



**Universidad Nacional Mayor de San Marcos**

**Universidad del Perú. Decana de América**

**Facultad de Ciencias Físicas**

**Unidad de Posgrado**

**Modelaje de las propiedades estáticas y dinámicas de  
multicapas magnéticas: aplicación a sistemas reales**

**TESIS**

Para optar el Grado Académico de Magíster en Física con  
mención en Física del Estado Sólido

**AUTOR**

Heisemberg Samuel TARAZONA CORONEL

**ASESOR**

Carlos LANDAURO SÁENZ

Lima, Perú

2018

# Resumen

En este trabajo de tesis se plantea un método fenomenológico-numérico para la simulación de propiedades magnéticas, estáticas y dinámicas de multicapas magnéticas. Este método se aplica al estudio de cuatro sistemas multicapas reales: la válvula de espín IrMn/Co/Ru( $t_{Ru}$ )/NiFe para tres espesores de la capa de Ru ( $t_{Ru} = 3.6, 4.2, 20\text{nm}$ ), la válvula de espín IrMn/NiFe/Ru( $t_{Ru}$ )/Co para espesores en el rango  $6\text{Å} < t_{Ru} < 22\text{Å}$  y dos familias de multicapas periódicas de Co/Au: [Co( $t$ )/Au( $20\text{Å}$ )]<sub>20</sub> y [Co( $t$ )/Au( $30\text{Å}$ )]<sub>20</sub> para diferentes espesores  $t$  de la capa de Co. Se utiliza una teoría fenomenológica que se basa en el uso de la energía libre de Helmholtz para describir el comportamiento de una multicapa magnética. Se implementa un método numérico basado en el gradiente conjugado el cual se aplica para minimizar la energía libre y encontrar las posiciones de equilibrio de las magnetizaciones. Gracias a estos resultados, con las posiciones de equilibrio, se simulan las propiedades estáticas de magnetización y de magnetorresistencia. Asimismo, para la simulación de las propiedades dinámicas se utiliza la relación de dispersión de la resonancia ferromagnética que resulta de resolver la ecuación de Landau-Lifshitz, el cual rige la dinámica de las magnetizaciones. Los resultados indican que las curvas simuladas de magnetización y magnetorresistencia correspondientes al sistema IrMn/Co/Ru( $t_{Ru}$ )/NiFe están en buen acuerdo con trabajos netamente experimentales publicados en la literatura. Asimismo la simulación del sistema IrMn/NiFe/Ru( $t_{Ru}$ )/Co indica que el modelo del macro espín es insuficiente para modelar las partes redondeadas de las curvas de magnetización y resulta necesario considerar un término de anisotropía rotacional. Como método alternativo se implementó un modelo policristalino en el que se considera granos FM/AF acoplados verticalmente pero sin interactuar con granos adyacentes. Se realiza una distribución gaussiana de los ejes uniaxiales de cada grano alrededor del eje de *exchange bias*. Los resultados indican un buen acuerdo entre el modelo policristalino y los datos experimentales.

En el caso de las dos familias de multicapas periódicas de Co/Au los resultados indican que la transición de reorientación de espín (TRS) ocurre en el rango de espesores  $6\text{Å} < t_{Co} < 10\text{Å}$ , el cual corresponde a la región del espacio de fases de las constantes de anisotropía donde  $K_2 \leq -1/2K_{1,eff}$  y ( $K_{1,eff} > 0$ ), indicando así la coexistencia de dominios magnéticos con anisotropía perpendicular y paralela al plano de las multicapas.

# Abstract

In this work a phenomenological-numerical method for the simulation of magnetic static and dynamic properties of magnetic multilayers is proposed. This method is applied to the study of four real multilayer systems: the IrMn/Co/Ru( $t_{Ru}$ )/NiFe spin valve for three different Ru thicknesses ( $t_{Ru} = 3.6, 4.2, 20$  nm), the IrMn/NiFe/Ru( $t_{Ru}$ )/Co spin valve for Ru thicknesses in the range  $6 \text{ \AA} < t_{Ru} < 22 \text{ \AA}$  and two multilayer families of Co/Au: [Co ( $t$ )/Au(20 \AA)]<sub>20</sub> and [Co ( $t$ ) / Au (30 \AA)]<sub>20</sub> for different thicknesses  $t$  of Co layer. A phenomenological theory based on the Helmholtz free energy is used to describe the behavior of the magnetic multilayers. For this proposal a numerical method based on the conjugate gradient is implemented, which is applied to minimize the free energy and so as to find the equilibrium positions of the magnetizations. Thanks to these results, with the equilibrium positions, the static properties like magnetization and magnetoresistance are simulated. Likewise, since the magnetization is governed by the Landau-Lifshitz equation, magnetic properties like ferromagnetic resonance are studied using the dispersion relation. The results indicate that the simulated magnetization and magnetoresistance curves corresponding to the IrMn / Co / Ru ( $t_{Ru}$ ) / NiFe system are in good agreement with experimental works published in the literature.

On the other hand, the simulation of the IrMn/NiFe/Ru( $t_{Ru}$ )/Co system indicates that the macrospin model is insufficient to mimic the rounded shape of the hysteresis loops so it is necessary to consider an additional term, the rotational anisotropy. As an alternative method, a polycrystalline model is implemented in which FM/AF coupled grains but without interaction with adjacent grains are considered. A Gaussian distribution of the uniaxial axes of each grain around the *exchange bias* axis is made. The results indicate a good agreement between the polycrystalline model and the experimental data.

In the case of the two families of Co / Au periodic multilayers, the results indicate that the transition of reorientation of spin (TRS) occurs in the range of thickness  $6 \text{ \AA} < t_{Co} < 10 \text{ \AA}$ , which corresponds to the phase space region of the anisotropy constants where  $K_2 \leq -1/2K_{1,eff}$  and ( $K_{1,eff} > 0$ ); thus, indicating the coexistence of magnetic domains with out-of-plane and in-plane anisotropy.