

Influencia del espesor y de la
morfología de películas Ferritas en
la respuesta magneto- óptica
superficial a partir del efecto Kerr

Carlos Andrés Calle Gil

Maestría en Ciencias de los Materiales

Director: Octavio Guzmán

Codirector: Hernando Ariza

Laboratorio de Materiales Magnéticos y Nanoestructuras
Instituto Interdisciplinario de las Ciencias



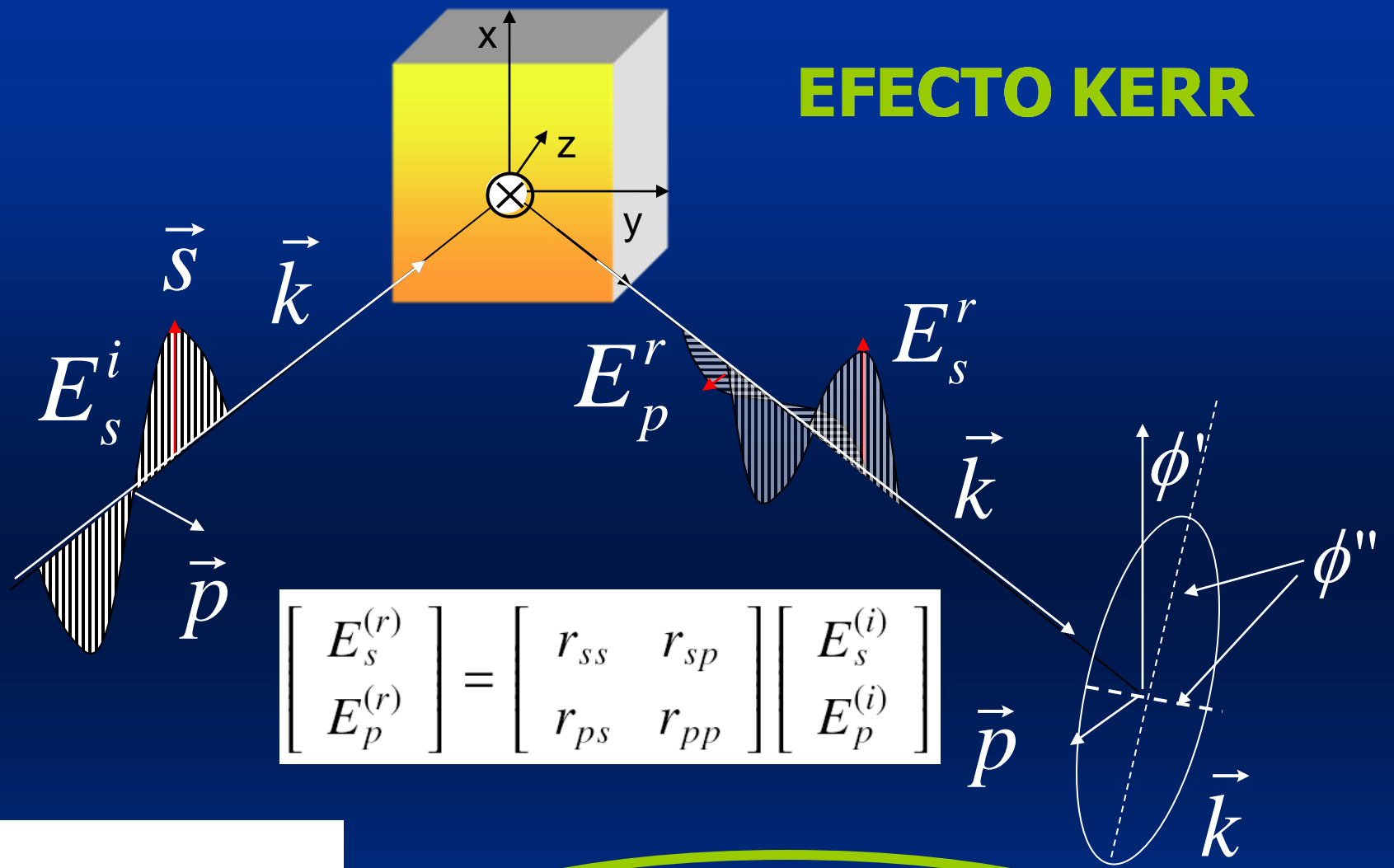
CONTENIDO

- 1. Introducción: El efecto Kerr**
- 2. Señal Magneto-óptica (efecto del espesor). Modelo y resultados**
- 3. La curva de histéresis (efecto de la morfología). Modelo y resultados**
- 4. Resultados adicionales:
Desarrollo experimental**
- 5. Conclusiones**
- 6. Perspectivas y Publicaciones**



1. Introducción: El efecto Kerr

EFEECTO KERR



$$\begin{bmatrix} E_s^{(r)} \\ E_p^{(r)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{ss} & r_{sp} \\ r_{ps} & r_{pp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_s^{(i)} \\ E_p^{(i)} \end{bmatrix}$$

$$\frac{r_{ps}}{r_{ss}} = \phi' + i\phi''$$

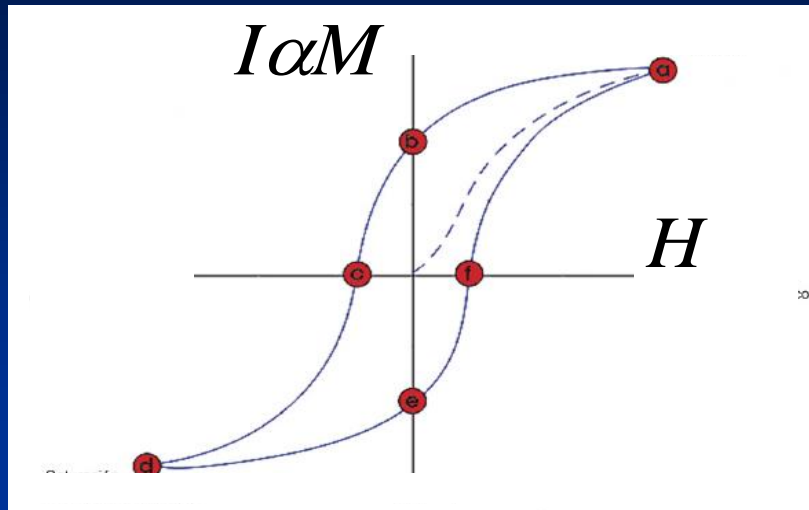
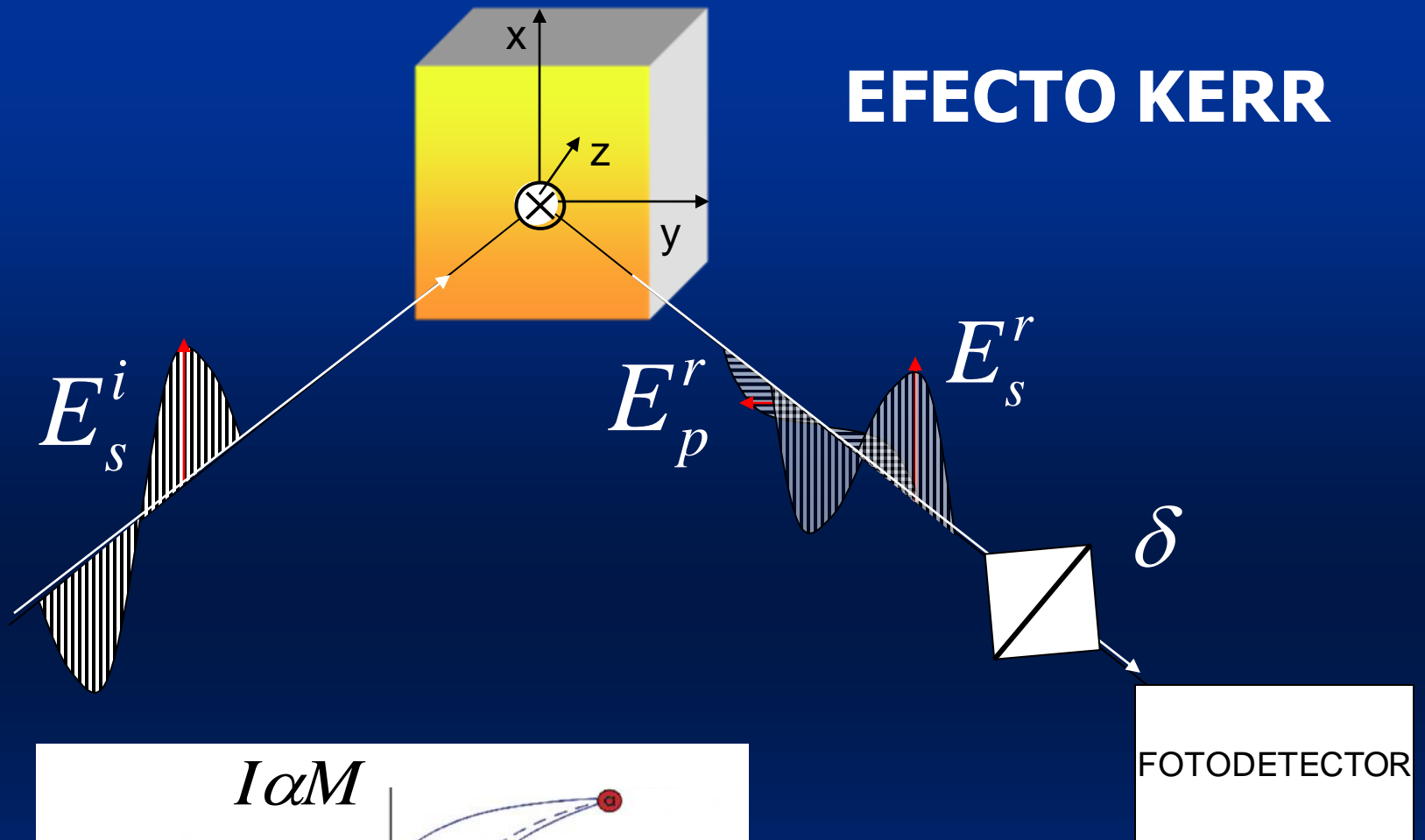
$$\phi', \phi'' \propto M$$

