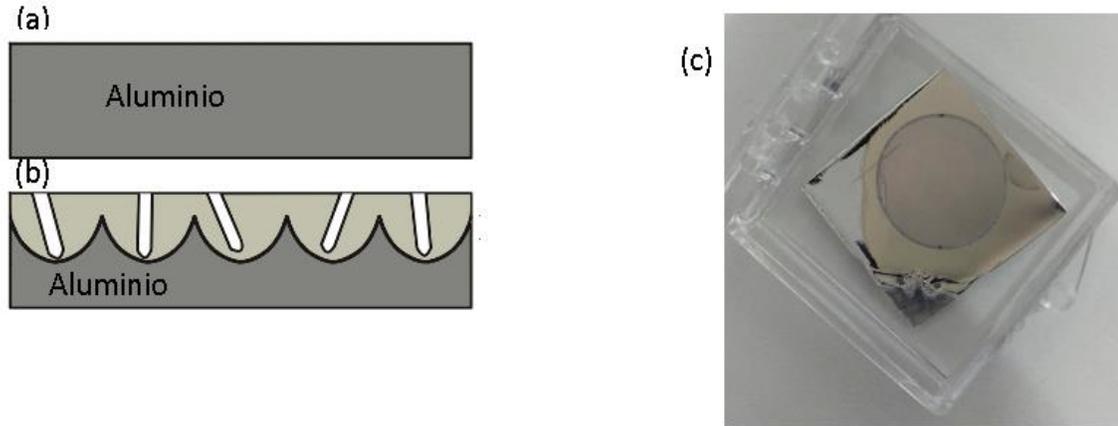


Figura 3.6: (a) Esquema del proceso de anodización del aluminio, se construyen los poros de forma desordenada (blancos), generando una matriz en la interfaz Al_2O_3 -AL de valles en el aluminio y de "montes" o domos en la alúmina, con un alto grado de ordenamiento. (b) resultado del proceso de anodización, se observa el sector circular central con un diámetro de 10 mm compuesto de Al_2O_3 - AL.

En este proceso los poros obtenidos no poseen un patrón de ordenamiento, sin embargo, en la interfaz alúmina-aluminio se genera en la alúmina un arreglo de domos con un alto grado de ordenamiento, de ancho promedio D . Para dejar sólo la película de alúmina con domos se procede a disolver el aluminio, para esto se realiza un ataque químico selectivo, mediante una solución compuesta por 3.6 gr de cloruro de cobre di hidratado ($CuCl_2 \cdot x2H_2O$), 50 ml de ácido clorhídrico y 100 ml de agua bidestilada, la cual disuelve únicamente el aluminio metálico dejando solo la alúmina. Para reconocer la capa donde se forman los domos, se marca con pintura de uñas el sector donde se encuentran los poros, ya que es difícil reconocer ese sector después de disolver el aluminio. Cabe señalar que para los sustratos de alúmina obtenidos con ácido sulfúrico y voltajes pequeños, el espesor de la alúmina formada no logra ser manipulable, por lo que se agrega pintura de uña en la capa de los poros, para obtener un espesor manejable y que pueda ser utilizado como sustrato.

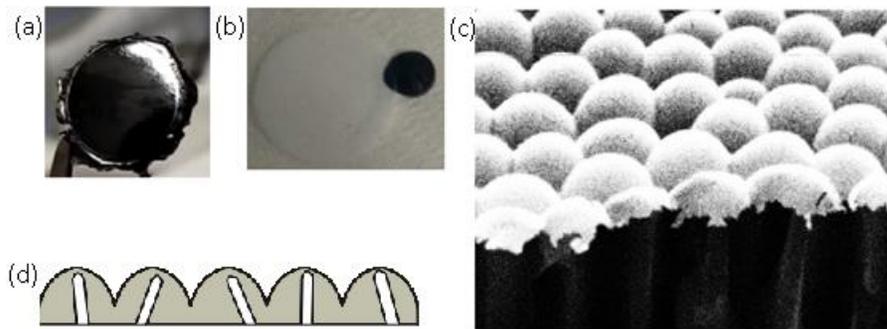


Figura 3.7: Sustratos de alúmina después del proceso de anodización, (a) sustrato obtenido para domos de 50 nm o aquellos que el espesor no fuera manejable, por lo que se procedió a utilizar pintura de uña para aumentar su espesor; (b) sustrato de domos de alúmina de color blanco, obtenido para una anodización 120 V; (c) imagen SEM obtenida para domos de alúmina para un proceso de anodización a 120 V, con un

diámetro promedio de 300 nm; (d) esquema del sustrato de alúmina obtenido para cada una de los sustratos sintetizados.

Una vez disuelto el aluminio se lava con abundante agua bidestilada, eliminando así todo rastro del ácido. Se observó la morfología superficial de los sustratos obtenidos mediante microscopía SEM, descartando aquellos donde no se haya logrado. Una vez filtradas las imágenes se utilizó un algoritmo en MATLAB para determinar el ancho promedio del diámetro de los domos. Teniendo el diámetro de los domos se depositaron las PVE sobre ellos para su caracterización magneto eléctrica.

3.3 Síntesis de sistemas de Pseudo Válvulas de Espín (PVE)

La fabricación de las PVE se realizó mediante el método de pulverización catódica, este método consiste en el desprendimiento de átomos provenientes de un “blanco” para ser depositados en la superficie de un sustrato. Para lograr el proceso de depósito del material del blanco en el sustrato se debe aplicar una gran diferencia de potencial entre el blanco (cátodo) y su cañón (ánodo). Este proceso es fundamental realizarlo en una cámara de alto vacío para obtener películas con alto grado de homogeneidad y libre de impurezas, evitando la contaminación de las muestras. El sistema está compuesto de una bomba turbo molecular que logra una presión estática de 10^{-7} Torr.

Para comenzar el proceso se utiliza Argón con un flujo de 20 SCCM, con el cual se alcanza la presión de trabajo del orden de 10^{-3} Torr, este gas es fundamental para el procedimiento, ya que mantiene la atmosfera de la cámara inerte reduciendo reacciones de oxidación. Se observa en la figura 3.8 un esquema del proceso de pulverización catódica, al aplicar una alta diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo, el argón se ioniza creando un plasma, el cual queda confinado debido al campo magnético, generado por un imán. Dentro del plasma, los electrones libres golpean los átomos de argón generando Ar^+ y crean electrones secundarios. Los iones de argón (Ar^+) son continuamente acelerados a la superficie del blanco (cargado negativamente), que al chocar con la superficie del blanco desprenden material por transferencia de momento, traspasando energía cinética al material, que es expulsado en sentido hacia el sustrato, alcanzando a este mismo y depositándose en su superficie.

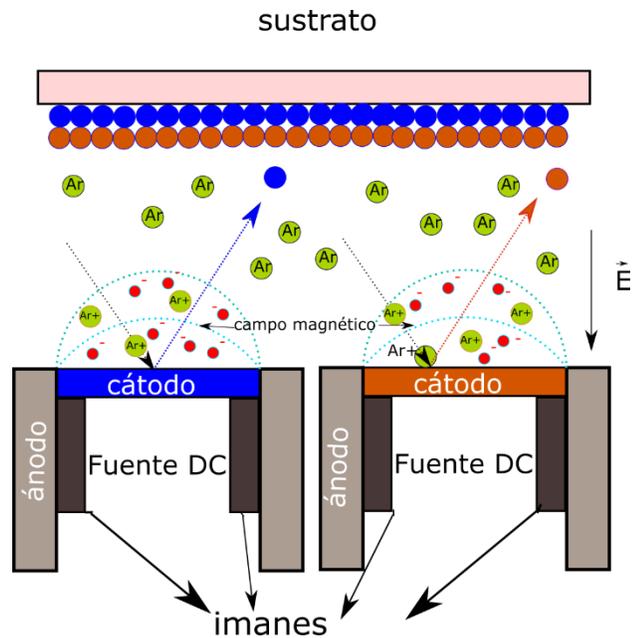


Figura 3.8: Esquema procedimiento de pulverización catódica para la obtención de una bicapa sobre un sustrato. Estos dos blancos se utilizan de manera alternada mediante la utilización de una tapa, solo se utiliza una a la vez.

El equipo cuenta con tres fuentes para realizar el depósito de diferentes materiales, dos de ellas son DC utilizadas para materiales metálicos, y una fuente RF que utiliza radio frecuencias en torno a 13.6 MHz, utilizada para materiales aislantes.

El sistema cuenta con un sistema de enfriamiento para evitar el sobrecalentamiento del blanco y del imán, preservando así la vida útil del equipo.

Los pasos realizados en el procedimiento de pulverización catódica son:

- 1) Aislar la cámara de vacío mediante la compuerta, para así poder ventilarla e igualar la presión ambiente, permitiendo abrir la cámara.
- 2) Montar los sustratos en el portamuestra giratorio existente en la cámara de vacío.
- 3) Cerrar la cámara, y comenzar a abrir la compuerta, para encender la bomba mecánica para llegar a una presión del orden 10^{-3} Torr.
- 4) Encender la bomba turbo molecular para alcanzar una presión de 3×10^{-7} Torr . (El tiempo aproximado para alcanzar esta presión es de 24 horas)
- 5) Encender el sistema de enfriamiento.
- 6) Abrir la botella de Argón, para luego dar un flujo de 20 SCCM al interior de la cámara de vacío, obteniendo una presión de trabajo del orden de 10^{-3} Torr.
- 7) Rotar la muestra
- 8) Encender la fuente y fijar la potencia del ánodo a utilizar, correspondiente a la tasa de depósito de material.
- 9) Iniciar el depósito, mediante la apertura de la tapa del cañón.

Las PVE que se fabricaron constan en general de sistemas de 10 bicapas de Paladio-Cobalto, separadas por un espaciador de Cobre, donde se fue variando la cantidad de bicapas en el segundo sistema ferromagnético. Todas las muestras se recubrieron con 1,5 nm de paladio para evitar la oxidación. Las tasas de depósito de Pd, Co y Cu fueron $0.05 \frac{\text{nm}}{\text{s}}$, $0.14 \frac{\text{nm}}{\text{s}}$ y $0.033 \frac{\text{nm}}{\text{s}}$ respectivamente. Un esquema de una de las PVE fabricadas se observa en la figura 3.9, en la cual el segundo sistema ferromagnético cuenta con 15 bicapas de Pd/Co.

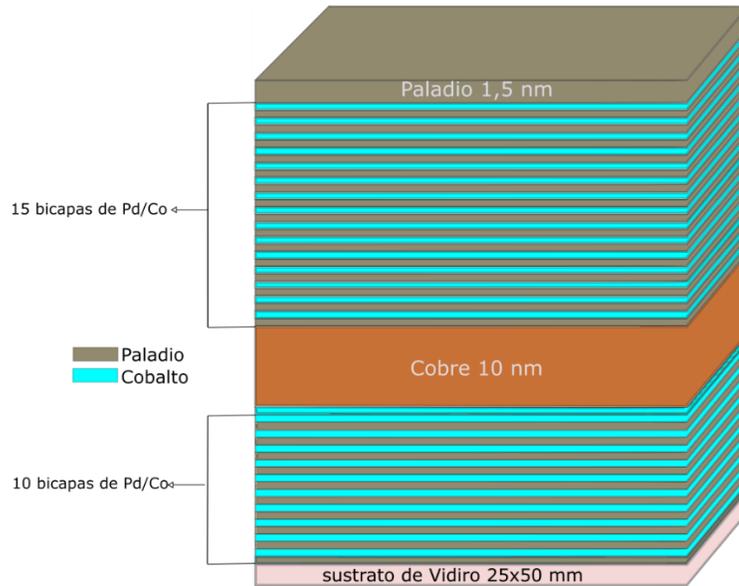


Figura 3.9: esquema representativo para una PVE, en particular este se encuentra compuesto por $(Pd_{1.5nm}Co_{0.3nm})_{x10}/Co_{0.3nm}Cu_{10nm}/(Pd_{1.5nm}Co_{0.3nm})_{x15}$ con una capa Paladio 1.5 nm.

Las PVE fabricadas en este trabajo de tesis se observan en la tabla 3.3, estas se depositaron sobre dos tipos de sustratos, el primero es un vidrio de dimensiones 24×50 mm y de entre 130 a 170 micras de espesor, y el segundo es un sustrato de domos de alúmina fabricada mediante proceso de anodización de aluminio. Para realizar mediciones de transporte eléctrico, se utilizaron mascarar en formato cruz como se detalla en la figura 3.10.