Óptico

Magnético

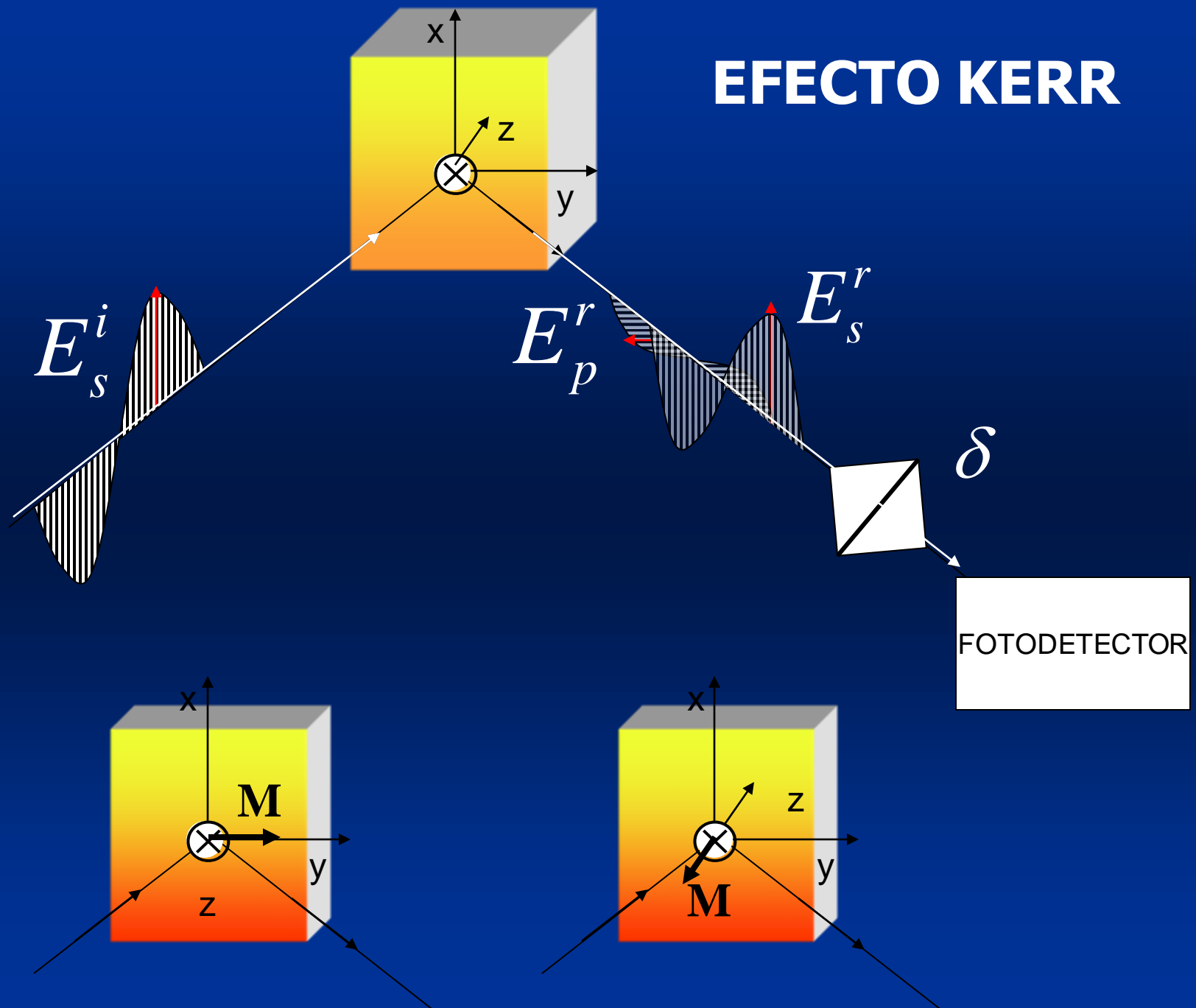


EFEECTO KERR

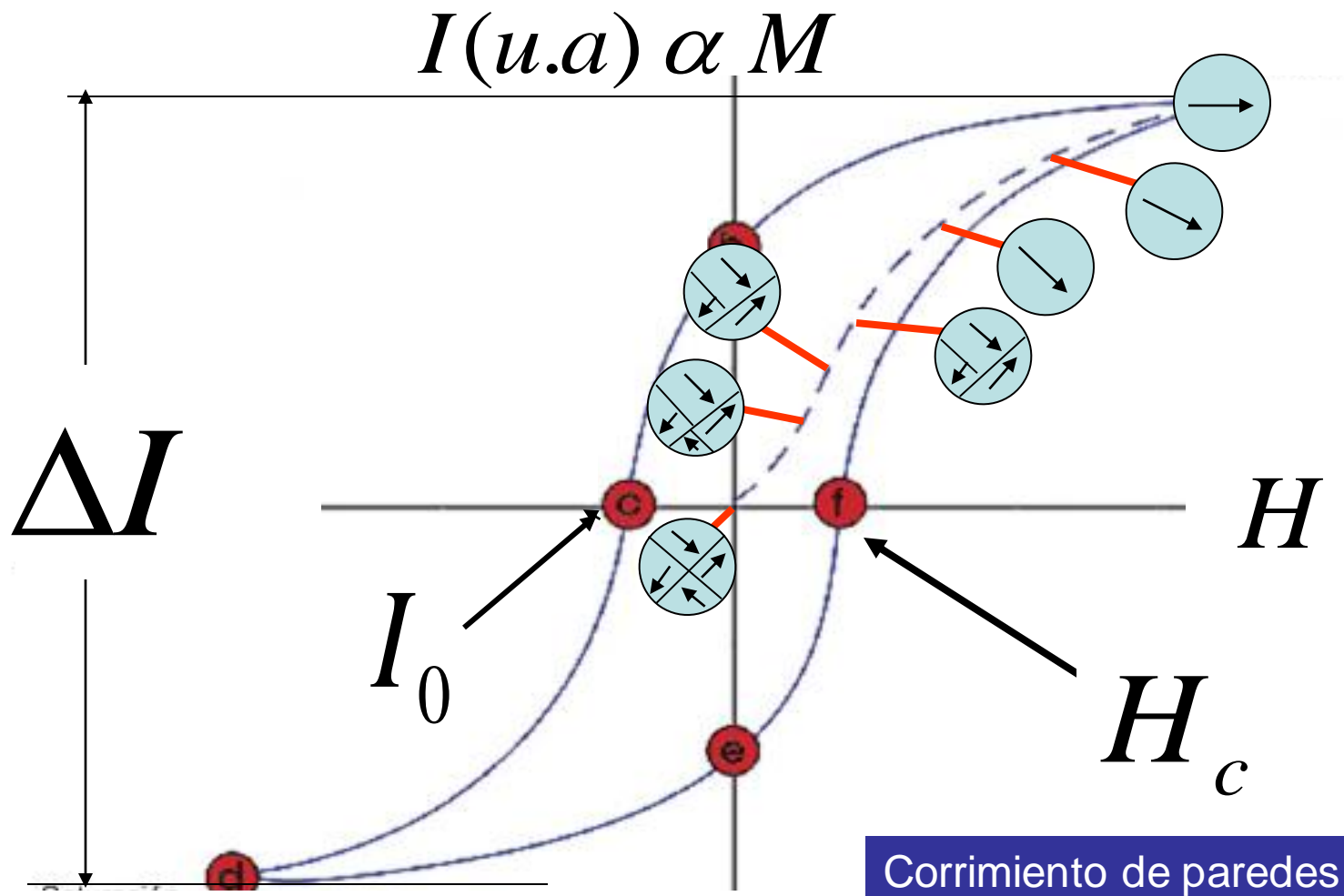


$$I = I_0 \left(1 + \frac{2\phi'}{\delta} \right)$$

EFEECTO KERR



CURVA DE HISTERESIS





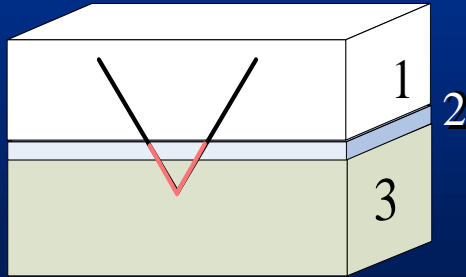
2. Señal magneto- óptica

Efecto de la estructura

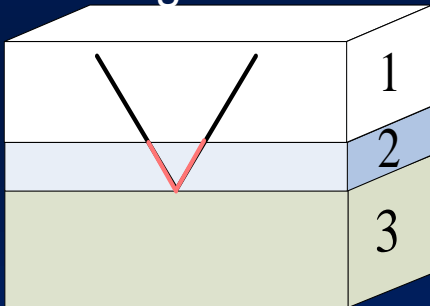
**Teoría, modelamiento
y resultados.**

SEÑAL KERR Vs ESPESOR

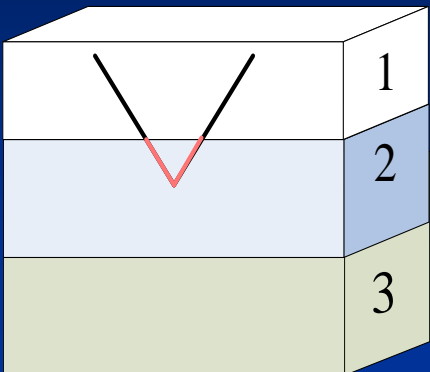
Régimen 1:



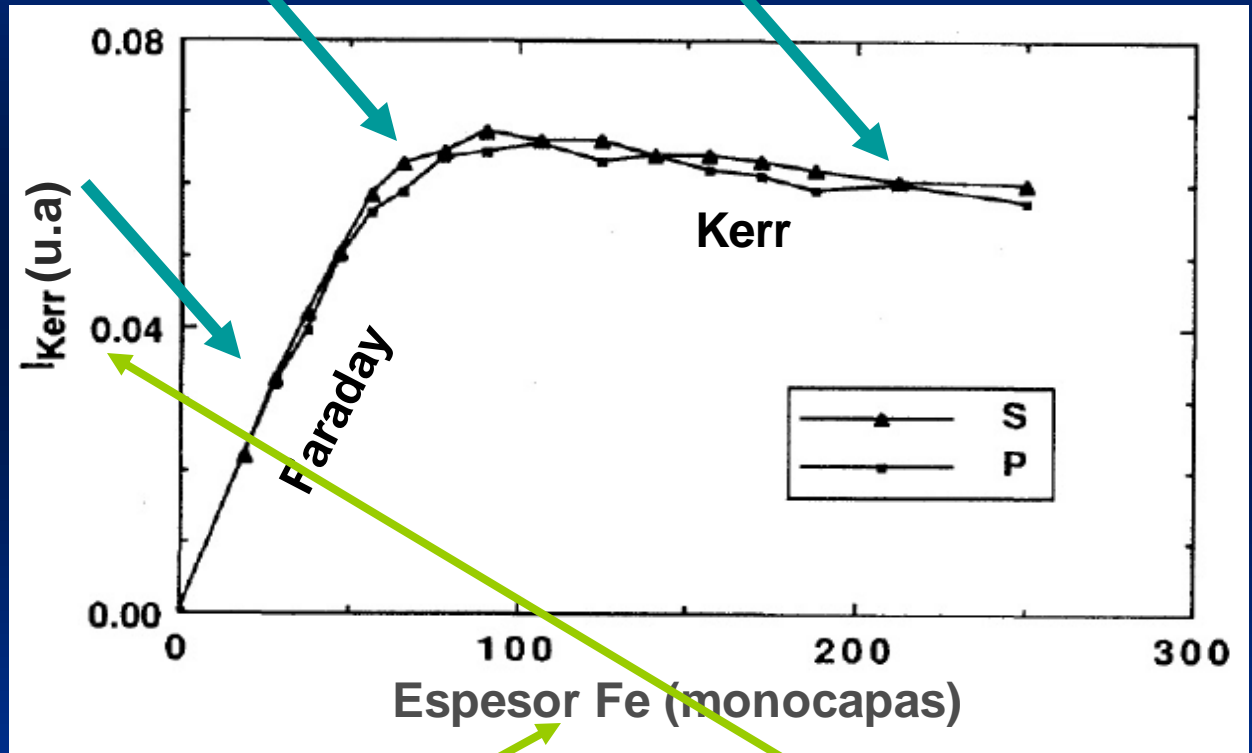
Régimen 2:



Régimen 3:



$$I_{\text{kerr}} = \sqrt{\phi'^2 + \phi''^2} = \frac{\delta}{4} \frac{\Delta I}{I_0}$$



E. R. Moog *et al*, Phys. Rev. B. **39** (1989) 6949.

El espesor influye sobre la respuesta magnética

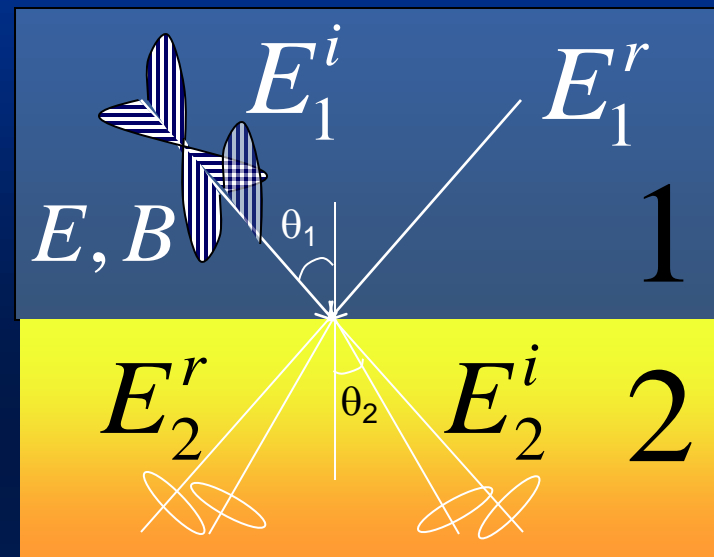
ONDA ELECTROMAGNETICA EN UN MEDIO MAGNETICO

$$D = \varepsilon E + i\varepsilon E \times Q \quad \text{Vector de Voigt}$$

Respuesta magnética
del medio

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ H_x \\ H_y \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} E_s^{(i)} \\ E_p^{(i)} \\ E_s^{(r)} \\ E_p^{(r)} \end{pmatrix}$$

En cualquier punto



$$A_2^{(LON)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ -\frac{i}{2} \frac{\alpha_y}{\alpha_z} (1 + \alpha_z^2) Q & \alpha_z & \frac{i}{2} \frac{\alpha_y}{\alpha_z} (1 + \alpha_z^2) Q & -\alpha_z \\ \frac{i}{2} \alpha_y Q N & -N & \frac{i}{2} \alpha_y Q N & -N \\ \alpha_z N & \frac{i}{2} \frac{\alpha_y}{\alpha_z} Q N & -\alpha_z N & -\frac{i}{2} \frac{\alpha_y}{\alpha_z} Q N \end{pmatrix}$$

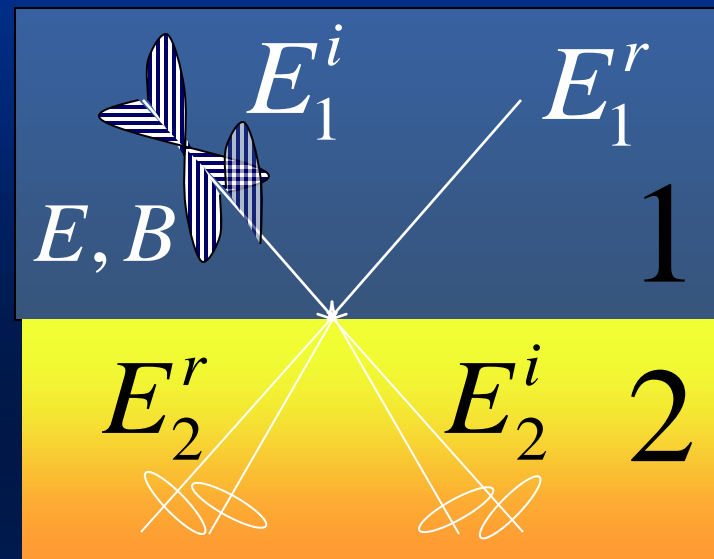
ONDA ELECTROMAGNETICA DOS MEDIOS

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ H_x \\ H_y \end{pmatrix}_{(1)} = A_1 \begin{pmatrix} E_s^i \\ E_p^i \\ E_s^r \\ E_p^r \end{pmatrix}_{(1)}$$



Matriz de reflexión

$$\begin{pmatrix} E_s^r \\ E_p^r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{ss} & r_{sp} \\ r_{ps} & r_{pp} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_s^i \\ E_p^i \end{pmatrix}$$



Condiciones de frontera

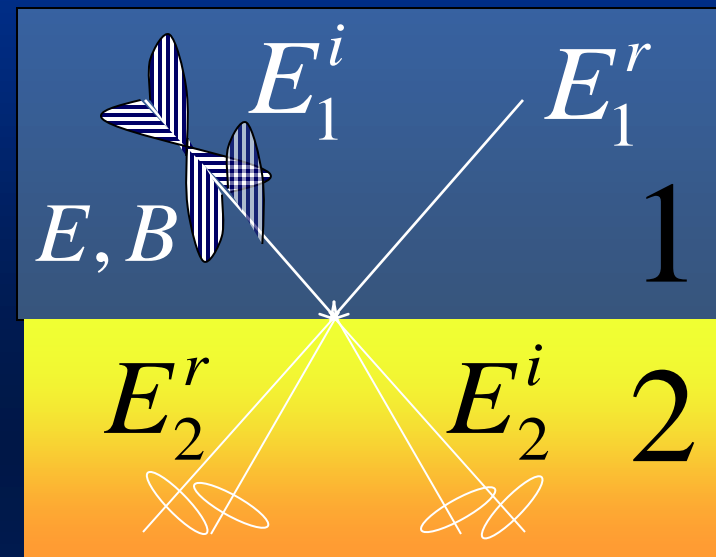
$$A_1 \begin{pmatrix} E_s^i \\ E_p^i \\ E_s^r \\ E_p^r \end{pmatrix}_{(1)} = A_2 \begin{pmatrix} E_s^i \\ E_p^i \\ E_s^r \\ E_p^r \end{pmatrix}_{(2)}$$



$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ H_x \\ H_y \end{pmatrix}_{(2)} = A_2 \begin{pmatrix} E_s^i \\ E_p^i \\ E_s^r \\ E_p^r \end{pmatrix}_{(2)}$$

ONDA ELECTROMAGNETICA DOS MEDIOS

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ H_x \\ H_y \end{pmatrix}_{(1)} = A_1 \begin{pmatrix} E_s^i \\ E_p^i \\ E_s^r \\ E_p^r \end{pmatrix}_{(1)}$$



$$\frac{r_{sp}}{r_{pp}} = \phi' + i\phi''$$

Condiciones de frontera

$$A_1 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ r_{ss} \\ r_{ps} \end{pmatrix}_{(1)} = A_2 \begin{pmatrix} t_{ss} \\ t_{ps} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}_{(2)}$$



$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ H_x \\ H_y \end{pmatrix}_{(2)} = A_2 \begin{pmatrix} E_s^i \\ E_p^i \\ E_s^r \\ E_p^r \end{pmatrix}_{(2)}$$

ONDA ELECTROMAGNETICA DOS MEDIOS

$$A_2^{(LON)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ -\frac{i}{2} \frac{\alpha_y}{\alpha_z} (1 + \alpha_z^2) Q & \alpha_z & \frac{i}{2} \frac{\alpha_y}{\alpha_z} (1 + \alpha_z^2) Q & -\alpha_z \\ \frac{i}{2} \alpha_y Q N & -N & \frac{i}{2} \alpha_y Q N & -N \\ \alpha_z N & \frac{i}{2} \frac{\alpha_y}{\alpha_z} Q N & -\alpha_z N & -\frac{i}{2} \frac{\alpha_y}{\alpha_z} Q N \end{pmatrix}$$

$$\frac{r_{sp}}{r_{pp}} = \phi' + i\phi''$$

$$A_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \alpha_{1z} & 0 & -\alpha_{1z} \\ 0 & -N_1 & 0 & -N_1 \\ \alpha_{1z} N_1 & 0 & -\alpha_{1z} N_1 & 0 \end{pmatrix}$$

Condiciones de frontera

$$A_1 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ r_{ss} \\ r_{ps} \end{pmatrix}_{(1)} = A_2 \begin{pmatrix} t_{ss} \\ t_{ps} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}_{(2)}$$

$$I_{\text{kerr}} = \sqrt{\phi'^2 + \phi''^2} = \frac{\delta}{4} \frac{\Delta I}{I_0}$$

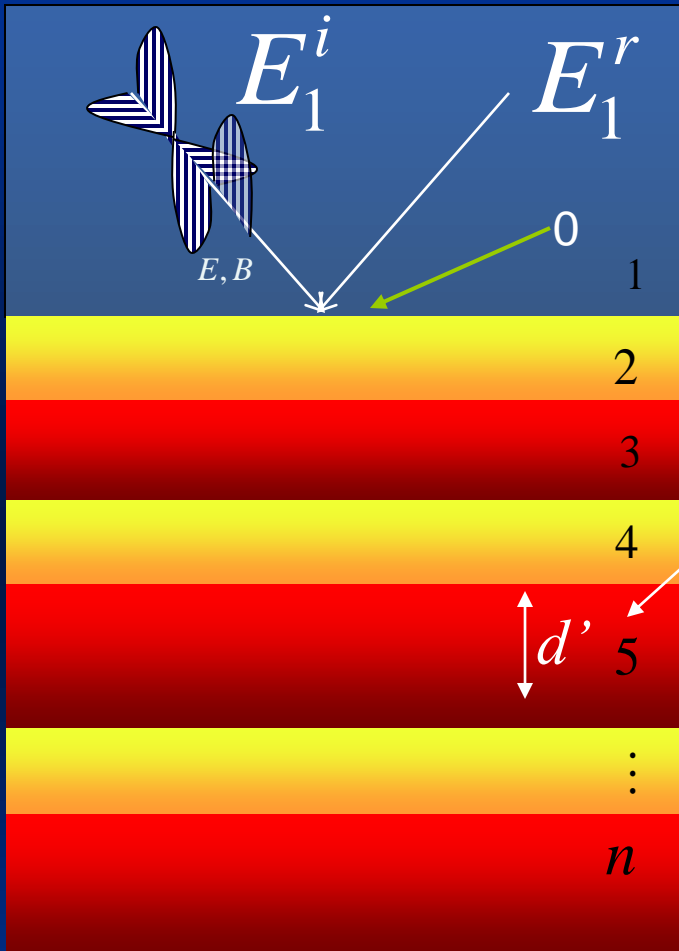
PRIMEROS RESULTADOS

Desarrollo del modelo generalizado

Desarrollo de programa

Verificación

GENERALIZACIÓN AL CASO DE MULTICAPAS



$$(E)_{(j)}(\text{frontera}) = \bar{D}_j (E)_{(j)}(d')$$

$$(E)_{(1)} = A_1^{-1} \prod_{m=2}^{n-1} (A_m \bar{D}_m A_m^{-1}) A_n (E)_{(n)}$$

$$\frac{r_{sp}}{r_{pp}} = \phi' + i\phi''$$

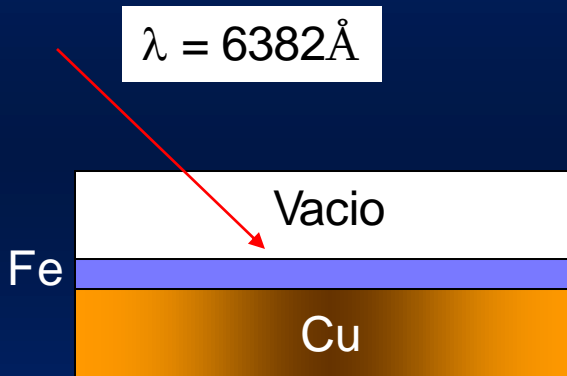
CONTIENE LA INFORMACIÓN DE
LOS ESPESORES Y
COMPOSICIÓN DE CADA CAPA

CREACION DEL PROGRAMA

EJEMPLO: 3 MEDIOS

$$(E)_{(1)} = A_1^{-1} \prod_{m=2}^{n-1} (A_m \bar{D}_m A_m^{-1}) A_n (E)_{(n)}$$

$$\bar{D} = \begin{pmatrix} U \cos \sigma & U \sin \sigma & 0 & 0 \\ -U \sin \sigma & U \cos \sigma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & U \cos \sigma & -U^{-1} \sin \sigma \\ 0 & 0 & U \sin \sigma & U \cos \sigma \end{pmatrix}$$



$$\sigma = \frac{\pi d}{\lambda} Q$$

$$U = e^{-i \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) d N \sin \theta_2}$$

**CONTIENE LA INFORMACIÓN DE
LOS ESPESORES Y
COMPOSICIÓN DE CADA CAPA**

Índices de refracción N :

$$\text{Fe: } \Re(N) = 2,87 \quad \Im(N) = 3,36$$

$$\text{Cu: } \Re(N) = 0,249 \quad \Im(N) = 3,41$$

Constante magneto-óptica Q :

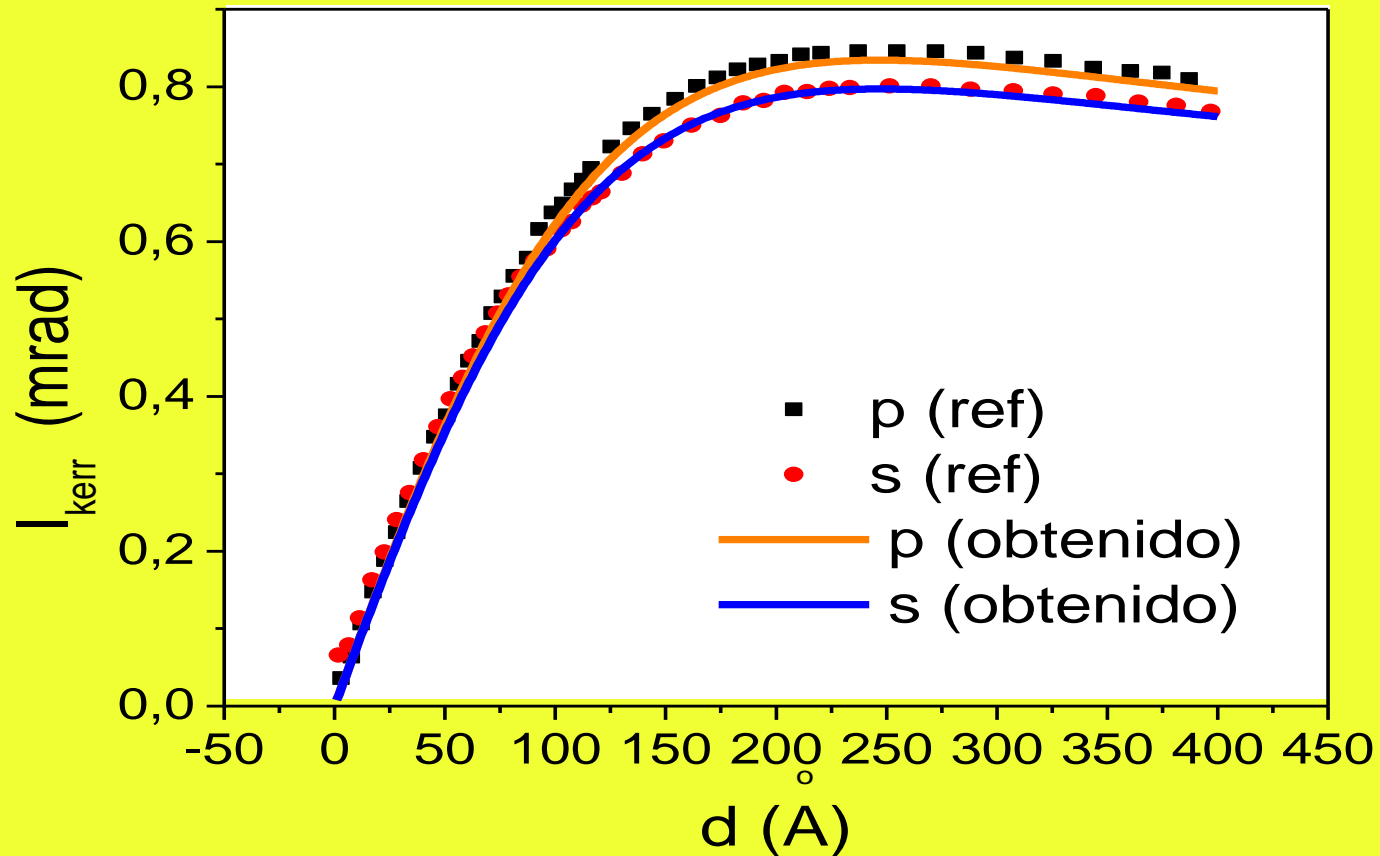
$$Q_{Fe} : \Re(Q) = 0,0376 \quad \Im(Q) = 0,0066$$

$$\frac{r_{sp}}{r_{pp}} = \phi' + i\phi''$$



$$I_{\text{kerr}} = \sqrt{\phi'^2 + \phi''^2}$$

KERR LONGITUDINAL




LA EVALUACION DE LA SEÑAL MAGNETO-OPTICA PERMITE OBTENER:

- El espesor de películas delgadas con Q y N conocidos.

- Si conoce el espesor puede caracterizar un material hallando Q y N .

- ✓ • Se puede evaluar el efecto del espesor sobre la respuesta magnética.