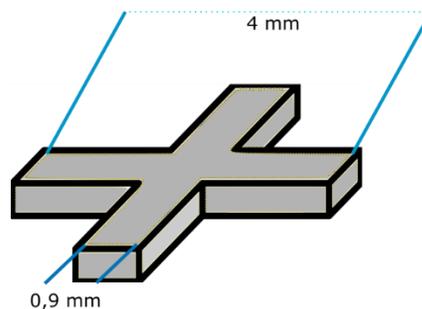


Figura 3.10: representación del formato tipo cruz utilizado para la medición de coeficientes de transporte eléctrico.

Tabla 3.3: Nomenclatura de muestras fabricadas.

Nomenclatura	Composición	Sustrato	Espesor (nm)
JH02	(Pd _{1.5nm} Co _{0.3nm}) _{x10}	Vidrio	18.0
JH05	(Pd _{1.5nm} Co _{0.3nm}) _{x10} /Co _{0.3nm} Cu _{10nm} /(Pd _{1.5nm} Co _{0.3nm}) _{x10}	Vidrio	47.8
JH06	(Pd _{1.5nm} Co _{0.3nm}) _{x10} /Co _{0.3nm} Cu _{10nm} /(Pd _{1.5nm} Co _{0.3nm}) _{x5}	Vidrio	38.8
JH08	(Pd _{1.5nm} Co _{0.3nm}) _{x10} /Co _{0.3nm} Cu _{10nm} /(Pd _{1.5nm} Co _{0.3nm}) _{x15}	Vidrio	56.8
JH11	(Pd _{1.5nm} Co _{0.3nm}) _{x10} /Co _{0.3nm} Cu _{10nm} /(Pd _{1.5nm} Co _{0.3nm}) _{x15}	Domos 200 nm	56.8
JH12	(Pd _{1.5nm} Co _{0.3nm}) _{x10} /Co _{0.3nm} Cu _{10nm} /(Pd _{1.5nm} Co _{0.3nm}) _{x10}	Domos 50 nm	47.8
JH13	(Pd _{1.5nm} Co _{0.3nm}) _{x10} /Co _{0.3nm} Cu _{10nm} /(Pd _{1.5nm} Co _{0.3nm}) _{x10}	Domos 100 nm	47.8
JH14	(Pd _{1.5nm} Co _{0.3nm}) _{x10} /Co _{0.3nm} Cu _{10nm} /(Pd _{1.5nm} Co _{0.3nm}) _{x10}	Domos 200 nm	47.8
JH15	(Pd _{1.5nm} Co _{0.3nm}) _{x10} /Co _{0.3nm} Cu _{10nm} /(Pd _{1.5nm} Co _{0.3nm}) _{x15}	Domos 50 nm	56.8
JH16	(Pd _{1.5nm} Co _{0.3nm}) _{x10} /Co _{0.3nm} Cu _{10nm} /(Pd _{1.5nm} Co _{0.3nm}) _{x15}	Domos 100 nm	56.8

3.4 Caracterización magnética

Para la obtención del comportamiento de la magnetización en función del campo aplicado se utilizó un Magnetómetro de Fuerza de Gradiente Alterno (AGFM) (Flanders, 1988). Este consiste en un sistema similar al observado en la figura 3.10, donde se tiene un electroimán que genera un campo DC cuasi estático además de unas bobinas centrales que generan un campo AC. La muestra se posiciona en el centro de este sistema mediante un porta-muestra que incluye un elemento piezoeléctrico, que, al ser inmerso en la acción del campo, comenzará a vibrar a lo largo del eje x. El gradiente de campo que produce una fuerza alterna sobre la muestra está dado por:

$$\vec{F} = -\nabla(-\vec{m} \cdot \vec{H}) \quad \rightarrow \quad F_x = m \frac{dH}{dx} \quad (3.2)$$

Con \vec{m} como el momento magnético de la muestra. Se observa de la ecuación 3.2 que la fuerza es proporcional al momento magnético. La fuerza alterna comienza a flexionar el piezoeléctrico, haciendo vibrar la muestra, generando un voltaje proporcional a la amplitud de la vibración, la cual a su vez es proporcional al momento magnético. Las muestras se midieron en dos orientaciones diferentes: en el plano y fuera del plano con respecto al campo magnético aplicado. Para cada una de estas orientaciones se utilizó una sonda diferente. Como la vibración de la muestra es pequeña e imperceptible a simple vista fue necesario la utilización de un sistema amplificador Lock-In, el cual permite limpiar el ruido de las señales externas a la señal entregada por la muestra. El sistema busca a partir de una frecuencia de referencia (entregada por un generador de funciones) detectar las señales para esa frecuencia, logrando así eliminar todas las demás. Las frecuencias utilizadas en este trabajo van desde los 75kHz hasta los 85 kHz aproximadamente, lo que se busca es estar lo más cercano a la frecuencia de resonancia de la muestra, maximizando la señal. El barrido de campos se realizó mediante la utilización de una fuente DC que va desde -1 T hasta 1 T, controlada mediante LabVIEW.

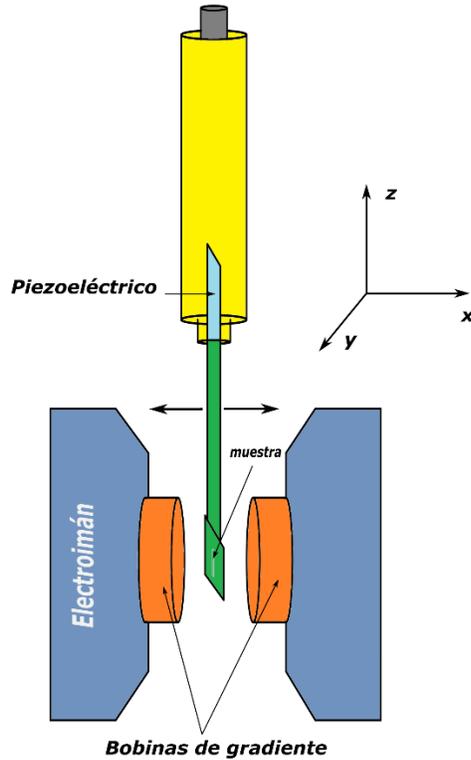


Figura 3.11: esquema magnetómetro de gradiente alterno (AGM)

3.5 Caracterización eléctrica

Para la caracterización eléctrica de las PVE se utilizó el sistema *CRYOGENIC* en su modalidad MRG. Se aplicó la técnica de cuatro puntas y así se realizaron las mediciones de Efecto Hall, MRG y resistividad. Para este propósito se utilizaron muestras tipo cruz señaladas en el punto 3.2 de este capítulo (figura 3.3), con un ancho de 400 micras, a las cuales se les soldaron contactos a un pin de oro mediante la utilización de un Wire Bonding y en algunos casos se utilizó pintura de plata para mejorar la estabilidad mecánica de los contactos en la muestra.

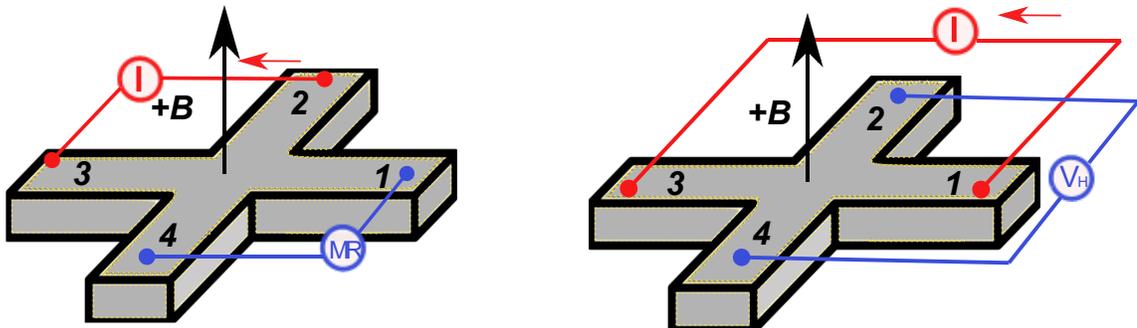


Figura 3.12: Montaje utilizado para las mediciones de transporte (a) configuración para medir magnetorresistencia, (b) configuración utilizada para medir efecto Hall

Todas las medidas de transporte eléctrico se realizaron a temperatura ambiente (300 K) y con el campo perpendicular a la muestra, el cual se utilizó en el rango de -2 T a 2 T. El sistema completo de medición esta automatizado mediante la plataforma LabVIEW, el cual está compuesto por una fuente de corriente (KEITHLEY MODEL 6221), y por un nano voltímetro (2182A NANOVOLTIMETER, KEITHLEY), que permite medir el voltaje que se genera en la muestra.

4 Resultados experimentales

4.1 Sustratos de Domos de Alúmina

Se fabricaron arreglos hexagonales de domos de alúmina mediante los procedimientos de anodización explicados anteriormente, utilizando las configuraciones mostradas en la tabla 3.3. Para caracterizar el tamaño de los domos se obtuvieron imágenes de microscopía de barrido (SEM), en el Laboratorio de Microscopía electrónica (MLE) del Centro para el desarrollo de la Nanociencia y Nanotecnología (Cedenna), para cada uno de los sustratos anteriormente señalados, los resultados se despliegan en la figura 4.1:

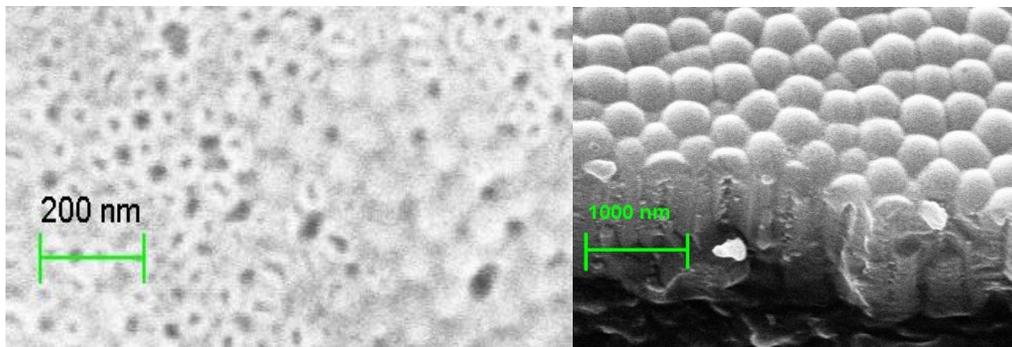


Figura 4.1: Imagen SEM donde se observa a la derecha sustrato para domos de 75 nm (sulfúrico), se ven zonas donde hay domos y otras donde estos se abrieron; a la izquierda se observa el sustrato para la muestra de 450(fosfórico) nm, donde se observan algunos de los arreglos hexagonales de domos de alúmina obtenidos.

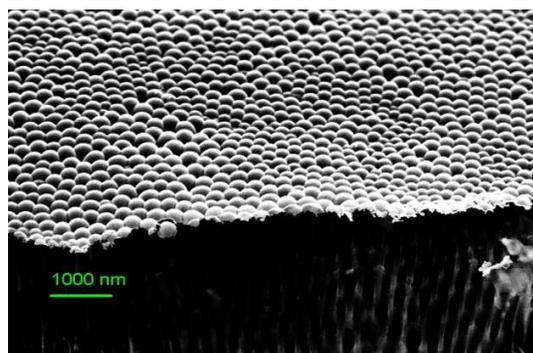


Figura 4.2: Imagen SEM sustrato de domos de alúmina obtenido por anodización con ácido oxálico a 120 V

Se observa en la figura 4.1 dos sustratos de alúmina, en el primero el cual se fabricó a partir del electrolito de ácido sulfúrico a 30 V, donde no se logra apreciar el arreglo de domos buscado.

Esto a pesar de que existen zonas donde se formaron domos, pero en otras regiones estos se abrieron, por lo cual se descarta este sustrato para utilizarlo en los estudios siguientes. Este defecto puede ser por efecto de la temperatura, debido que se utilizó la misma temperatura base que para 20 V, pero al aumentar el voltaje aumento la temperatura de la reacción su, produciendo que los domos se abrieran.