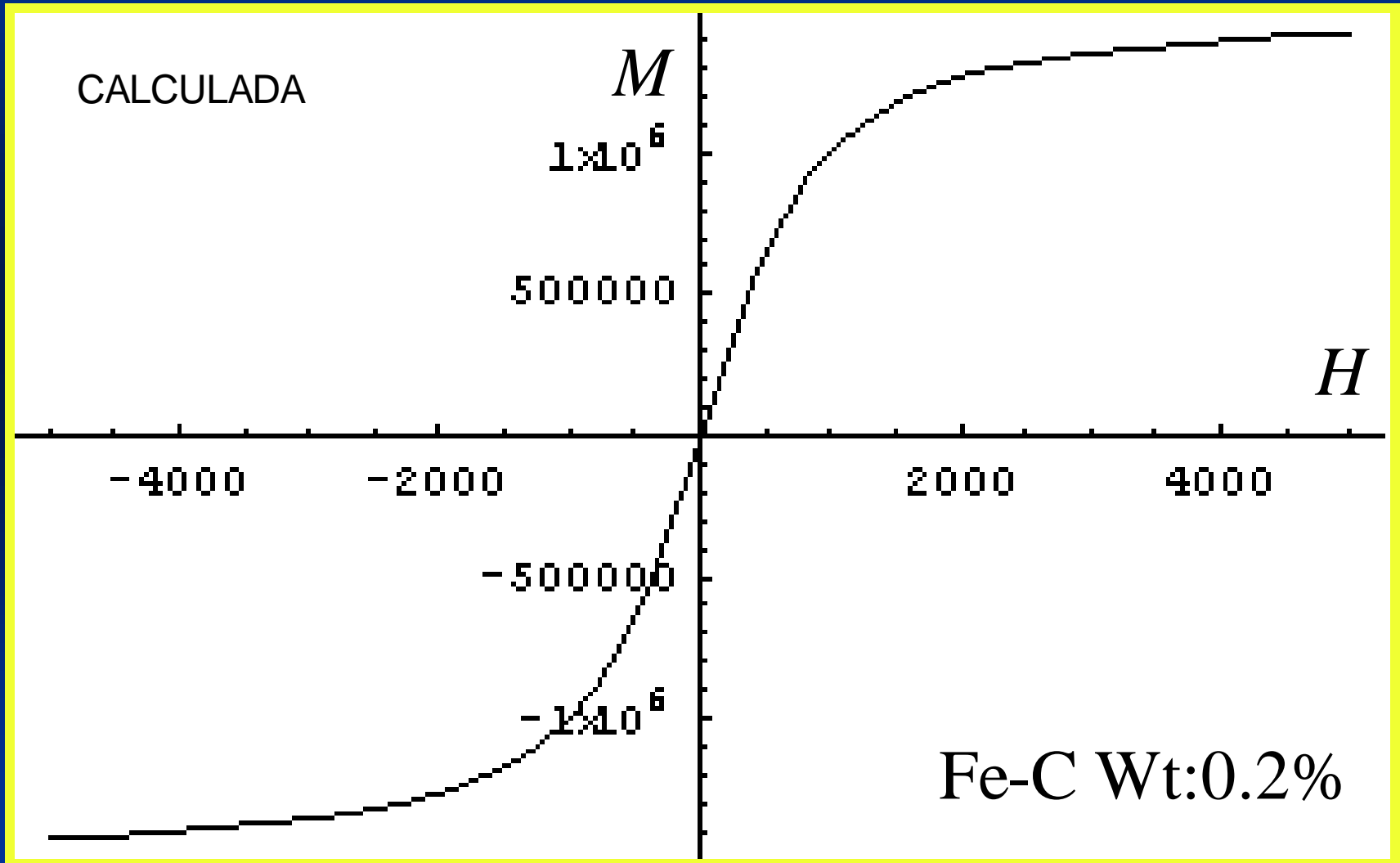


3. Curva de histéresis: (efecto de la morfología)

**Teoría, modelamiento y
resultados.**

PARAMAGNETICO

$$\frac{M}{M_s} = \coth \frac{\mu_0 m(H)}{k_B T} - \frac{k_B T}{\mu_0 m(H)}$$



FERRO Y FERRIMAGNETISMO

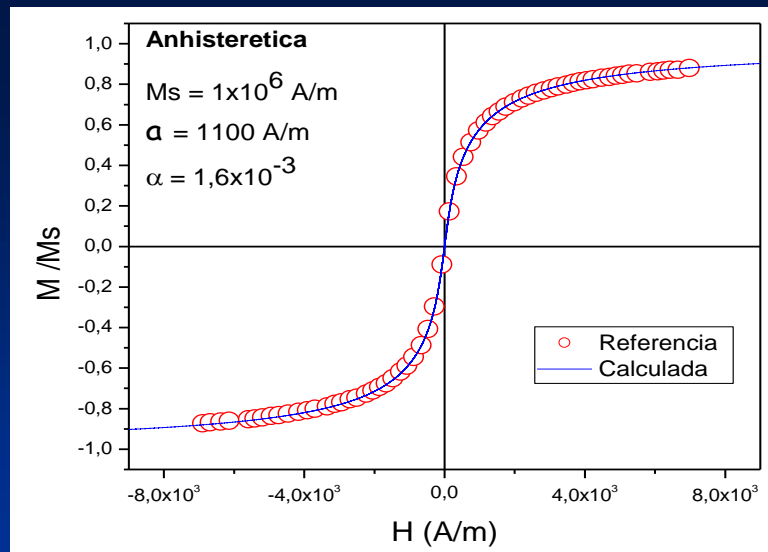
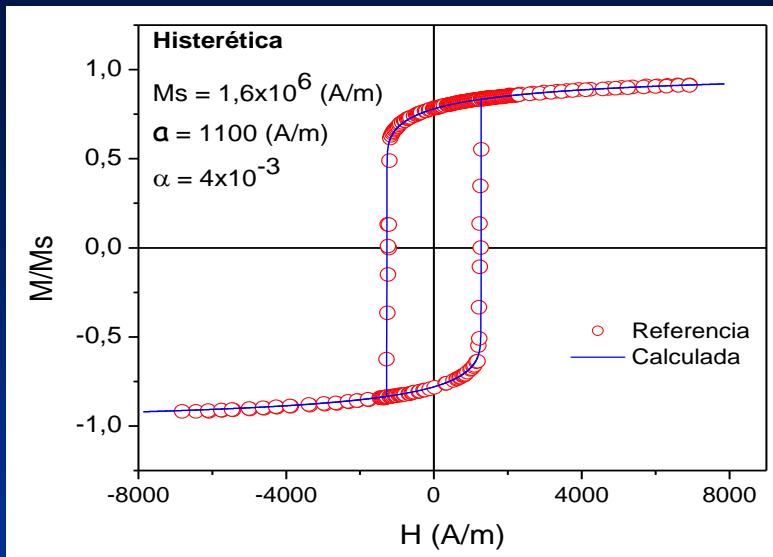
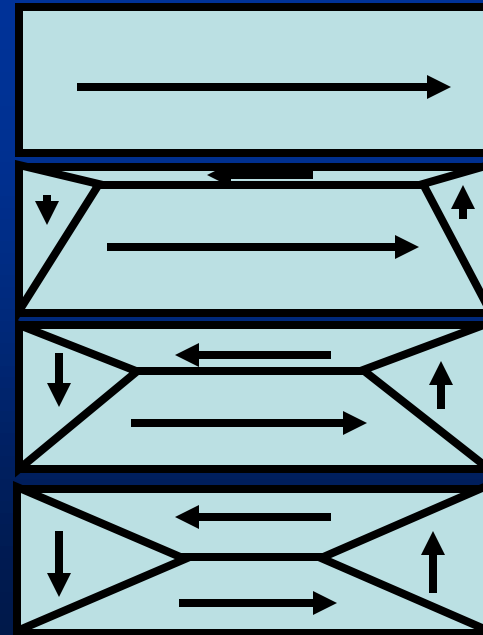
INTERACCION ENTRE MOMENTOS

FORTALEZA

$$H + \alpha M = H_{ef}$$

$$\frac{M}{M_s} = \coth \frac{\mu_0 m (H + \alpha M)}{k_B T} - \frac{k_B T}{\mu_0 m (H + \alpha M)}$$

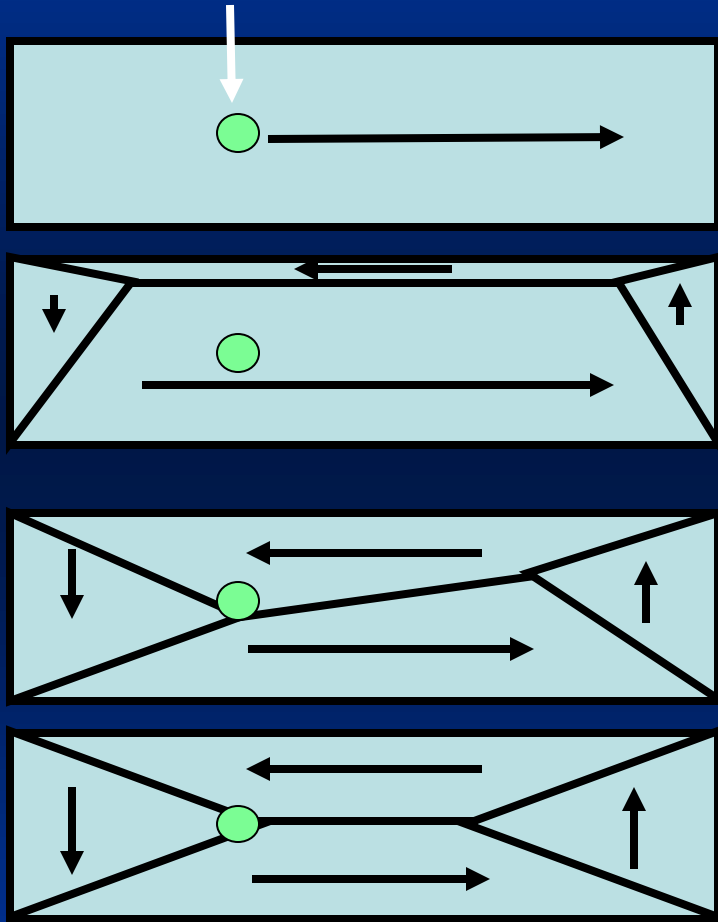
1/a



EFFECTO DE LOS DEFECTOS

$$M_{an}(H_e) = M_s \left[\coth \frac{(H + \alpha M)}{a} - \frac{a}{(H + \alpha M)} \right]$$

Defecto



$$M_{loss} = - \frac{dE_{loss}}{dH_{ef}} = - \frac{dE_{loss}}{dM} \frac{dM}{dH_{ef}}$$

$$M = M_{an}(H_e) - \psi k \left(\frac{dM}{dH_{ef}} \right)$$

$$M = M_{an}(H_e) + kM_{an}^{(1)}(H_e) + k^2M_{an}^{(2)}(H_e) + \psi C(H_{max})$$

PARAMETROS POR VARIAR

a \longrightarrow Efecto térmico

k \longrightarrow Efecto del anclaje

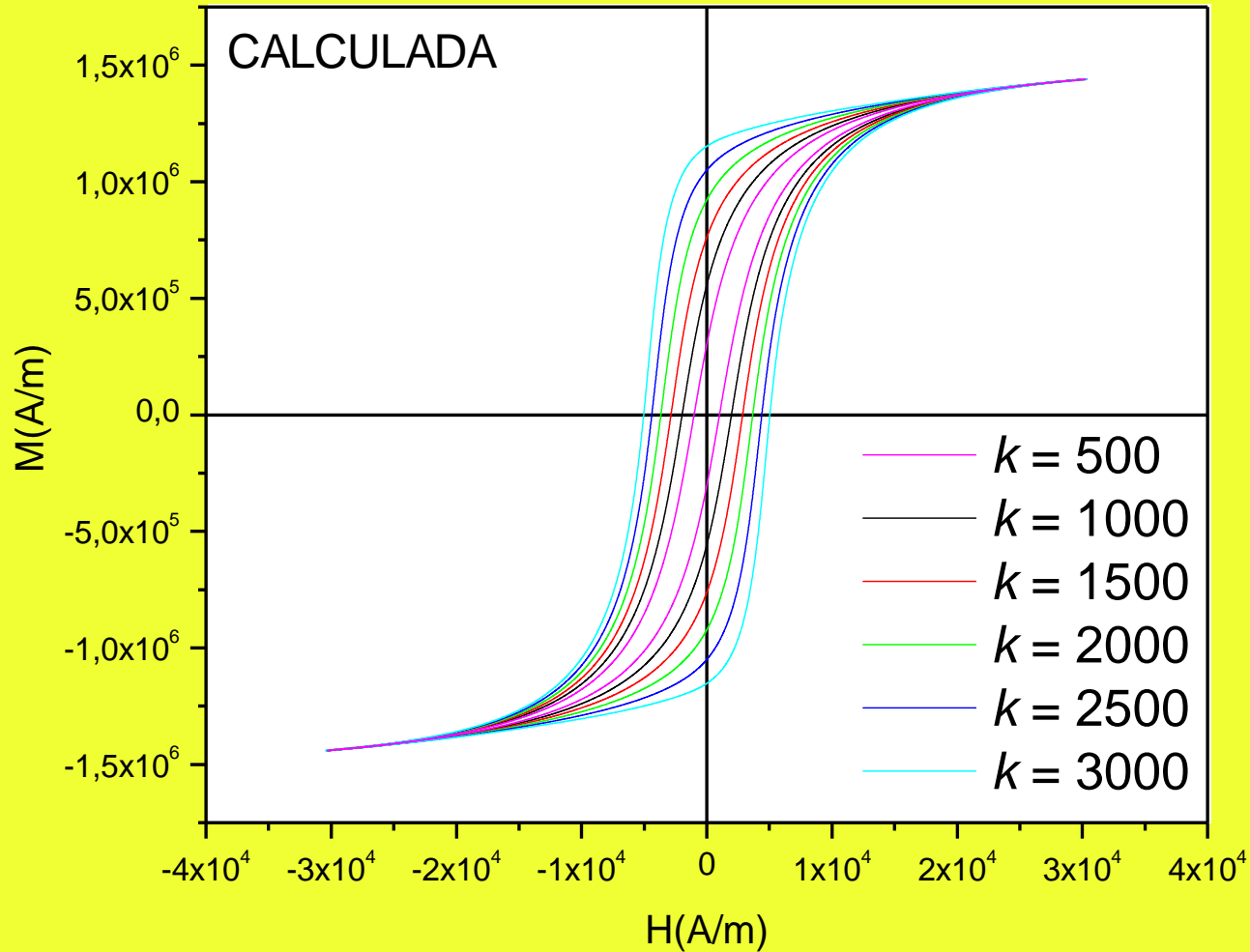
α \longrightarrow Efecto del campo promedio