En la figura 4.1 a la derecha se observan los resultados de una prueba de anodización realizada a 180 V con ácido fosfórico y en la figura 4.2 donde se logran apreciar con claridad los arreglos de domos en la superficie de la alúmina para ácido oxálico. Se observa una diferencia entre ambos sustratos, donde en el proceso realizado con ácido oxálico obtienen domos más definidos que los domos fabricados con ácido fosfórico, además se observa que la geometría de los domos no es uniforme, por lo cual, se debe medir la dispersión promedio de sus diámetros(D). Esto se realiza mediante el software MATLAB analizando las imágenes obtenidas por microscopía SEM se obtiene un histograma realizado para una frecuencia de 100 datos, donde se ajusta una distribución normal obteniendo la distribución del tamaño de domos y su dispersión (σ). Los resultados se muestran en la tabla 4.1.

Tabla 4.1: Diámetro promedio de domos obtenidos.

Voltaje (V)	D esperado(nm)	D promedio (nm)	Electrolito
20	50	47.3	H_2SO_4
30	75	-	H_2SO_4
40	100	97.6	$H_2C_2O_4$
80	200	195.5	$H_2C_2O_4$

Se muestran a continuación las imágenes SEM utilizadas para los análisis acompañadas de un histograma que representa la distribución del diámetro de cada Domo(D). A partir de esto se concluye que los arreglos de domos de alúmina obtenidos tienen un diámetro promedio de 50, 100 y 200 nm los que serán utilizados para el estudio.

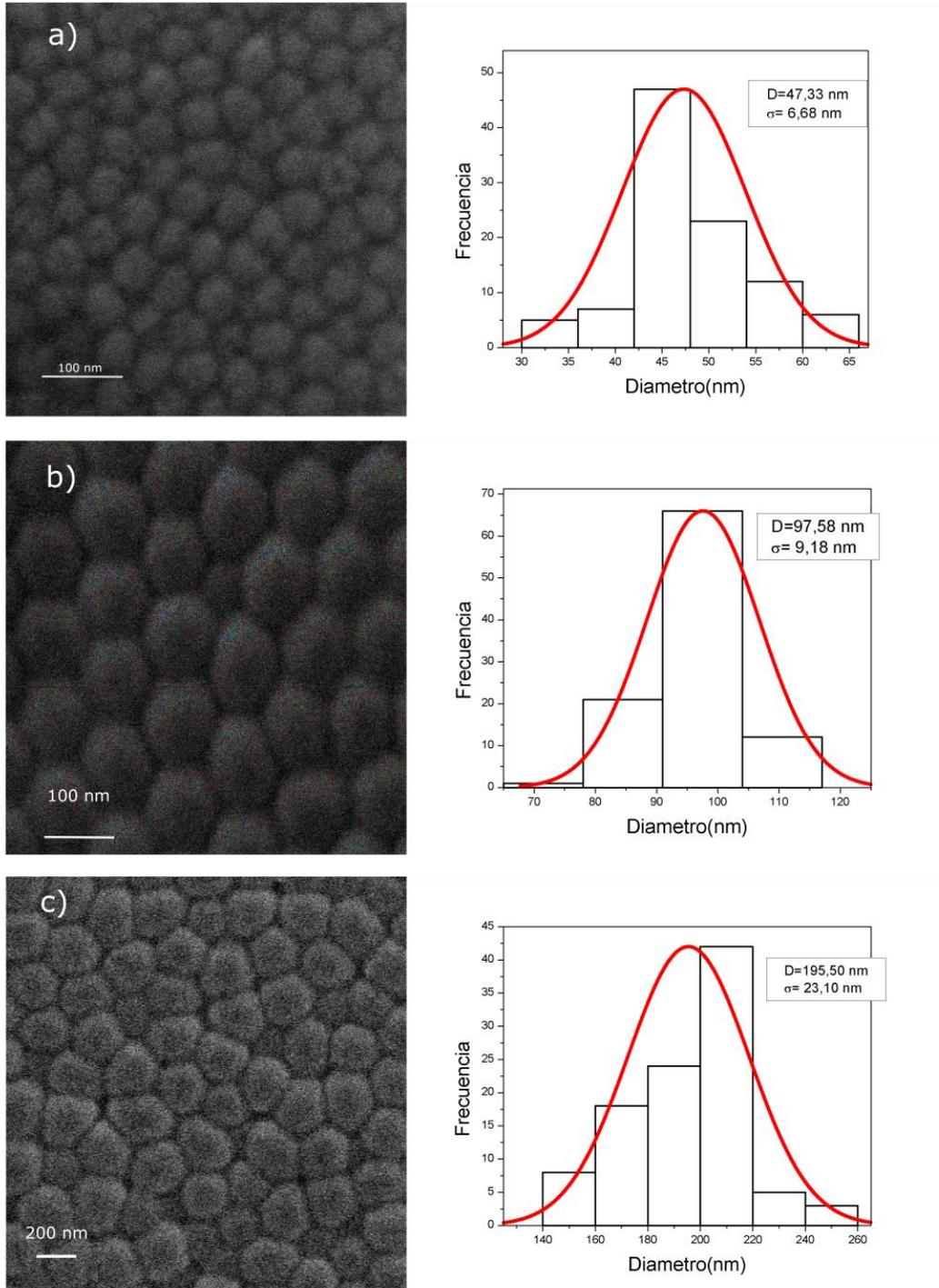


Figura 4.3: Imágenes SEM para los distintos sustratos de domos de alúmina obtenidos donde: a) anodización 20 V, b) 40 V, c) 80V., se acompaña cada imagen con su respectivo histograma donde D representa el promedio de la distribución de domos encontrados, y σ el valor de la dispersión de los datos con respecto a la media.

4.2 Fabricación de las PVE

Se fabricaron pseudo válvulas de espín depositadas en sustratos de vidrio, para el estudio de distintas configuraciones con el fin optimizar sus propiedades magnetoeléctricas.

4.2.1 Validación del método de trabajo

Las pseudo válvulas de espín fabricadas para este trabajo de tesis se sintetizaron a partir del trabajo realizado por Fabián Araneda (2016), donde se fabricaron PVE utilizando multicapas de Pd/Co. Para calibrar el sistema y replicar las muestras desarrolladas en dicho trabajo, se comenzó depositando 10 bicapas de Pd/Co sobre un sustrato de vidrio plano y se midió una curva de magnetización en función del campo magnético externo perpendicular al plano de las multicapas, este resultado se muestra en figura 4.4, donde se compara además con los datos obtenidos por Araneda.

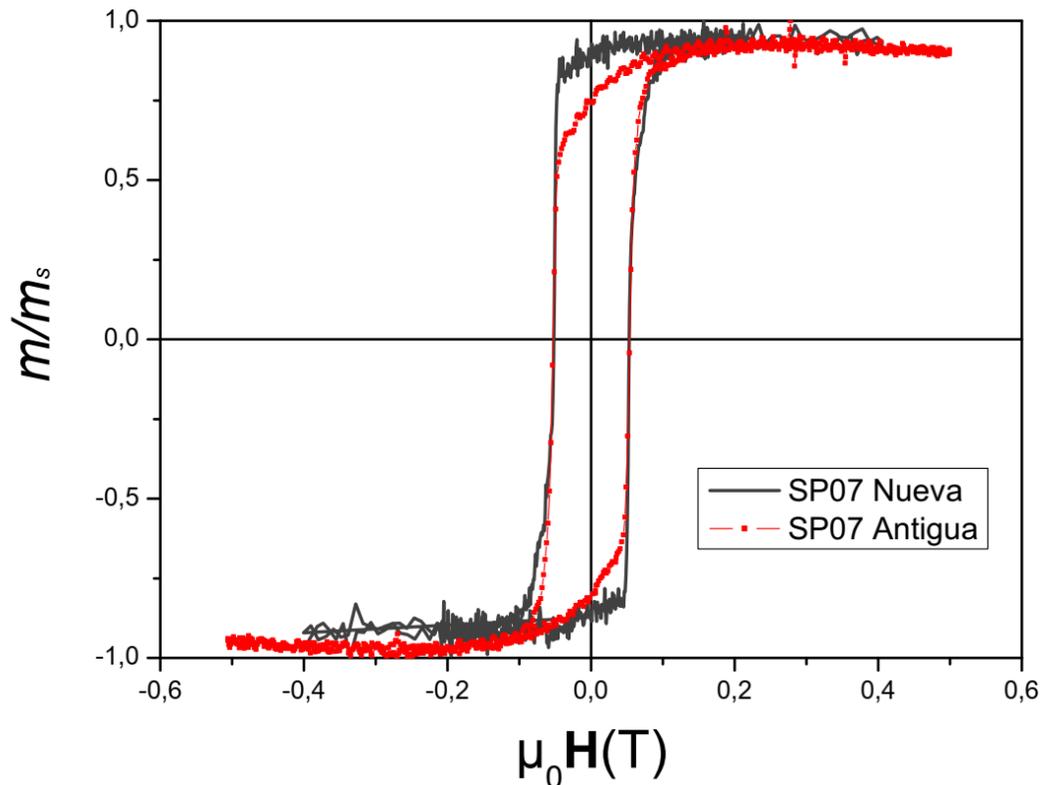


Figura 4.4: Gráfico $M \times H$ para las muestras de 10 bicapas Pd/Co x 10 SP07 antigua (rojo), JH02 nueva (gris) medidas fuera del plano de la muestra.

En el gráfico de la figura 4.4 se observa que el sistema de 10 bicapas de Pd/Co posee una anisotropía magnética perpendicular al plano de la muestra. Los resultados obtenidos tanto en campo coercitivo y en remanencia concuerdan con el trabajo realizado por Araneda. Mediante la obtención de estos resultados, se validan las

condiciones de fabricación y por lo que se procede a la fabricación de las PVE para este trabajo de tesis.

Se fabricó la muestra JH05 (Tabla 3.3) descrita en el trabajo de Araneda como la muestra SP02, compuesta por. La curva de magnetización obtenida mediante AGFM con el campo aplicado perpendicular al plano de la muestra se despliega en la figura 4.5.

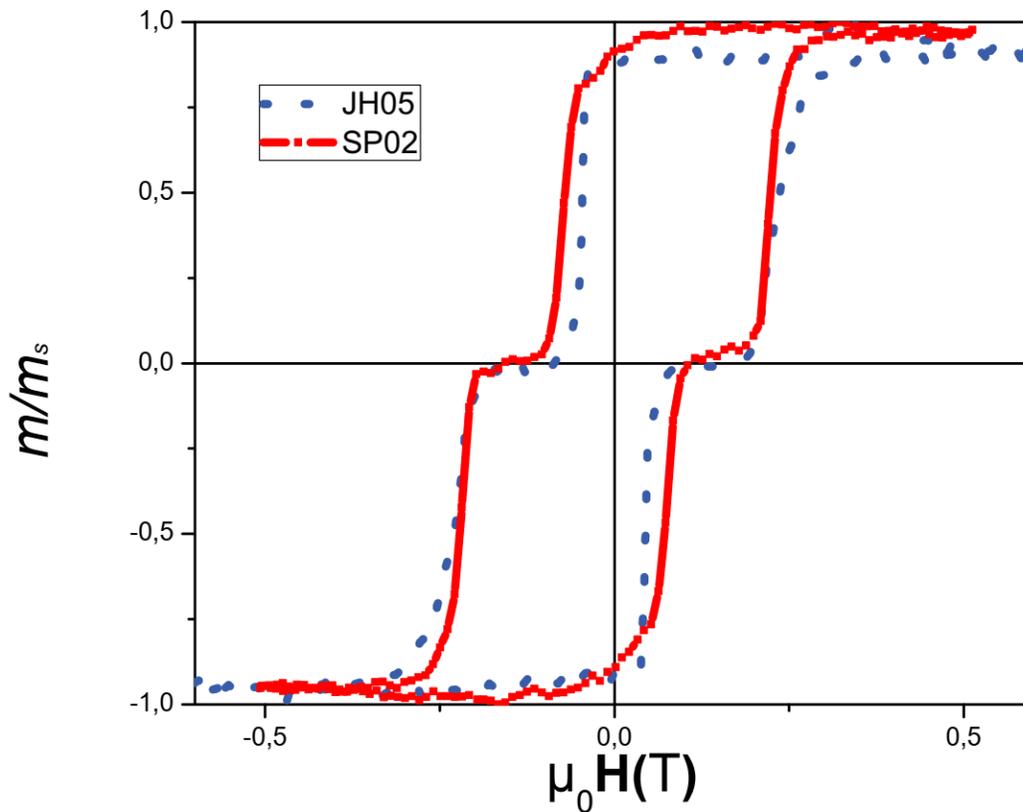


Figura 4.5: Gráfica $M \times H$ para las muestras de $(Pd/Co)_{x10}/Cu/(Pd/Co)_{x10}$ SP02(rojo), JH05 (azul) medidas fuera del plano.

En la figura 4.5, se observa que el comportamiento de la magnetización en función del campo aplicado para ambas PVE es consistente, debido a que se obtuvo un campo de saturación similar, ambas muestras poseen una transición tipo escalón y campos coercitivos semejantes.

4.2.2 Optimización de PVE

Se realizó un estudio de la PVE JH05 ($PdCo_{x10}|Cu|PdCo_{x10}$), para analizar distintas configuraciones del segundo sistema ferromagnético y así optimizar las propiedades magnetoeléctricas. Un aumento en el número de multicapas del segundo sistema ferromagnético podría inducir un aumento de la coercitividad en la capa dura de la

muestra, obteniendo máximos mejor definidos para la curva de magnetorresistencia. Por lo tanto, se varió el segundo sistema ferromagnético, modificando el número de multicapas de Pd/Co en 5 y 15 repeticiones. Se observan los resultados (figura 4.6), donde se agregó la curva de referencia para el sistema multicapas $PdCo_{x10}$ (JH02).

Se puede apreciar que en la muestra JH06 (5 bicapas) no existe una clara transición entre los dos estados magnéticos, obteniendo un valor de la magnetorresistencia menor y no bien definido (figura 4.7), esto debido a que al disminuir la cantidad de multicapas del segundo sistema ferromagnético, disminuye su señal, presentando un comportamiento como la muestra de referencia (JH02). En cambio en la muestra JH08 (15 bicapas) se observa un aumento en el campo coercitivo de la capa dura, definiendo mejor la transición tipo escalón entre los dos estados magnéticos y obteniendo un aumento en el valor de MRG y en el rango de campo para el estado de alta resistencia.

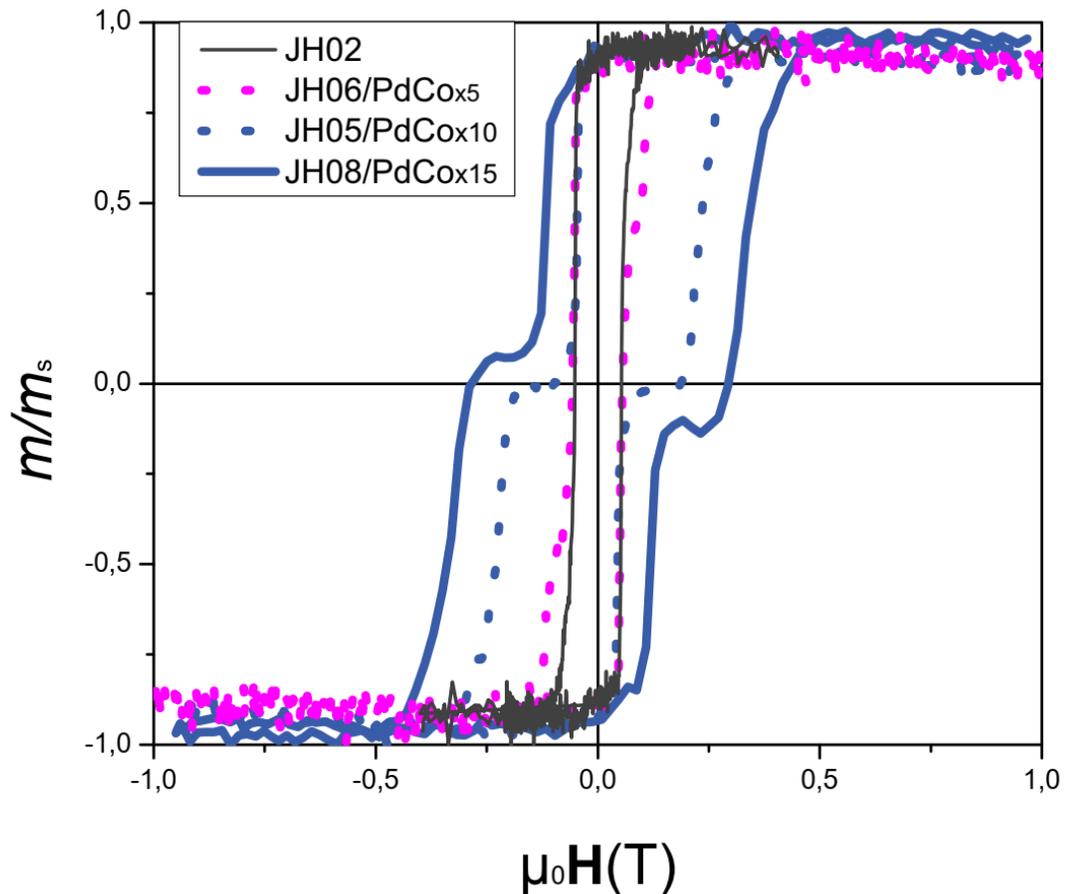


Figura 4.6: Gráfico comparativo de las muestras JH02, JH05, JH06 y JH08, medidas con el campo aplicado perpendicular a la muestra.

Esta transición tipo escalón entre los dos sistemas magnéticos se debe a la presencia de Cu (Thiyagarajah & Bae, 2008), ya que el separador induce que la anisotropía de la capa dura no esté completamente orientada fuera del plano, lo que implica un aumento en la magnitud del valor de campo aplicado para comenzar a revertir la magnetización. Además, se ha logrado observar que al aumentar el número de multicapas de Pd/Co, la dispersión de anisotropía aumenta produciendo un incremento en el valor en el campo coercitivo (Michea 2017).

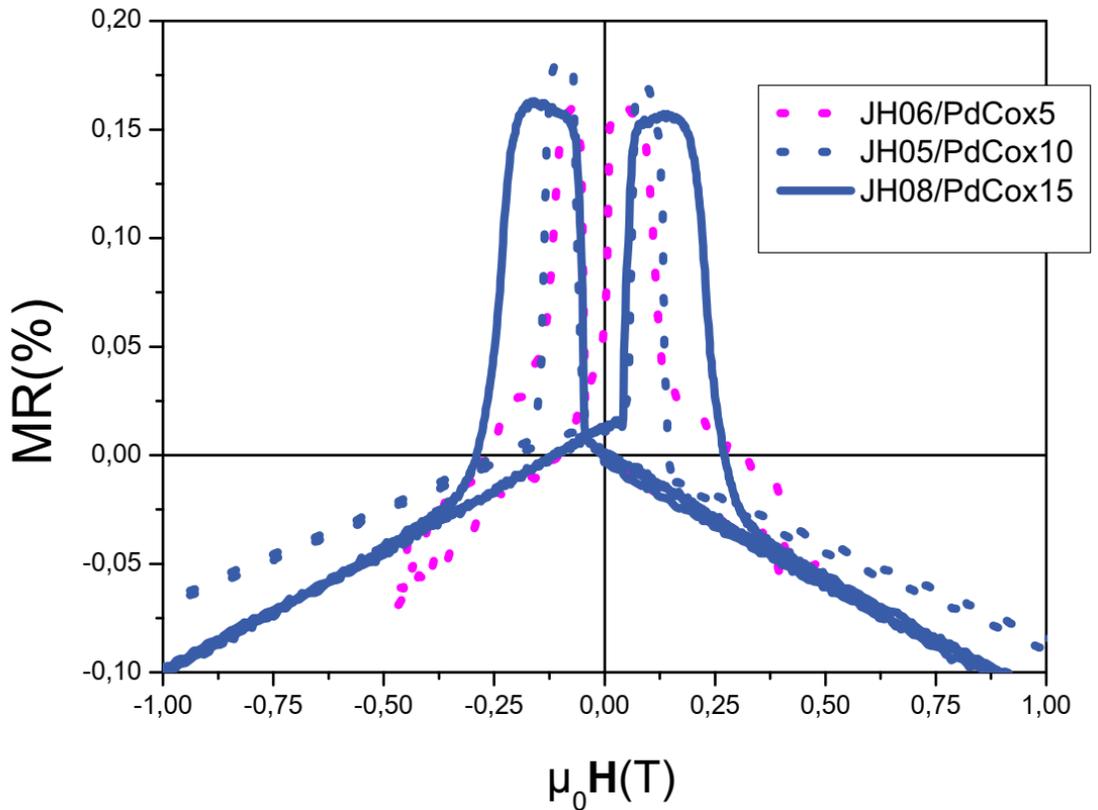


Figura 4.7: magnetorresistencia de las muestras utilizadas para la optimización de la PVE a temperatura ambiente

En el gráfico de la figura 4.17 se observa que los valores de MR están en el rango entre 0,16% y 0,18%, siendo el valor más alto para la configuración $PdCo_{x10}|Cu|PdCo_{x10}$ (JH05), sin embargo para el muestra JH08 ($PdCo_{x10}|Cu|PdCo_{x15}$), el valor de MR es menor pero con una región de campo mejor definida debido al aumento en el campo coercitivo en la capa dura, producto del incremento del número de multicapas.

Se seleccionaron las configuraciones con 10 y 15 multicapas para ser estudiadas sobre sustratos con domos de diferentes diámetros. Estas dos configuraciones para las PVE fueron seleccionadas ya que son las que exhiben mayores valores de magnetorresistencia y mejor definición de la región de campo para el estado de alta resistencia.

4.3 Caracterización de las PVE sobre domos de alúmina

Se depositaron las PVE mediante pulverización catódica con los parámetros descritos en el capítulo 3.2. La alúmina se posicionó mediante cinta kapton sobre los sustratos de vidrio, en cuadrados de aproximadamente 4x4 mm, para colocar la máscara en formato cruz descrita anteriormente para las medidas de magnetorresistencia y voltaje Hall. Todas las mediciones fueron realizadas a temperatura ambiente (300 K).

4.3.1 Caracterización magnética

Se realizó la caracterización magnética de las PVE depositadas sobre arreglos de domos cuyo diámetro promedio va desde los 50 nm a los 200 nm, estos fueron medidos en el magnetómetro de gradiente de fuerza alterno (AGFM).

4.3.1.1 Pseudo válvulas de espín depositadas en un arreglo de domos de 50 nm:

Se midieron las curvas de magnetización en función del campo magnético aplicado perpendicular a la muestra, para las dos configuraciones de PVE depositadas sobre domos de 50 nm de diámetro y sobre vidrio, las cuales se despliegan en la figura 4.8.

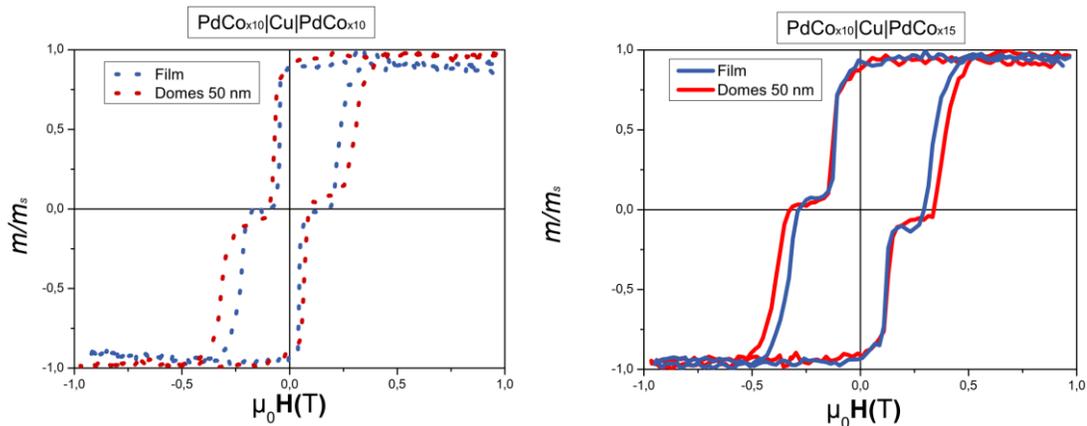


Figura 4.8: Gráfico $M \times H$ para las PVE depositadas sobre arreglos de domos de 50 nm medidas en la configuración perpendicular al plano, comparadas con la PVE plana, para la configuración $PdCo_{x10}|Cu|PdCo_{x10}$ (a) y la configuración $PdCo_{x10}|Cu|PdCo_{x15}$ (b)

Se aprecia en los gráficos anteriores un cambio en el comportamiento de la magnetización de ambas PVE al ser depositados sobre domos de 50 nm, con respecto a la PVE plana.