k



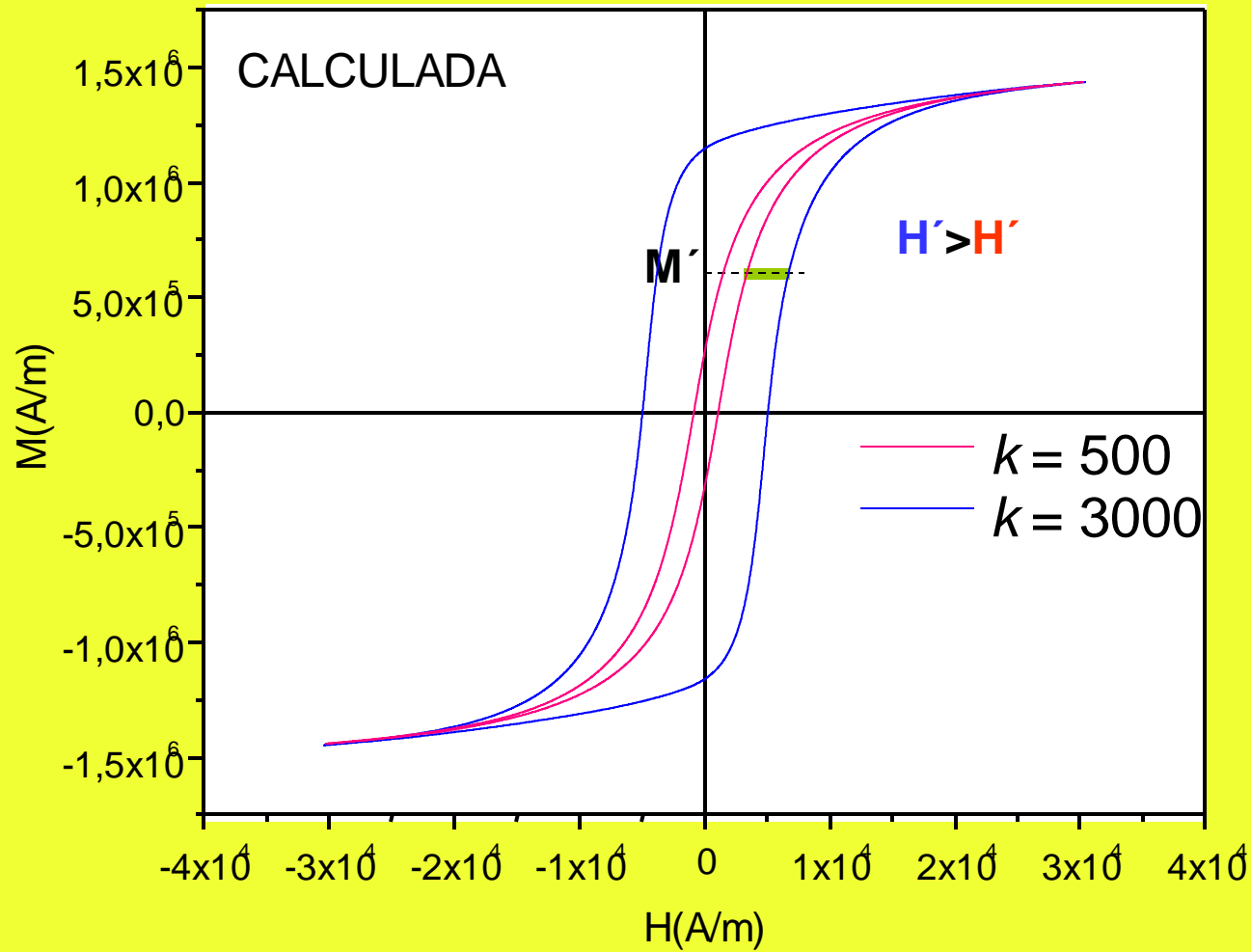
Efecto del anclaje

Variación del parámetro k

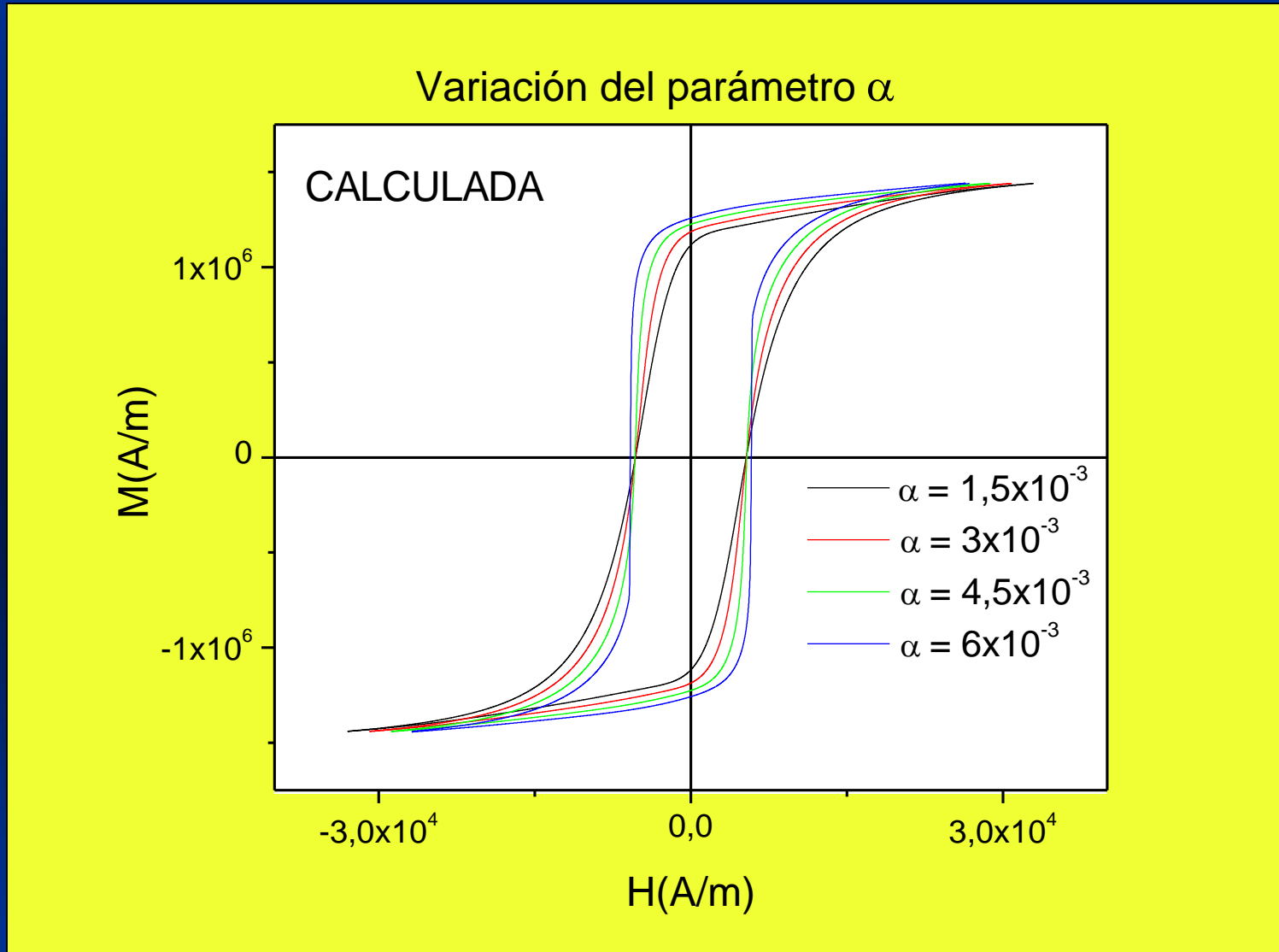


k → Efecto del anclaje

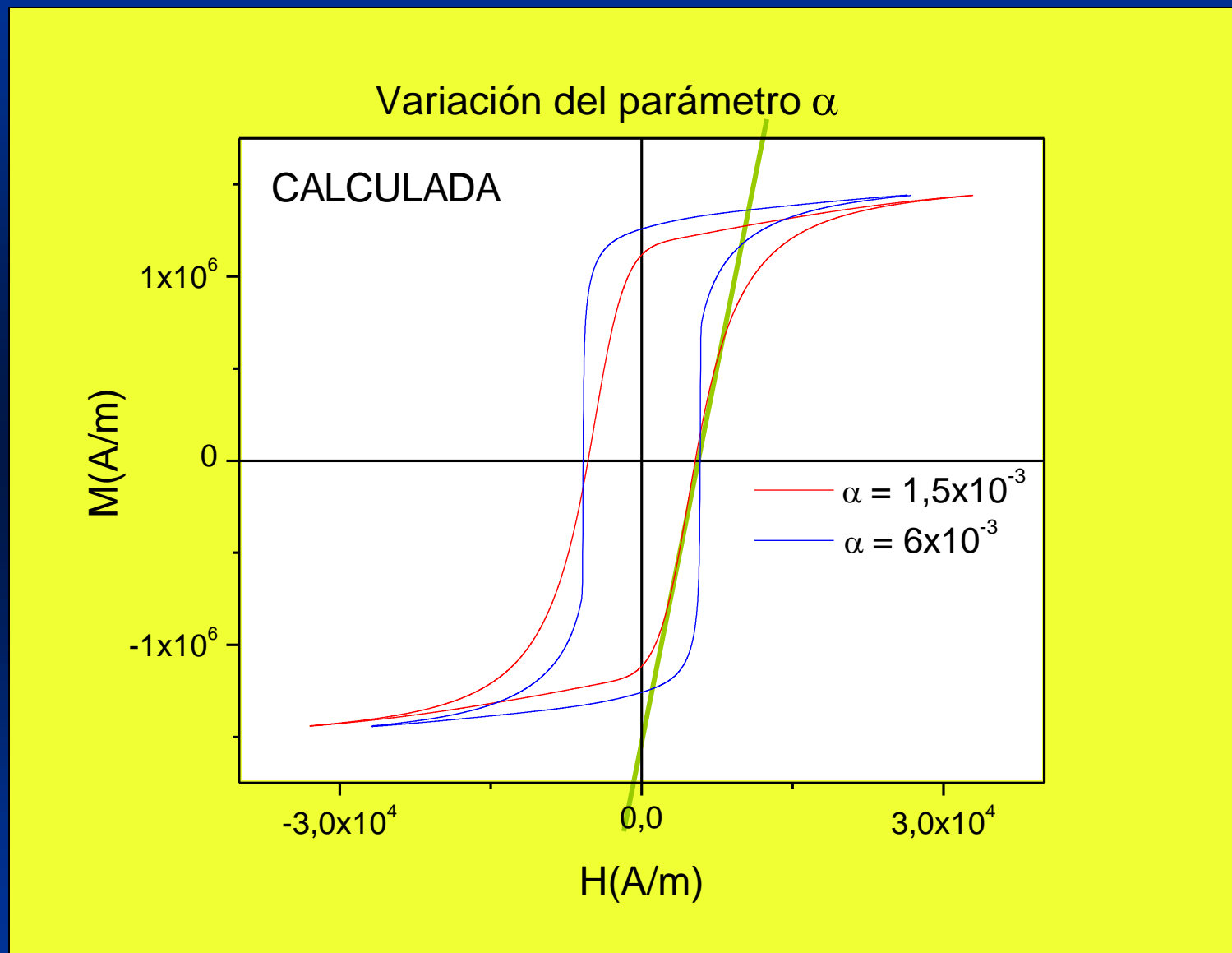
Variación del parámetro k



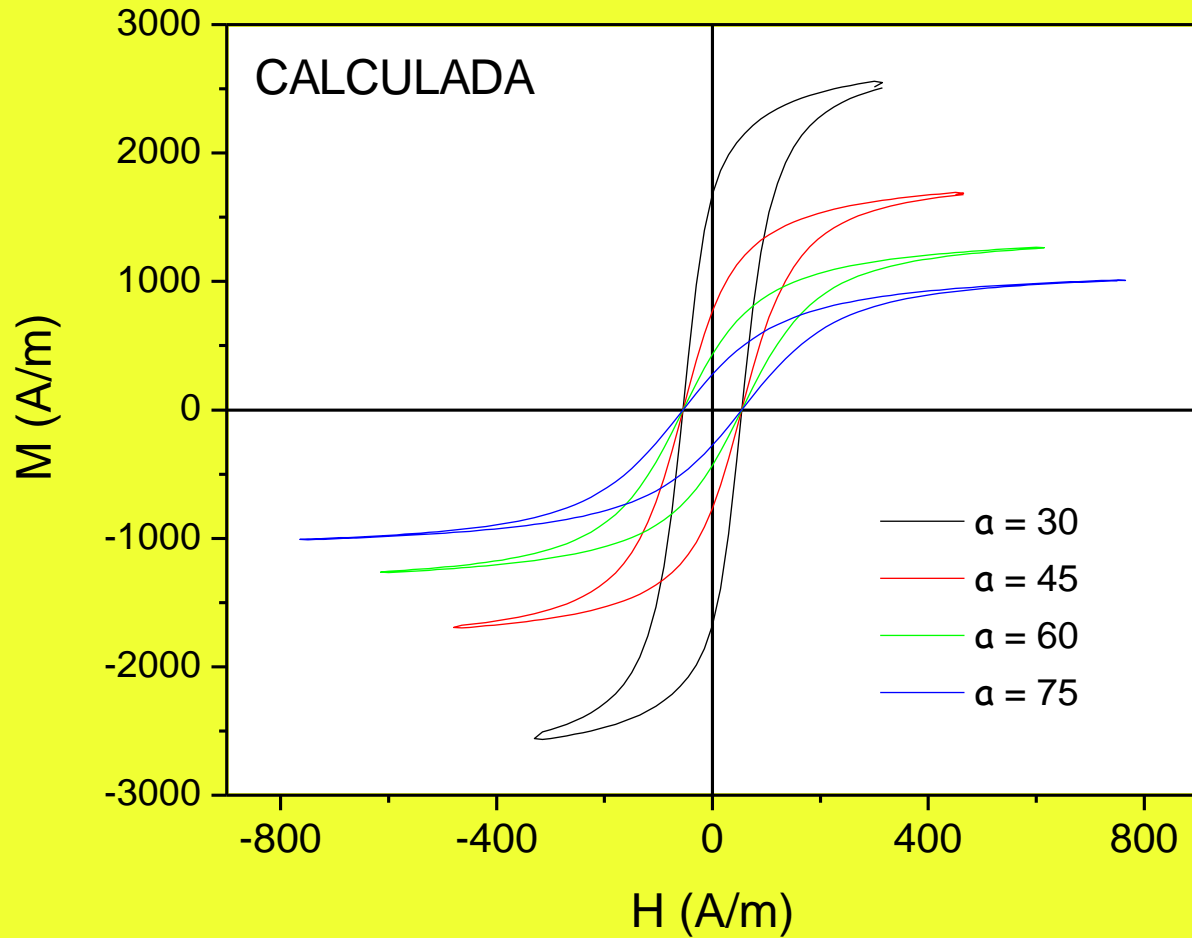
α \longrightarrow Efecto del campo promedio



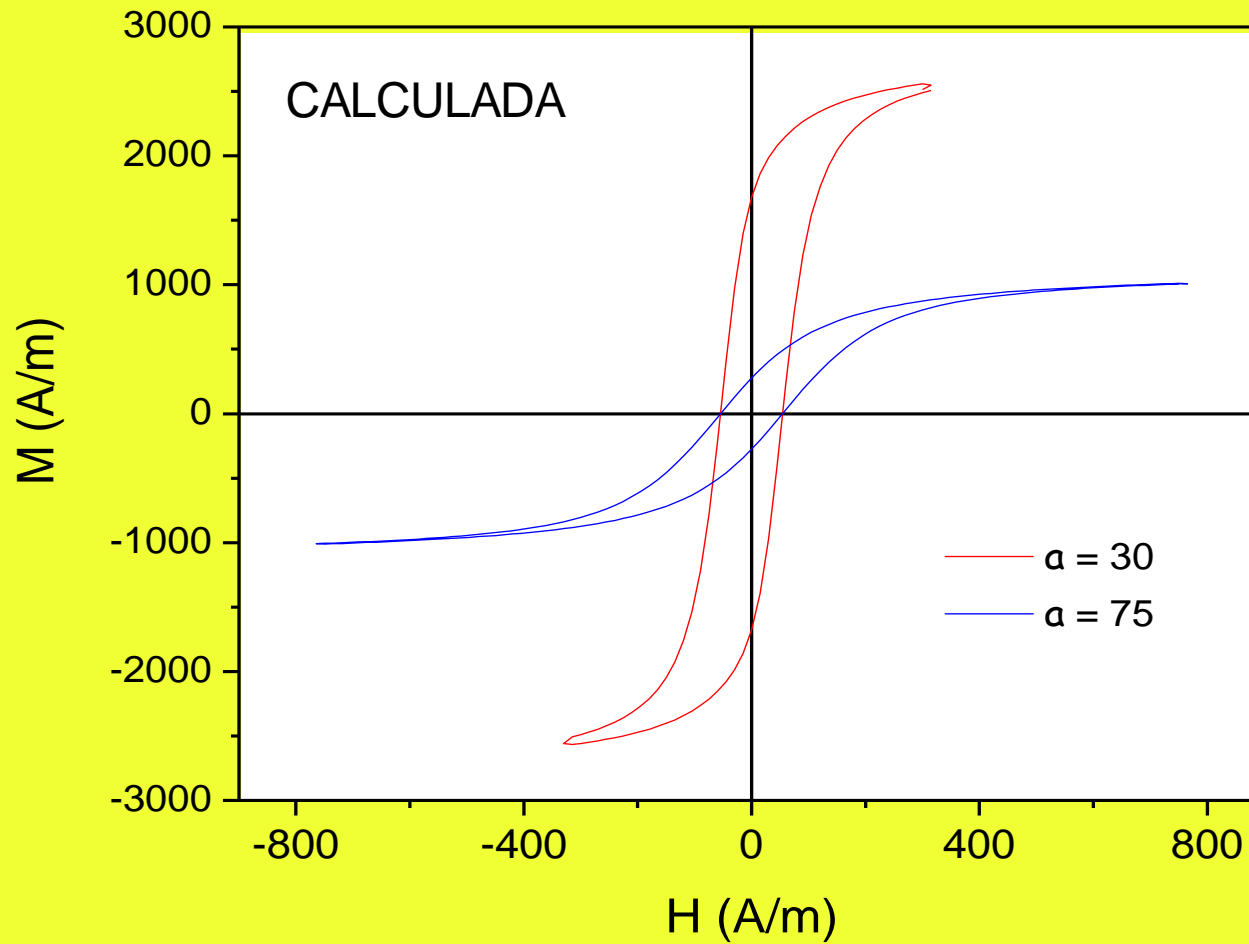
α \longrightarrow Efecto del campo promedio