En ambas configuraciones de PVE se observa un aumento en el campo coercitivo de la capa dura, siendo el campo coercitivo de la capa blanda similar al valor de la PVE sobre vidrio. El aumento en el campo coercitivo de la capa dura es debido a la pérdida de la anisotropía magnética perpendicular del sistema.

Si comparamos ahora ambas configuraciones de PVE se obtiene:

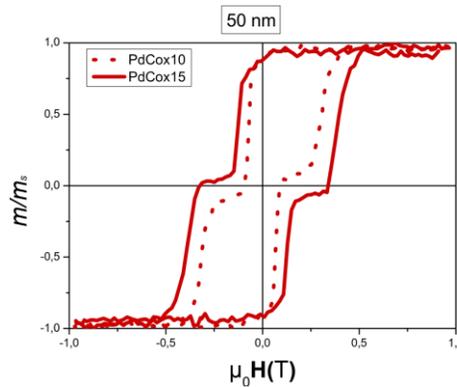


Figura 4.9: comparación de las curvas MxH para las dos configuraciones de PVE depositadas en domos de 50 nm

En el gráfico de la figura 4.9 se muestra que la transición entre los sistemas ferromagnéticos de la PVE donde se define de mejor manera la transición tipo escalón para la configuración PVE $PdCo_{x10}|Cu|PdCo_{15}$.

4.3.1.2 Pseudo válvulas de espín depositadas en un arreglo de domos de 100 nm:

En la gráfico de la figura 4.10 se despliegan los resultados de la curva MxH fuera del plano para las PVE en dos configuraciones: en la figura a) se muestra la magnetización para la PVE compuesta por $PdCo_{x10}|Cu|PdCo_{10}$ depositada sobre domos de 100 nm, y el gráfico de la PVE sobre vidrio. Existe una diferencia entre la transición tipo escalón, ya que para esta muestra se vuelve más suave. Con respecto al campo coercitivo, la transición tipo escalón esta menos definida, pero aumento su valor tanto en la capa dura como en la capa blanda; en la figura b) se muestra la magnetización para la PVE con configuración $PdCo_{x10}|Cu|PdCo_{15}$ depositada sobre domos de 100 nm y la PVE sobre vidrio. Se puede observar al igual que en la configuración de PVE anterior, que se suaviza la transición tipo escalón, aunque en menor medida.

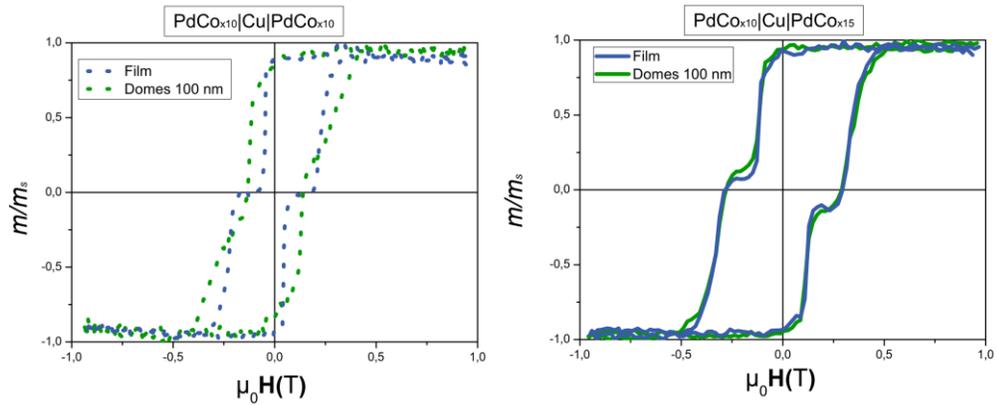


Figura 4.10: curva $M \times H$ para las PVE depositadas sobre arreglos de domos de 100 nm medidas en la configuración fuera del plano, comparadas con la PVE plana, para la configuración PdCo_{x10}|Cu|PdCo_{x10} (a) y la configuración PdCo_{x10}|Cu|PdCo_{x15} (b)

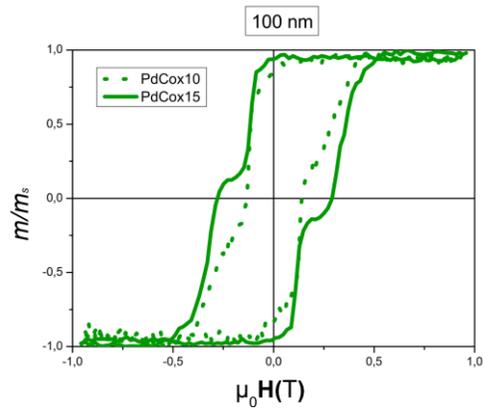


Figura 4.11: comparación de las curvas $M \times H$ para las dos configuraciones de PVE depositadas en domos de 100 nm.

En el gráfico de la figura 4.11 se observó, al igual que para el arreglo de domos de 50 nm, se obtiene una mejor definición de la transición entre ambos estados para la configuración PdCo_{x10}|Cu|PdCo_{x15}, además que se requiere de un mayor valor de campo de saturación.

4.3.1.3 Pseudo válvulas de espín depositadas en un arreglo de domos de 200 nm:

En la figura 4.11 se muestra la curva de magnetización para ambas configuraciones de PVE depositadas sobre domos de 200 nm, con un campo externo aplicado fuera del plano de la muestra.

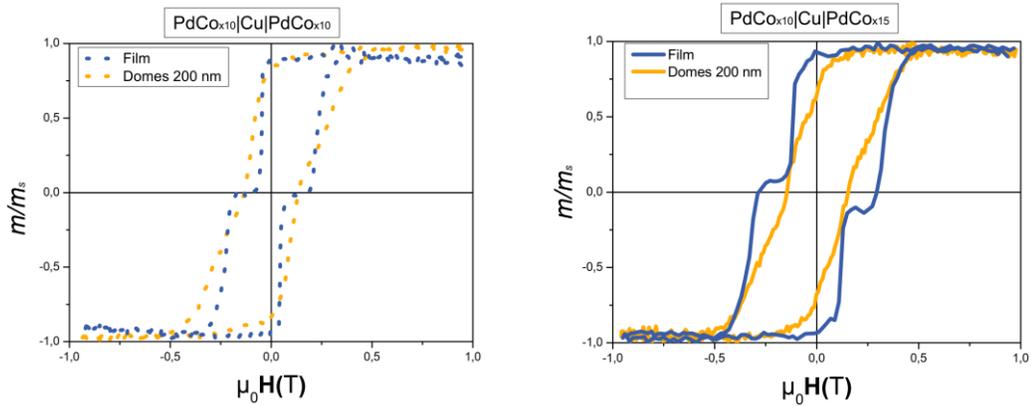


Figura 4.12: curva $M \times H$ para las PVE depositadas sobre arreglos de domos de 50 nm medidas en la configuración fuera del plano, comparadas con la PVE plana, para la configuración $PdCo_{x10}/Cu/PdCo_{x10}$ (a) y la configuración $PdCo_{x10}/Cu/PdCo_{x15}$ (b)

Se observó en la figura 4.12 a) que para la configuración de $PdCo_{x10}/Cu/PdCo_{x10}$ se pierde casi por completo la transición tipo escalón entre ambos estados y existe un aumento en el campo de saturación, inducido por la disminución de la anisotropía fuera del plano. En la figura 4.12 b) se observa el gráfico $M \times H$ para una PVE con configuración $PdCo_{x10}/Cu/PdCo_{x15}$ donde al igual que el caso anterior no se aprecia la transición entre los estados magnéticos. Para ambas configuraciones se puede apreciar una disminución en la magnetización remanente.

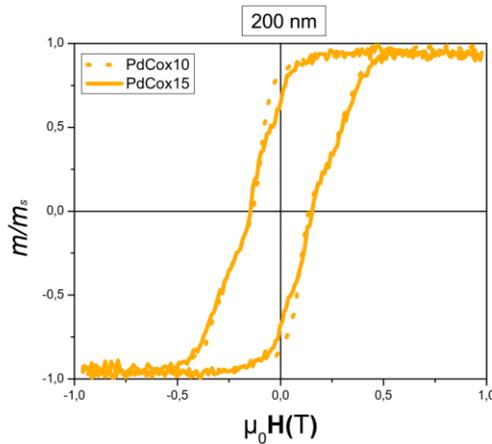


Figura 4.13 : Comparación de las curvas $M \times H$ para las dos configuraciones de PVE depositadas en domos de 200 nm

En la figura 4.13 se muestran ambos sistemas de PVE depositados sobre domos de 200 nm. Se observa que la curva de magnetización tiene un comportamiento similar inducido por la geometría del domo sobre la PVE, lo cual genera un aumento en la dispersión de

la anisotropía, lo que implica una disminución en la anisotropía perpendicular de la muestra.

4.3.1.4 *Discusión general*

En la figura 4.14 se resumen de los resultados de para la magnetización en función del campo externo aplicado fuera del plano, para ambas configuraciones de PVE depositadas sobre los arreglos de domos de 50, 100 y 200 nm:

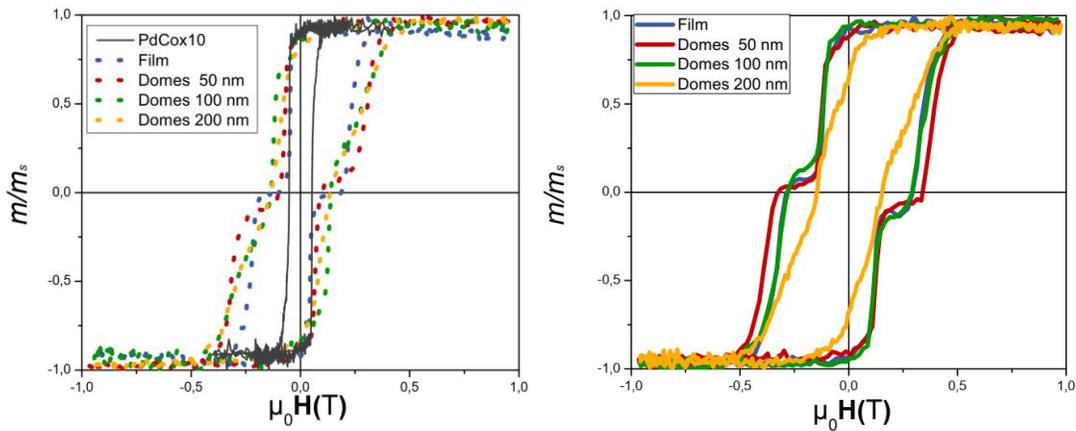


Figura 4.14: Grafica $M \times H$ para las PVE depositadas sobre domos de diámetro promedio 50, 100 y 200 nm, medidos para un campo aplicado fuera del plano

Se puede determinar de los resultados obtenidos que al depositar las PVE sobre domos de 50 nm, se produce un aumento en el campo coercitivo de la capa dura de la muestra esto debido a la pérdida de anisotropía perpendicular inducido por la geometría del sustrato. También se aprecia que a medida que se aumenta el tamaño del domo se va aumentando la dispersión de anisotropía, lo que produce pérdida en la anisotropía perpendicular del sistema, observando en los gráficos de magnetización una pérdida de la transición tipo escalón entre ambos sistemas ferromagnéticos.

Se muestra en la figura 4.15 las curvas $M \times H$ para ambas configuraciones de PVE con campo aplicado en el plano de la muestra, sobre domos de 50, 100 y 200 nm. Se observa que a medida que el tamaño de domos aumenta, se requiere de un menor campo para saturar la muestra en comparación con la PVE plana, es decir que mientras mayor sea el tamaño los domos existen contribuciones a la magnetización en el plano de la muestra, dadas por la morfología inducida con los domos en el sustrato.

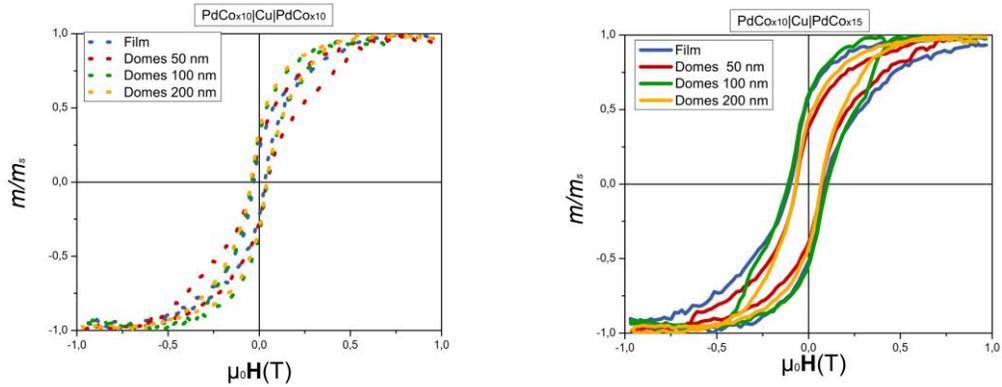


Figura 4.15: Grafico $M \times H$ para las PVE depositadas sobre domos de diámetro promedio 50, 100 y 200 nm, medidos para un campo aplicado en el plano.

En un trabajo previo realizado por Sebastián Michea et al. (Michea et al. ,2017), donde se estudiaron sistemas de multicapas con una configuración $(Co_{0.4nm}/Pd_{1nm}) \times 10$ depositados en arreglos de domos de alúmina hexagonal para diámetros de 100 nm y 250 nm, que se muestran a continuación:

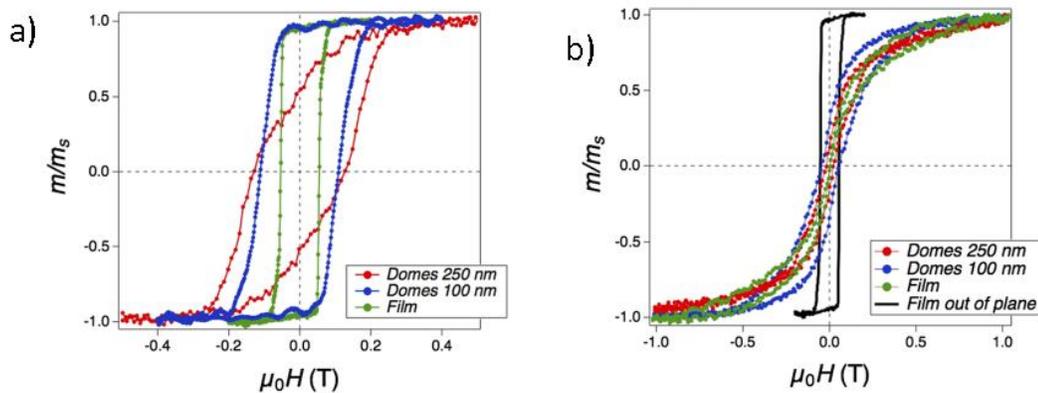


Figura 4.16: Resultados experimentales obtenidos por Sebastián Michea para una curva $M \times H$ de las multicapas de Co/Pd para multicapas en distintos sustratos medidas con un campo externo aplicado: a) fuera del plano, b) en el plano.

Se observa en la curva $M \times H$ medida fuera del plano (figura 4.16 a)) un aumento en el campo coercitivo para las multicapas depositadas sobre domos, con respecto a la muestra depositada sobre un sustrato de vidrio. También se observa una disminución de la magnetización remanente cuando se aumenta el diámetro de los domos. Esto efecto se atribuye al aumento en la diámetro de los domos y parte del Co/Pd se deposita en los espacios entre cada domo.

4.3.2 Resultados transporte para las PVE depositadas sobre domos

4.3.2.1 Magnetorresistencia

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para la MR para las muestras de ambas configuraciones de PVE, en domos que van de los 50 nm a los 200 nm de diámetro medidas con el campo perpendicular al plano de la muestra y a temperatura ambiente 300K

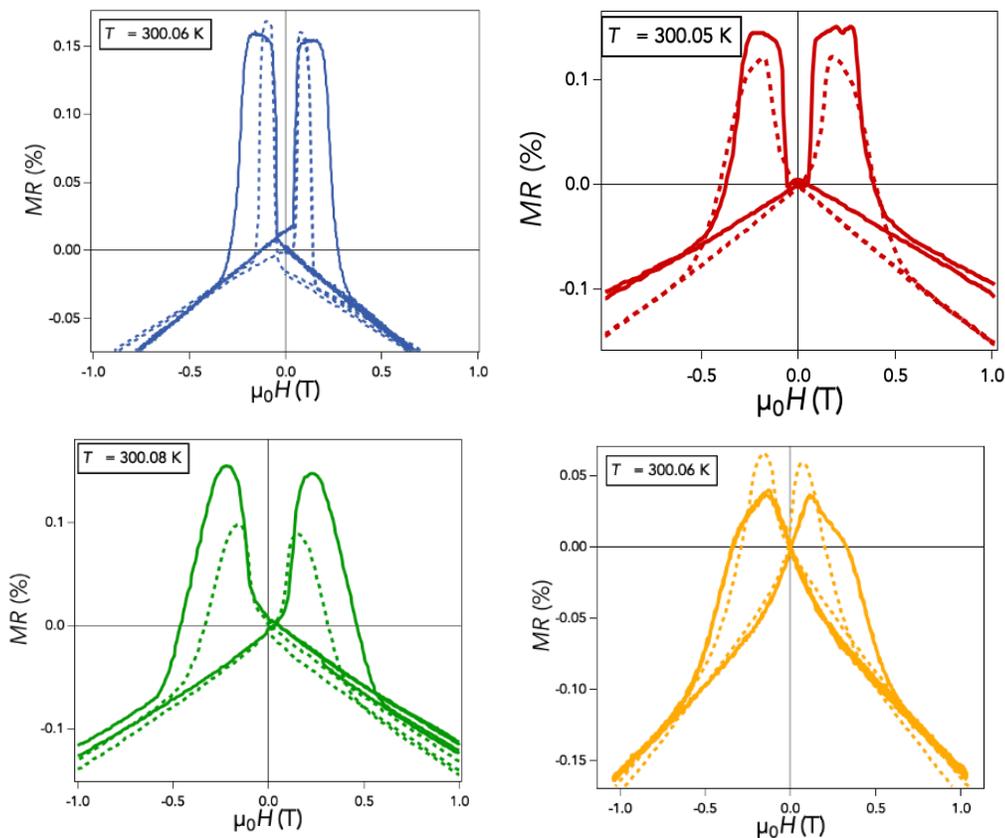


Figura 4.17: magnetorresistencia para las PVE depositadas sobre: film (azul), domos de 50 nm (Rojo), domos de 100 nm (verde) y domos de 200 nm (amarillo), a temperatura ambiente (300K)

En los gráficos desplegados en la figura 4.17 se observa como varia la magnetorresistencia en función del diámetro de los domos sobre los que se depositan ambos sistemas de PVE, siendo la línea punteada correspondiente al sistema $PdCo_{x10}|Cu|PdCo_{x10}$ y la línea continua al sistema $PdCo_{x10}|Cu|PdCo_{x15}$. Se observa que, tanto para los domos de 200 nm como para la PVE sobre el film, el valor de la magnetorresistencia es mayor para la configuración $PdCo_{x10}|Cu|PdCo_{x10}$. En cambio, tanto para los domos de 50 nm como para los domos de 100 nm, la magnetorresistencia es mayor para la configuración $PdCo_{x10}|Cu|PdCo_{x15}$.

En el gráfico de la figura 4.18 se despliegan las curvas de magnetorresistencia para la configuración de la PVE $PdCo_{x10}/Cu/PdCo_{x15}$ depositadas sobre diferentes sustratos.

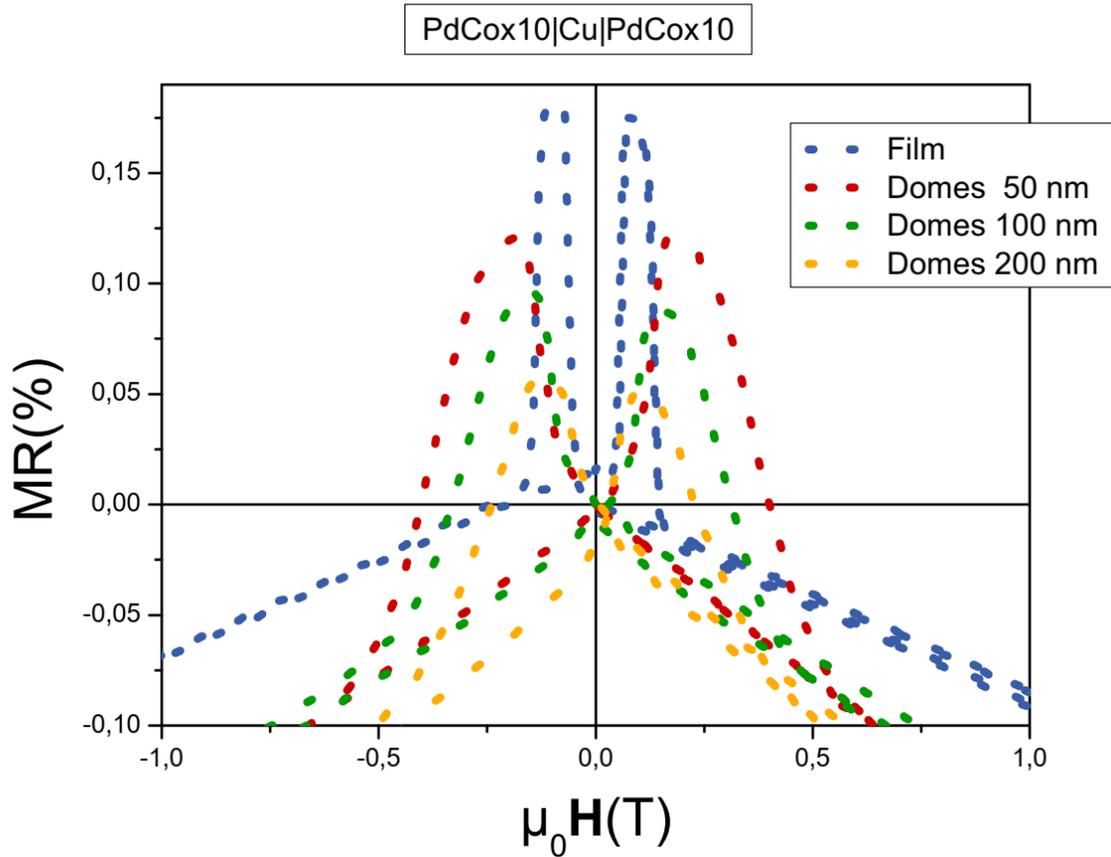


Figura 4.18: magnetorresistencia para la PVE $PdCo_{x10}|Cu|PdCo_{x10}$ depositada sobre domos de distintos tamaños, medida con el campo fuera del plano de la muestra a 300K

Se observó que los valores máximos de magnetorresistencia están bien definidos en la PVE depositada sobre vidrio, de la misma forma que la transición tipo escalón observada en la curva de magnetización. Se aprecia también que al aumentar el tamaño de los domos del sustrato, disminuye el valor de la MR, pero aumenta la región de campo magnético donde se definen los máximos.