Efecto térmico \longrightarrow a, M_s



α \longrightarrow Efecto térmico

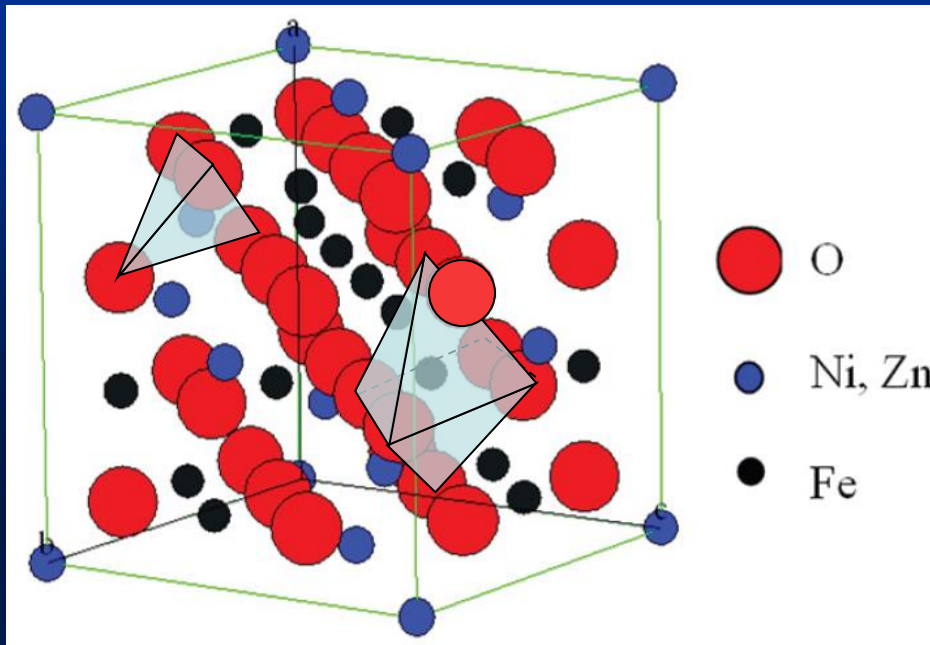




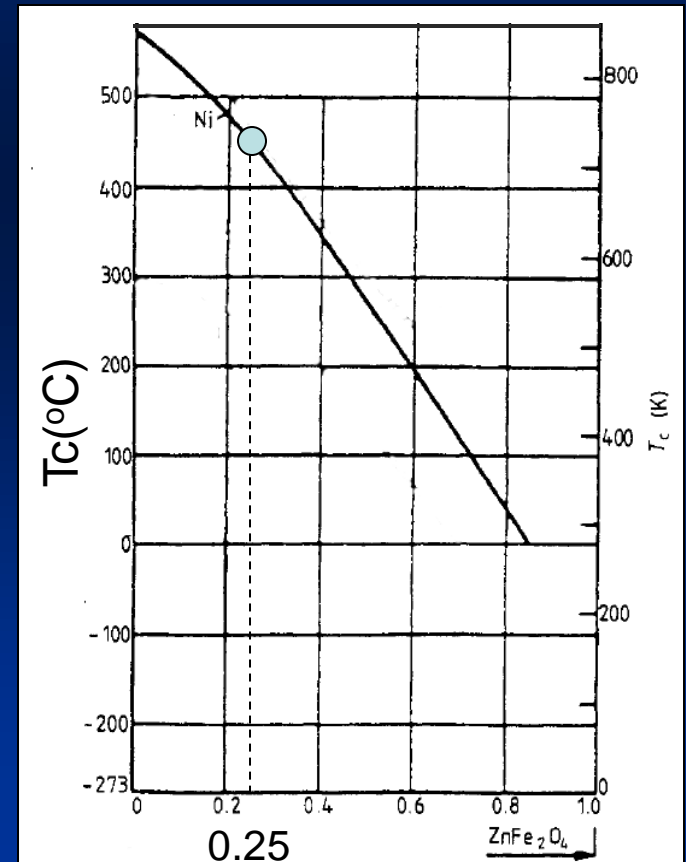
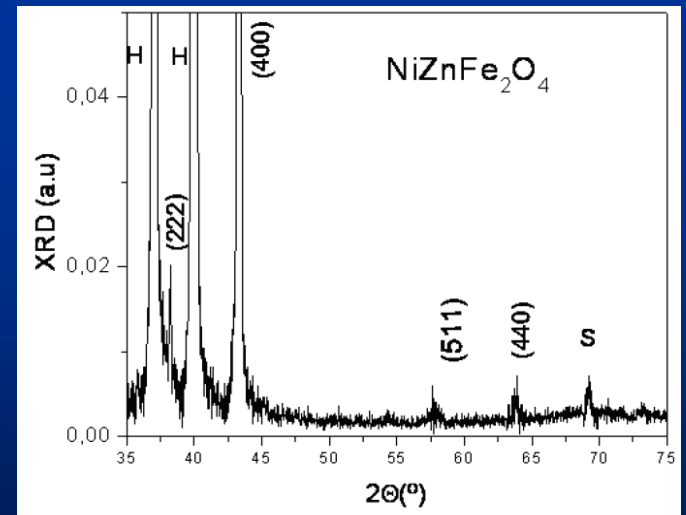
4. Resultados adicionales

Desarrollo experimental

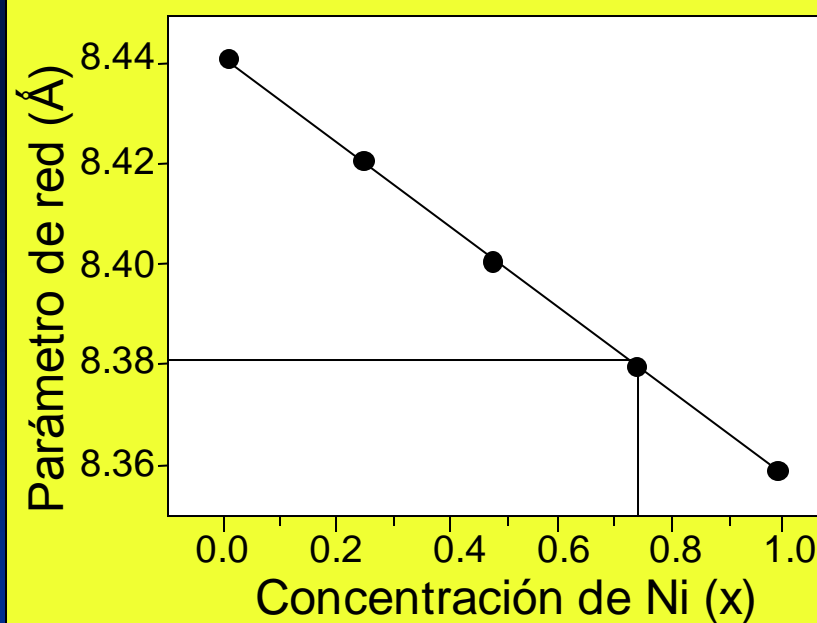
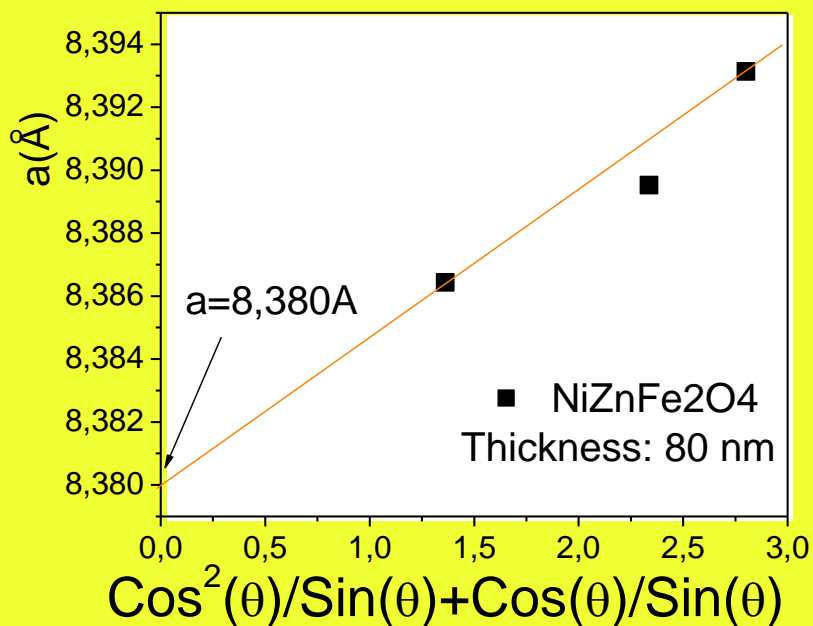
FERRITAS: $\text{Ni}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$



- Structure Espinela
- $T_c \sim 450^\circ\text{C}$
- Magnetismo: Ferrimagnético
- Sitios cristalográficos: octaédricos, tetraédricos



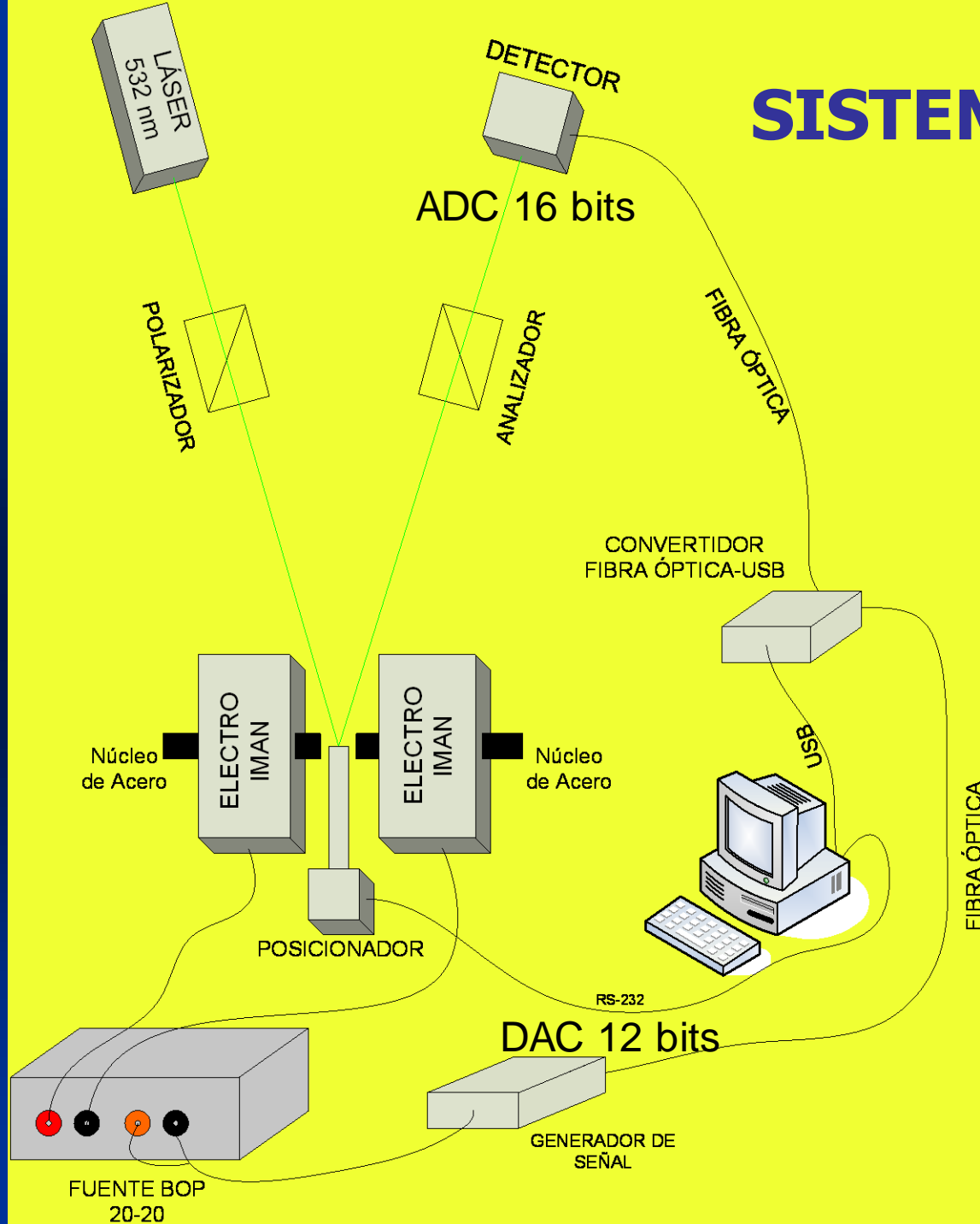
Muestra	Presión O ₂ (mbar)	Temperatura sustrato (°C ±0.1 °C)	Tiempo de Deposición (horas)	Espesor (nm ±10%)
01	7.05X10 ⁻¹	600.0	1	80
02			2	160
03			3	240



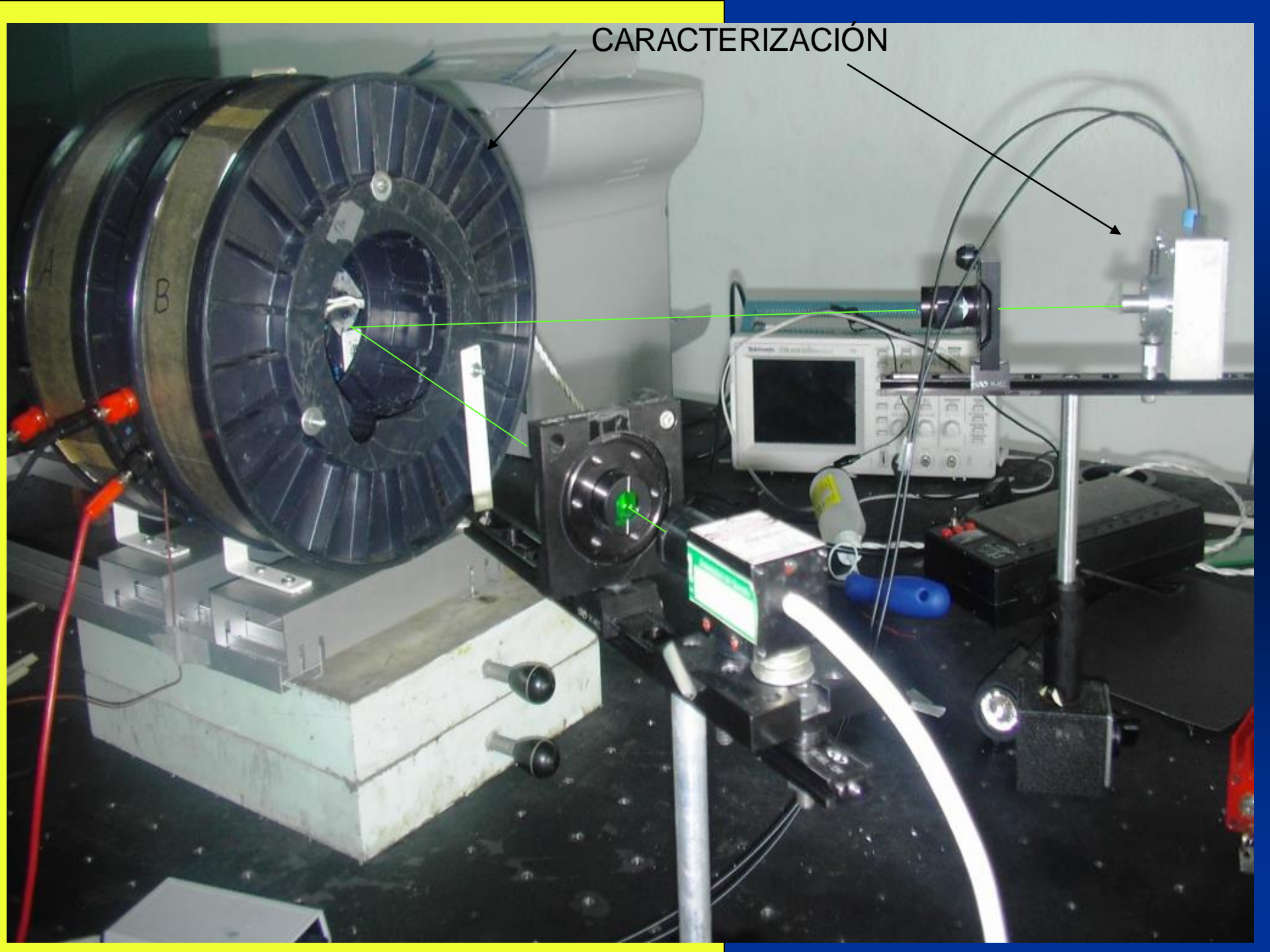
$x \approx 0.75$ $a = 8.38 \pm 0.01 \text{ \AA}$