A continuación, se presentan los resultados de MR obtenidos en función del diámetro de domos para la configuración de PVE $PdCo_{x10}|Cu|PdCo_{x15}$:

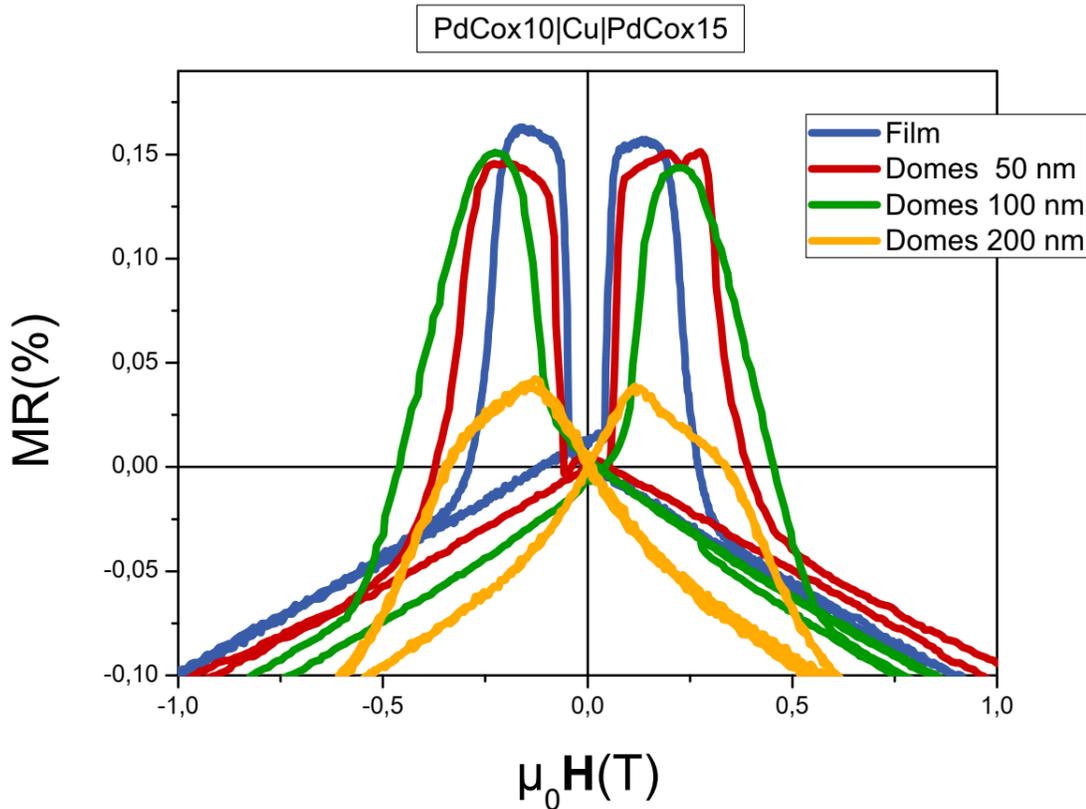


Figura 4.19: magnetorresistencia para la PVE $PdCo_{x10}|Cu|PdCo_{x15}$ depositada sobre domos de distintos tamaños de diámetro, medida con el campo fuera del plano de la muestra a temperatura ambiente 300 K

Se observa en la figura 4.19 que el máximo valor de MR se obtiene para la PVE depositada sobre un sustrato plano, esto debido a que en esta configuración se tiene el máximo de anisotropía magnética perpendicular, por lo tanto, los estados de alta y baja resistencia están bien definidos. Sin embargo, para los domos de 50 nm se observa una mejor definición de estos máximos de MR, en términos de su cuadratura que se asemeja a los utilizados para la construcción de una PVE MRAM (Figura 1), esto es producto del aumento del campo coercitivo observado en la curva de magnetización al incrementar el número de multicapas del segundo sistema ferromagnético.

Se observa también que al aumentar el tamaño de domos disminuye el valor de MR, pero a diferencia de lo que ocurre en el sistema $PdCo_{x10}|Cu|PdCo_{x10}$, en estas muestras los máximos obtenidos para 50 nm y 100 nm son similares. Por lo que se infiere que al tener una configuración diferente de multicapas, se puede encontrar un valor para esta PVE que defina mejor la cuadratura de la MR en domos de 100 nm. Es decir, se podrían obtener máximos mejor definidos, mediante la variación del número de multicapas de los sistemas ferromagnéticos de las PVE, sobre un mismo tamaño de domos.

Se presenta a continuación un gráfico con los valores máximos de MR (%) en función del diámetro promedio de los domos para ambas configuraciones de PVE.

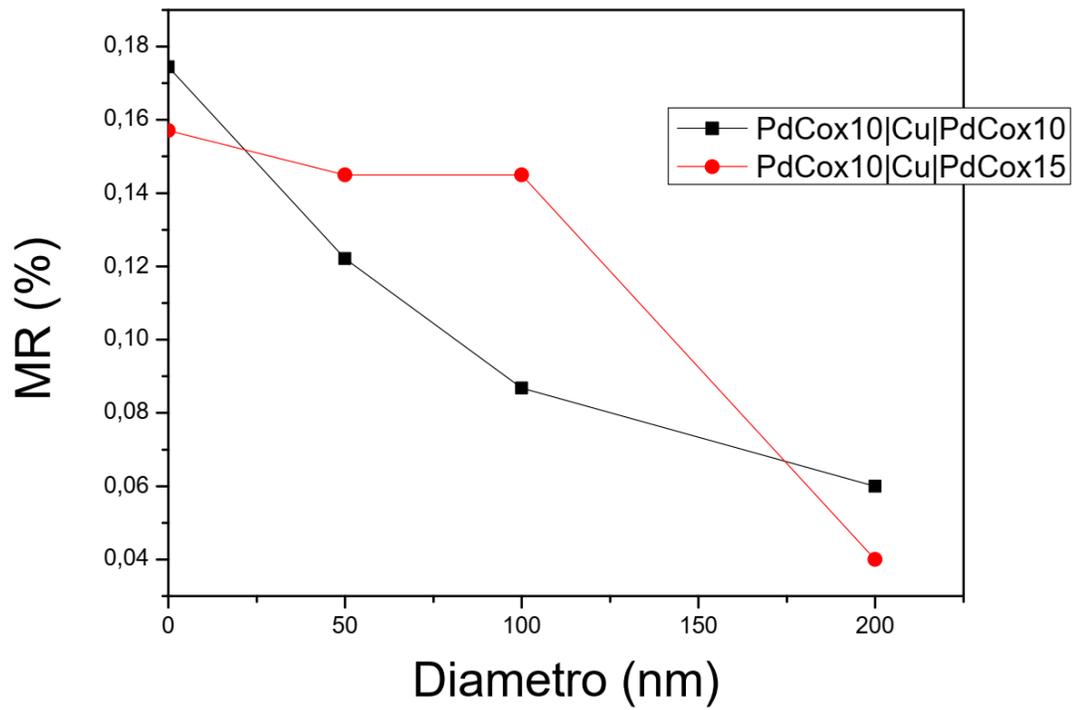


Figura 4.20: representación magnetorresistencia obtenida versus diámetro de domos, para ambas PVE.

Se observa del gráfico que los mayores valores de MR para los domos de 50 y 100 nm son para la PVE $PdCo_{10}|Cu|PdCo_{x15}$.

4.3.3 Efecto Hall

Se muestra a continuación en la figura 4.21 las curvas obtenidas de la medición de efecto Hall para la configuración PVE $PdCo_{x10}|Cu|PdCo_{x10}$

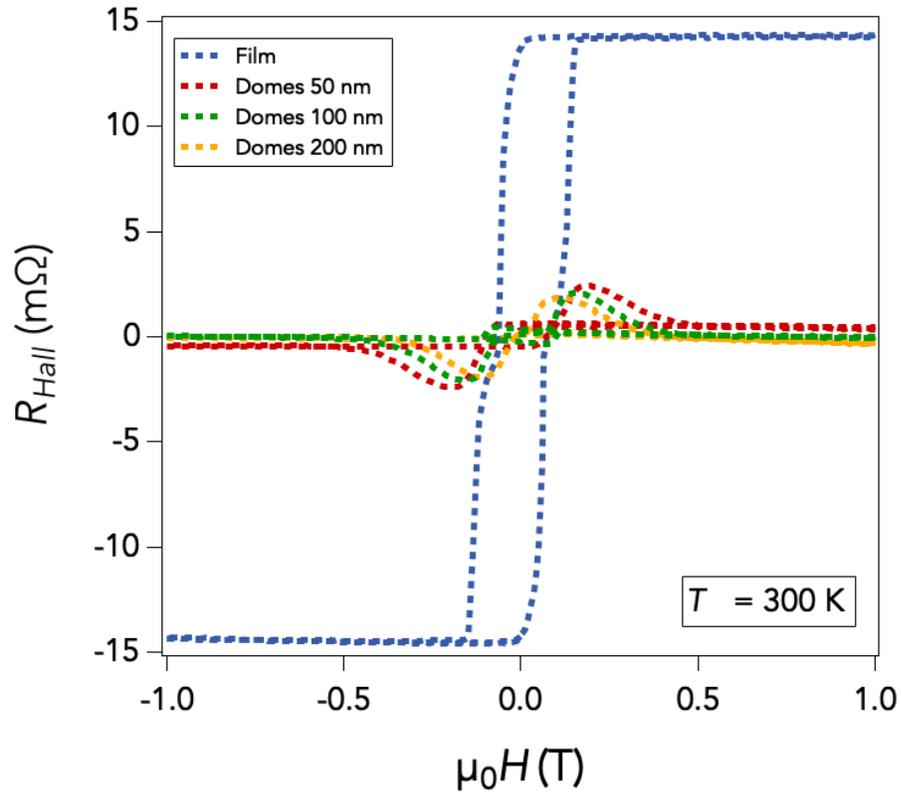


Figura 4.21: Grafico de efecto Hall para la PVE $PdCo_{x10}|Cu|PdCo_{x10}$ para el campo aplicado perpendicular al plano

Se observa de la figura 4.21 que los valores de resistencia Hall para las PVE depositadas sobre domos tienen un valor inmensamente inferior en comparación a la medida obtenida para la PVE $Pd_{x10}|Cu|PdCo_{x10}$ sobre vidrio.

Se muestran a continuación las mediciones de efecto Hall para la configuración $PdCo_{x10}|Cu|PdCo_{x15}$

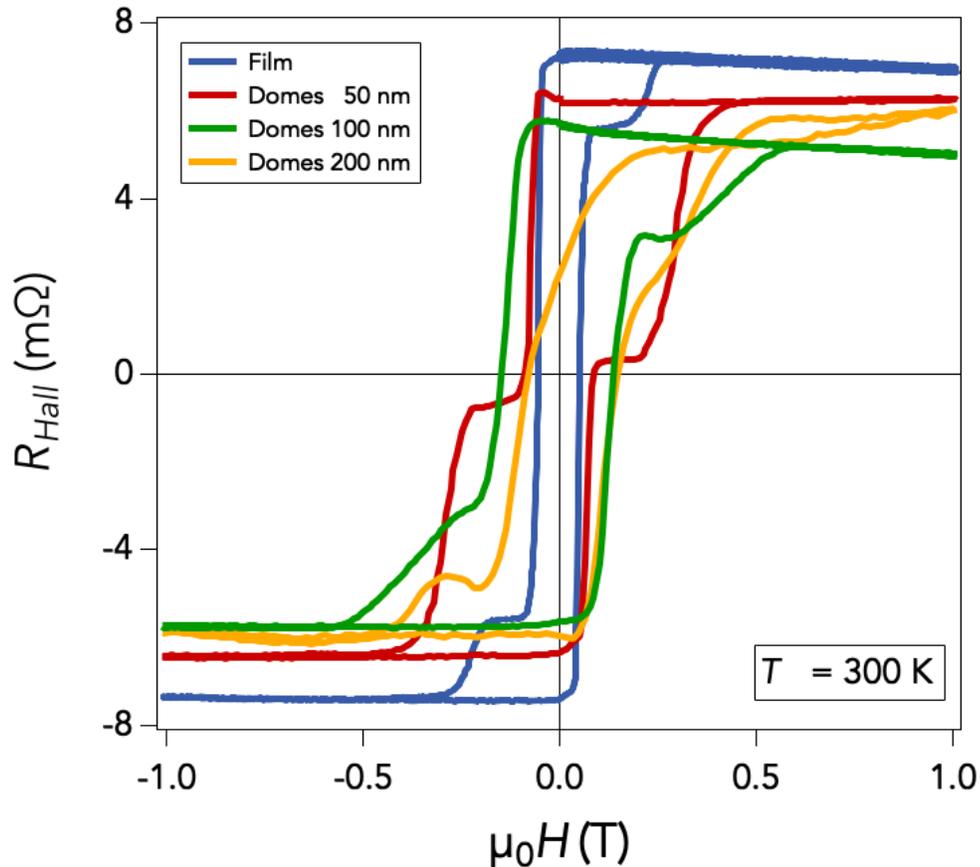


Figura 4.22: efecto Hall para la PVE $PdCo_{x10}|Cu|PdCo_{x15}$ para el campo aplicado perpendicular al plano.

Se observa de la figura 4.22 que la resistencia de Hall disminuye a medida que aumenta el tamaño del domo. Se puede asociar esta disminución en la resistencia Hall a que en los bordes del domo se generan zonas de dispersión que a medida que se aumenta el tamaño del domo son más escasas, reduciendo así la probabilidad de que un electrón se encuentre con ellos, produciendo una disminución en la resistencia.

Como el efecto Hall Anómalo es proporcional a la magnetización de la muestra (ecuación 1.9), se observa que para la PVE plana existen dos transiciones tipo escalón bien definidas de la misma forma como fue observado en las curvas de magnetización. Además, al depositar la PVE sobre domos de 50 nm se produce un aumento en el campo coercitivo de la muestra, manteniendo una transición bien definida entre la capa dura y blanda de la muestra. Este aumento se asocia a la pérdida de anisotropía perpendicular inducida por el domo. Para la PVE depositada sobre domos de tamaño 100 nm se puede apreciar que la transición tipo escalón se suaviza, y que la región de campo coercitivo de la capa dura es similar al de la muestra de domos de 50 nm. Por último, se observa

que para la PVE de 200 nm se pierde la transición entre los dos sistemas ferromagnéticos.

Se observa también que para las medidas obtenidas para domos de 100 y 200 nm una asimetría del escalón que separa los dos sistemas magnéticos, esta diferencia se asocia a que existe un desalineamiento de los contactos de la muestra a nivel macroscópico, lo que provoca que mientras se mide efecto Hall exista una componente (longitudinal) de magnetorresistencia.

5 Conclusiones y perspectivas

En conclusión, se logró fabricar Pseudo Válvulas de espín de Pd/Co con anisotropía magnética perpendicular sobre sustratos de domos de alúmina, donde se utilizaron diferentes arreglos de domos con distintos diámetros buscando un mayor campo coercitivo. Este efecto se logra al depositar la PVE sobre un arreglo de domos de 50 nm. Se logra observar que las curvas de magnetización y efecto Hall coinciden con los máximos entregados por la medida de magnetorresistencia, obteniendo estados de resistencia alta y baja, donde el primero corresponde cuando los momentos de ambas capas ferromagnéticas de la PVE se encuentran en una orientación paralela, y el segundo corresponde cuando la orientación de las capas ferromagnéticas es antiparalela.

Además, se logra apreciar que al depositar la PVE sobre un sustrato de domos de 50 nm, el valor de campo coercitivo aumenta, lo cual se ve reflejado en la curva de magnetorresistencia aumentando la región de campo donde se produce el estado de máxima resistencia. Por lo tanto, se proponen estas estructuras para ser utilizadas en aplicaciones como sensores magnéticos (Fang et al.,2012), o memorias magnéticas de acceso aleatoria (MRAMs) (Thiyagarajh et al, 2009)

Con respecto a las perspectivas de trabajo, se propone la fabricación de sustratos de domos menores a 50 nm, de manera de lograr una mejor región de campo para el estado de máxima resistencia, además se propone buscar la configuración óptima para la PVE que logre aumentar el campo coercitivo en la curva de magnetización y la región de campo del estado de máxima resistencia, al ser depositadas sobre un diámetro de domos fijo (mayor a 50 nm).

Bibliografía

Araneda, F. (2016). Síntesis y caracterización magnetoeléctrica de pseudo válvula de espín de Pd/Co con anisotropía magnética perpendicular.

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.

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.

Bretislav .H and Bland, J. (2005). *Ultrathin Magnetic Structures IV Applications of Nanomagnetism*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Tiergartenstraße 17, 69121 Heidelberg, Alemania.

Callister, W. D., (2009) *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Utah, Estados Unidos. Editorial: Wiley.

Coey, J. (2010). *Magnetism and Magnetic Materials*. Cambridge University Press, The Edinburgh Building, Cambridge CB2 8RU, United Kingdom

Diggle, J. W., Downie, T. C., & Goulding, C. W. (1969). Anodic oxide films on aluminum. *Chemical Reviews*, 365-405.

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.

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.

Hass, G. (1949). On the Preparation of Hard Oxide Films with Precisely Controlled Thickness on Evaporated Aluminum Mirrors. *Journal of the Optical Society of America*, 39, 532-540.

J.Ramsden, Essentials of nanotechnology, Jeremy Ramsden & Ventus Publishing ApS bookboon.com,2009

Keller, F., Hunter, M. S., & Robinson, D. L. (1953). Structural Features of Oxide Coatings on Aluminum. *J. Electrochem. Soc*, 100, 411-419

Liu, X. M., Ho, P., Chen, J. S., y Adeyeye, A. O. (2012). Magnetization reversal and magnetoresistance behavior of perpendicularly magnetized [Co/Pd]₄/Au/[Co/Pd]₂ nanowires. *Journal of Applied Physics*. 112, 073902

L. Piraux, V. A. Antohe, F. Abreu Araujo, S. K. Srivastava, M. Hehn, D. Lacour, S. Mangin, and T. Hauet, "Periodic arrays of magnetic nanostructures by depositing Co/Pt multilayers on the barrier layer of ordered anodic alumina templates," *Appl. Phys. Lett.* **101**, 013110 (2012).

Masuda, H., & Fukuda, K. (1995). Ordered metal nanohole arrays made by a two-step replication of honeycomb structures of anodic alumina. *Science*, 268, 1466-1468.

Masuda, H., & Fukuda, K. (1995). Ordered metal nanohole arrays made by a two-step replication of honeycomb structures of anodic alumina. *Science*, 268, 1466-1468.

Masuda, H., Yoda, K., & Osaka, O. (1998). (Masuda, Yoda, & Osaka, Self-Ordering of Cell Configuration of Anodic Porous Alumina with Large-Size Pores in Phosphoric Acid Solution. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 37

Michea, S., Oyarzún, S., Vidal, S., & Denardin J.C. (2017). Enhanced Hall effect in Co/Pd multilayered nanodomes with perpendicular anisotropy. *AIP Advances* 7(5), 056310. <https://doi.org/10.1063/1.4975489>

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*.

Oyarzun, S.M. (2010). Magnetorresistencia en películas de oro depositadas sobre mica, con el campo eléctrico ortogonal al campo magnético, ambos contenidos en el plano de la película. *Universidad de Chile, Tesis de Magister*

Palma, J. L. (2012). Influencia de la geometría sobre las propiedades magnéticas en nanoestructuras con orden hexagonal: antidots y nanodornos. *Universidad de Santiago de Chile, Tesis Doctoral*.

Setoh, s., & Miyata, A. (1932). Researches on the anodic film of aluminum. II. Anodic behaviors of aluminum in aqueous solns. of oxalic acid. *Sci. Pap. Inst. Phys. Chem. Res.* 17, 411.

Spaldin, N. (2011). *Magnetic Materials: Fundamentals and Applications*. Cambridge University Press.

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-spinvalves with perpendicular anisotropy. *Journal of Applied Physics.* 104, 113906.

Thiyagarajah, N., Joo, H. W., y Bae, S. (2009) High magnetic and thermal stability of nanopatterned [Co/Pd] based pseudo spin-valves with perpendicular anisotropic for 1Gb magnetic random Access memory applications. *Applied Physics Letters*, 95, 232513

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.

Vega, F.A. (2019). Diseño y puesta a punto de un sistema de multi-anodización y electrodeposición de metales para sintetizar nanoalambres modulados multisegmentados. *Universidad de Santiago de Chile. Tesis pregrado*

W. Kang et al., "An overview of spin-based integrated circuits," in Proceedings of 19th Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC), Singapore, Jan. 20-24, 2014, pp. 676-683.

X. Zhang Exploring potentials of perpendicular magnetic anisotropy STT-MRAM for cache design, 2014 12th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT), doi:10.1109/ICSICT.2014.7021342.

Anexos o Apéndices

Otros sustratos de domos fabricados

Voltaje	Diámetro esperado	Diámetro promedio	electrolito
120	300	277.7	$H_2C_2O_4$
140	350	305.9	$H_2C_2O_4$
180	450	513.0	H_3PO_4

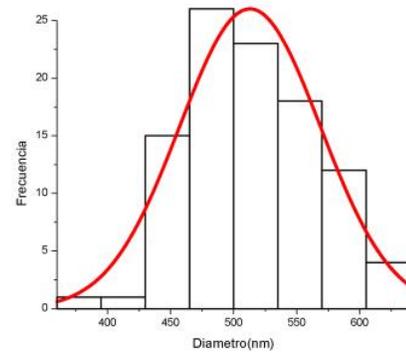
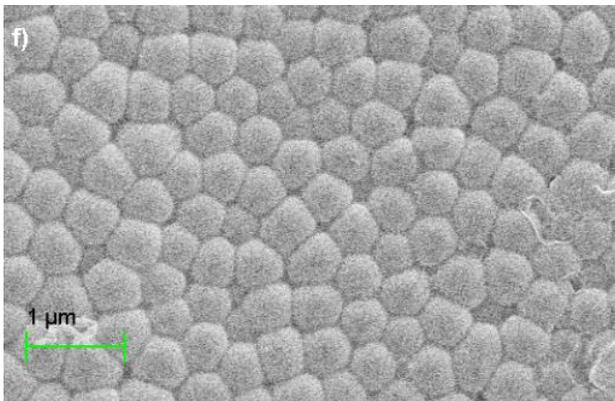
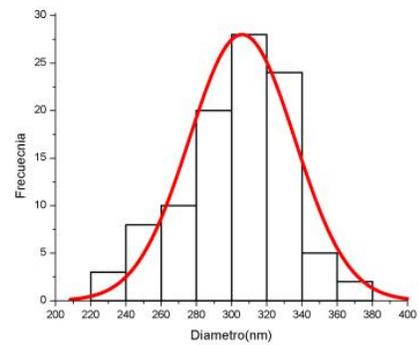
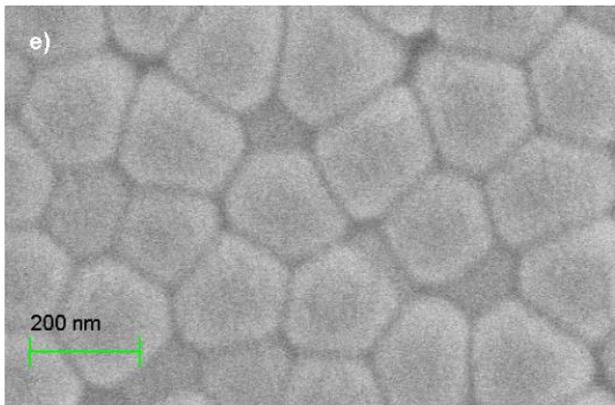
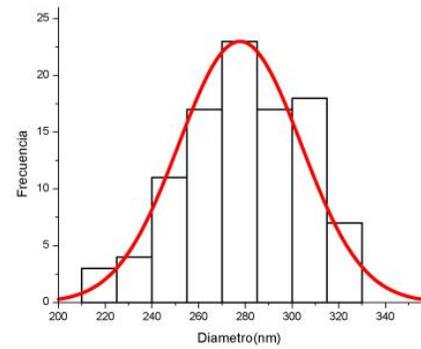
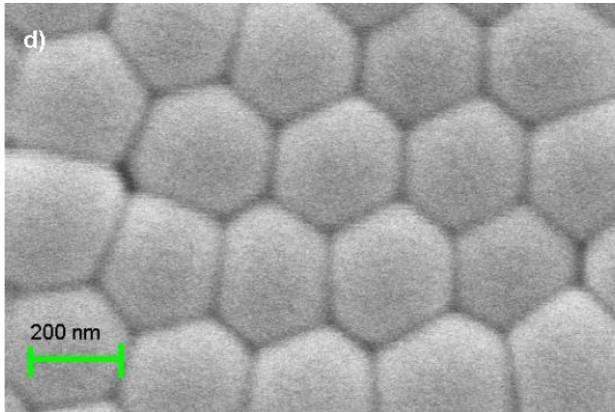


Figura A: Imágenes SEM para los distintos sustratos de domos de alúmina obtenidos donde: a) anodización :120 V, b) 140 V, c) 180V