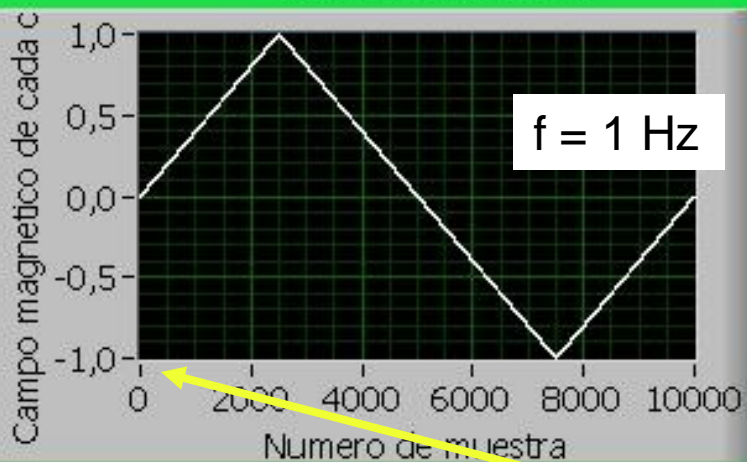
Mona Mouallem-Bahout *et al*, J. Sol. Stat. Chem. **178** (2005) 1080–1086.

SISTEMA MOKE

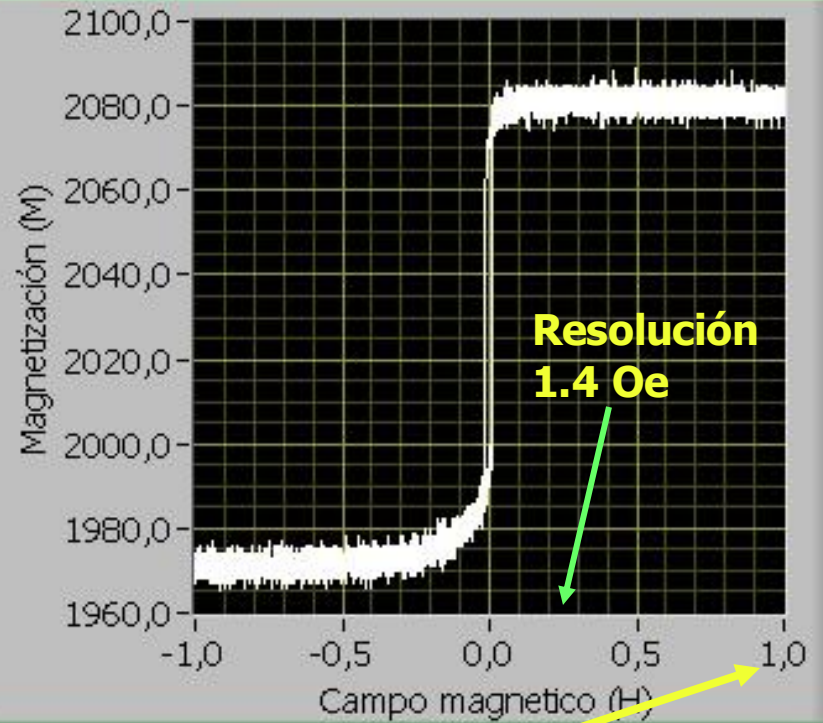


CARACTERIZACIÓN





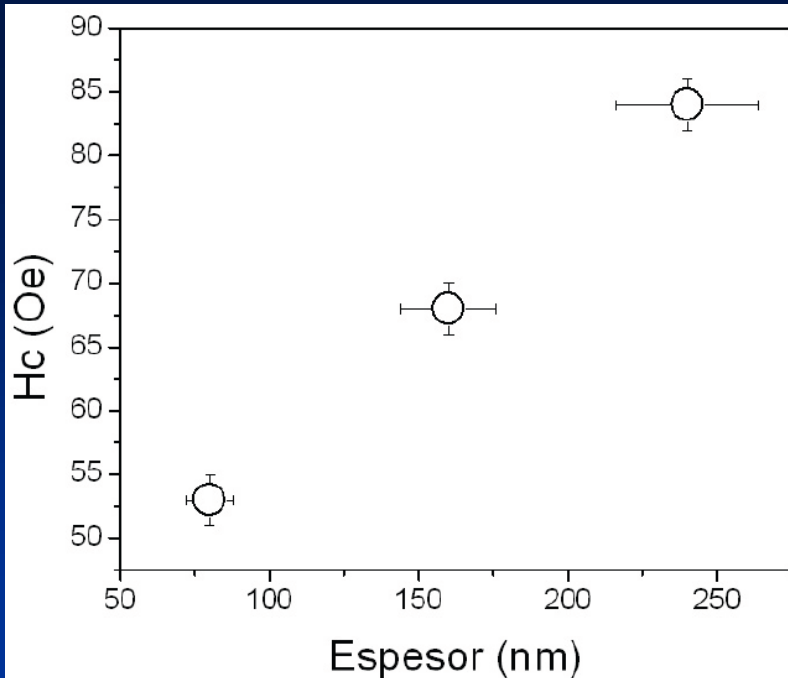
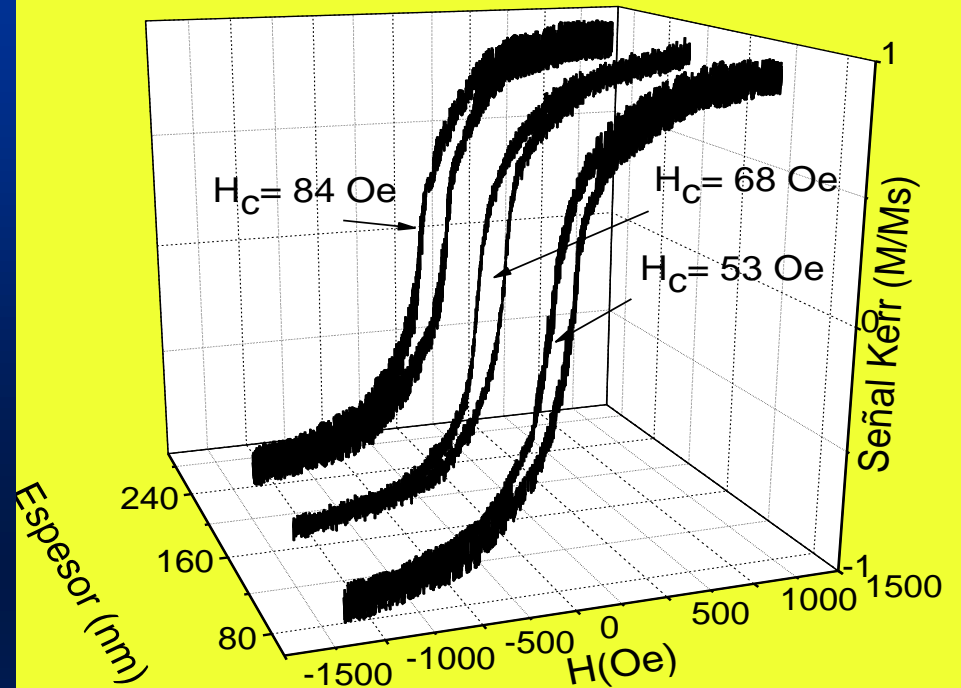
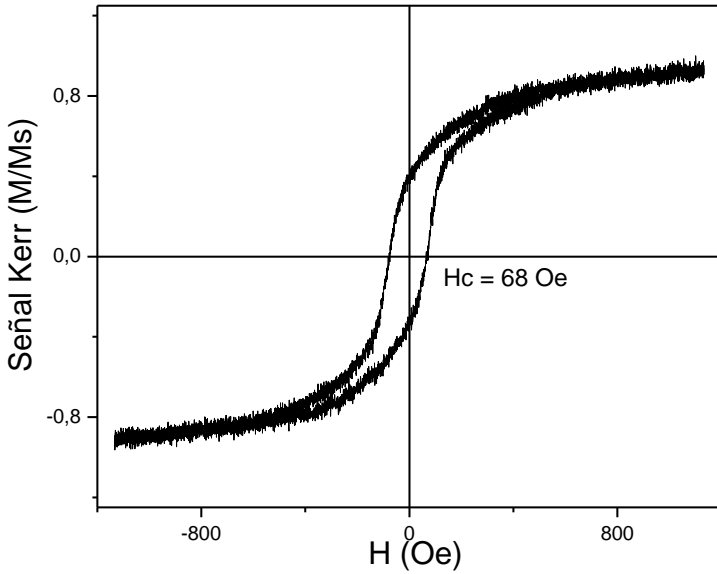
Histeresis de un ciclo



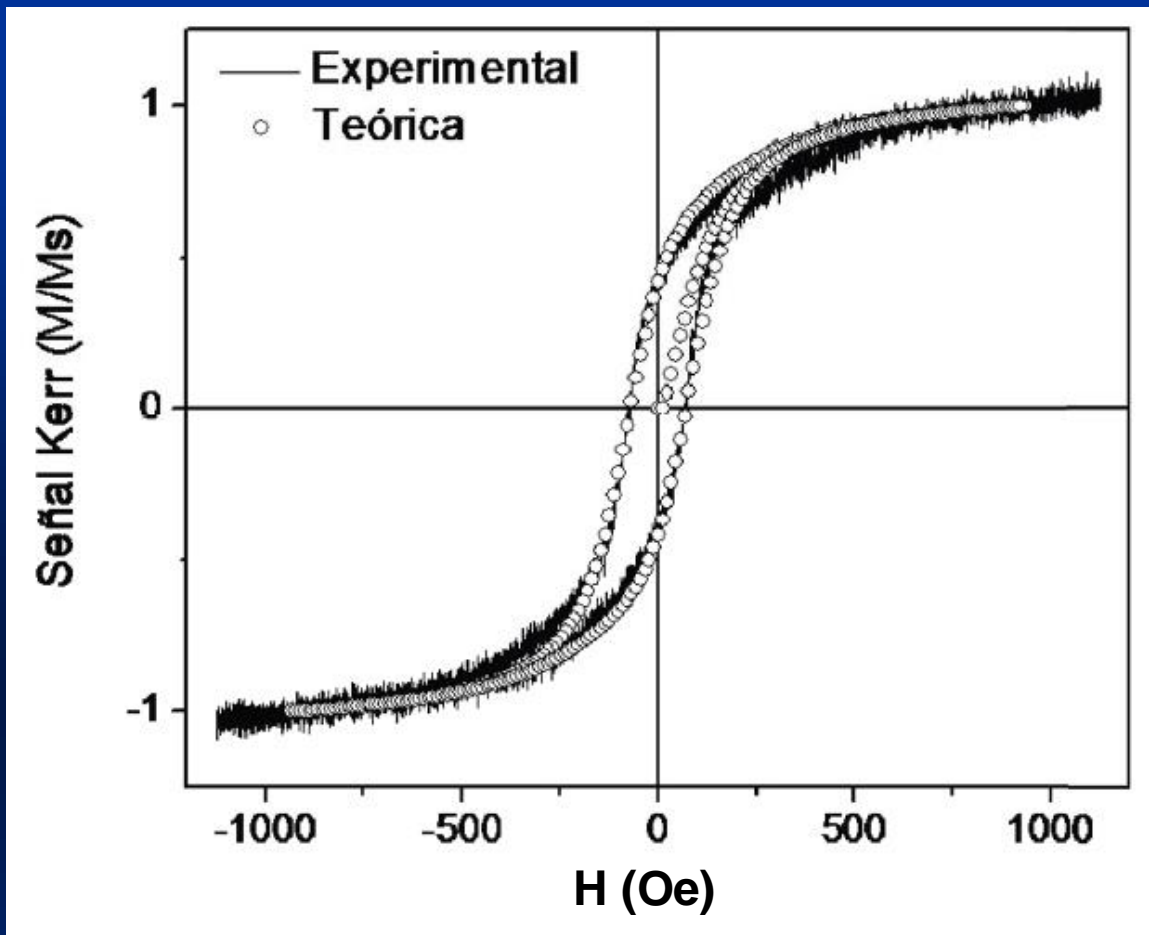
$H_{max} = 3000 \text{ Oe}$

CURVAS EXPERIMENTALES

NixZn1-xFe2O4



- H_c se incrementa con el tamaño de grano (monodominios) \Rightarrow con el espesor se incrementa el tamaño de grano!?



α (Sat)	α (Pend)	M/M _s	T (K)
3350	3.3×10^{-3}	1	300

Espesor (nm $\pm 10\%$)	80	160	240
K (R>0.9202)	30	68	70

- k se incrementa con d 

k involucra un incremento en la E_{loss}

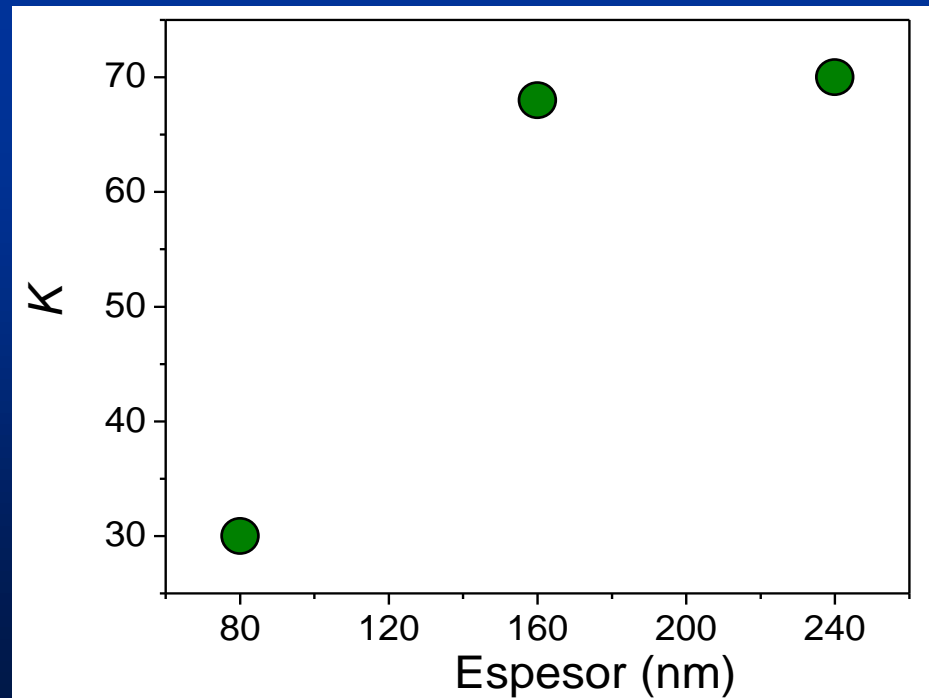
\Rightarrow Se incrementa el anclaje con d



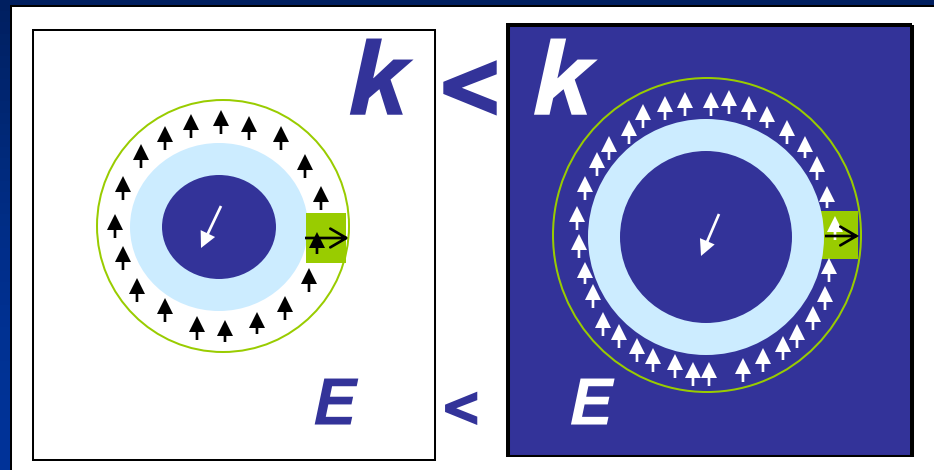
Densidad de defectos se incrementa con d : las paredes de los dominios

El desplazamiento de la pared es mayor para dominios mayores

C. Calle *et al*, Phys. B, (2006) aceptado para publicación,



H_c : con d se incrementa el tamaño de grano!?





5. Conclusiones

CONCLUSIONES

- El modelamiento del efecto Kerr puede ser empleado para medir espesores: (Q y N conocidos)
- El modelamiento del efecto Kerr puede ser empleado para medir Q , N : (d conocidos)
- A partir de la respuesta Kerr de materiales magnéticos: identificar comportamiento de monodominio, multidominio.
- El modelamiento teórico de curvas de histéresis magnética y señal Magneto-óptica reproduce resultados teóricos.

- El modelamiento teórico de estos parámetros permitirá evaluar y caracterizar películas y multicapas: presencia o incremento de defectos, tamaño crítico del dominio.
- El modelo responde al incremento en la interacción de dominios y al anclaje de los defectos.
- El modelo no reproduce completamente dependencia con la T observadas experimentalmente.
- En películas ferritas de NiZn ($30\text{nm} < d < 240\text{nm}$): región monodominios ($10 < k < 70$), se incrementan los defectos con el espesor de la película: sugiere un incremento en el tamaño de grano.



6. Perspectivas y publicaciones

PERSPECTIVAS

- Introducir al modelamiento una dependencia con T que reproduzca resultados experimentales.
- Evaluar a partir de AFM imágenes de las películas analizadas en este trabajo, permitiría buscar una relación de k por unidad de superficie!
- Experimentalmente: El mejoramiento continuado del sistema MOKE requeriría entre otros: cambiar el generador de la señal tipo rampa con el fin de utilizar una función que permita la obtención de mayor información de la respuesta magnética de las películas en regiones cercanas a $H=0$. Así mismo nos permitiría un mejor control sobre las características de la señal, como frecuencia, amplitud, etc,.
- El modelo implementado puede ser utilizado para evaluar experimentalmente películas con composiciones y espesores variables para caracterizar sus parámetros, espesores, etc.

PUBLICACIONES

- “Magneto Optical Kerr NiZn ferrite film of variable thickness” C. Calle *et al.* Aceptado para publicación, **Physica B**, Enero 2006.
- “Estudio de películas magnéticas por medio de un sistema basado en el efecto Kerr (MOKE)” C. Calle *et al.* Sometido a la **Revista Colombiana de Física**, Octubre 2005.
- “Simulación de comportamientos histeréticos blandos en películas magnéticas” C. Calle, *et al.* Sometido a la **Revista Colombiana de Física**, Octubre 2005.

PARTICIPACIÓN EN EVENTOS

- **VII Workshop on Magnetism and magnetic materials.** Reñaca, Dic 12-16 de 2005. “Magneto-Optical Kerr Effect of ferrimagnetic spinel $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ films”
- **XXI Congreso Nacional de Física.** Barranquilla, Octubre 18-24 de 2005. Trabajos presentados:
 - “Implementación de un sistema de caracterización magneto-óptica basado en el efecto.
 - Kerr (MOKE)”, “Distribuciones en comportamientos histeréticos en películas magnéticas”.
- **Encuentro Física y Sociedad,** 2005 Año Mundial de la Física. Bogotá Septiembre 5-6 de 2005. Mural: “Estudio de Materiales magnéticos por medio del MOKE”

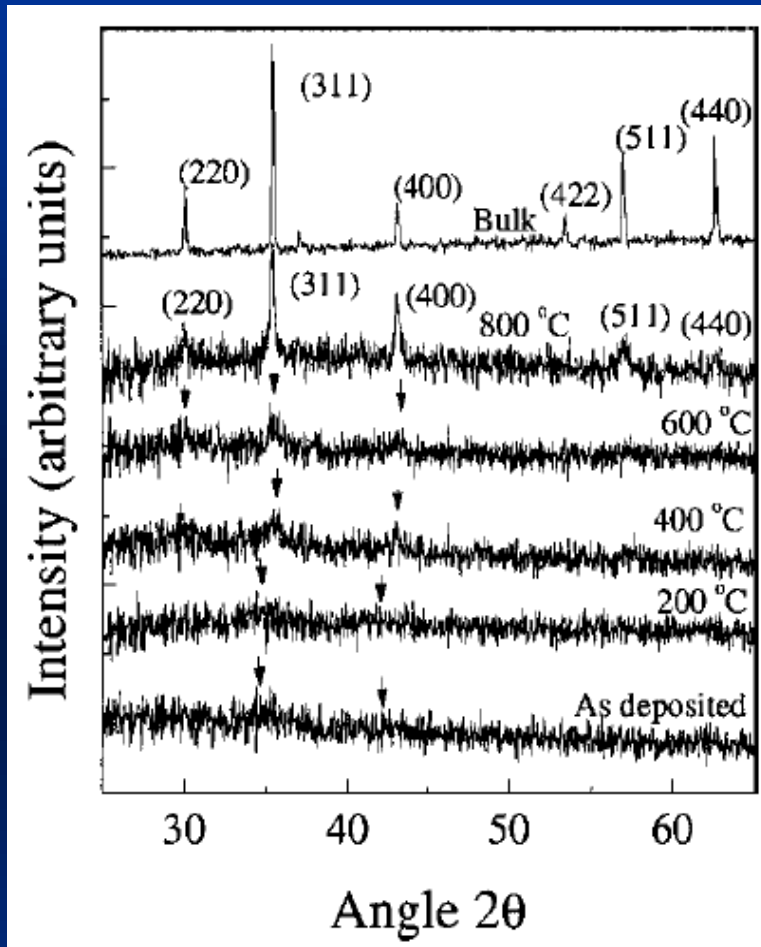
AGRADECIMIENTOS

Profesores: O. Guzmán y A. Mendoza
Compañeros del grupo de MM & N

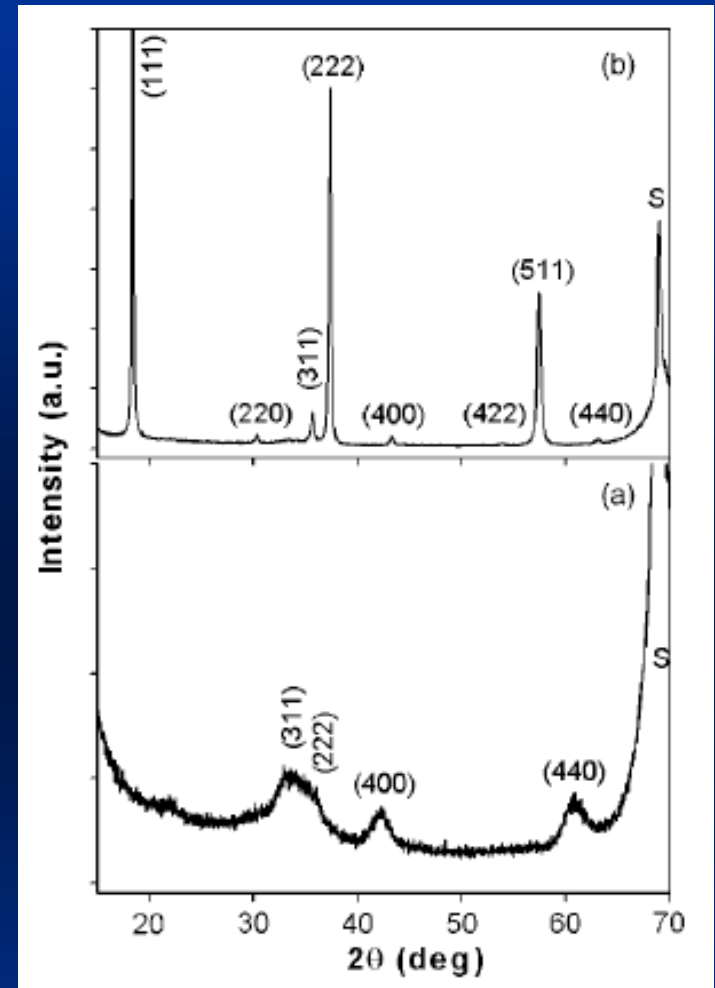
Financiamiento:
COLCIENCIAS
Instituto Interdisciplinario de las Ciencias
CENM

Apoyo académico:
Grupo de Nuevos Materiales
Grupo de Películas Delgadas

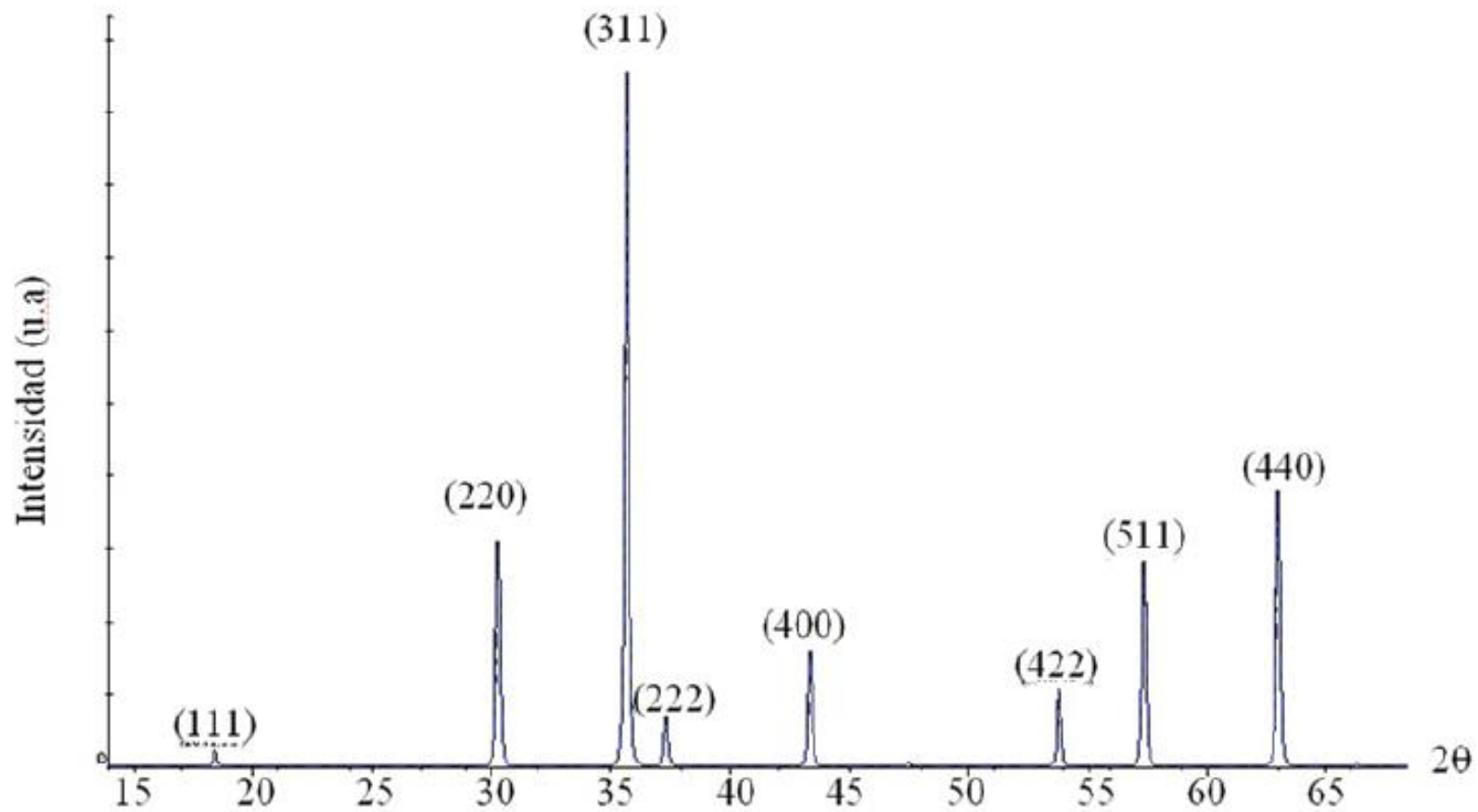
FIN

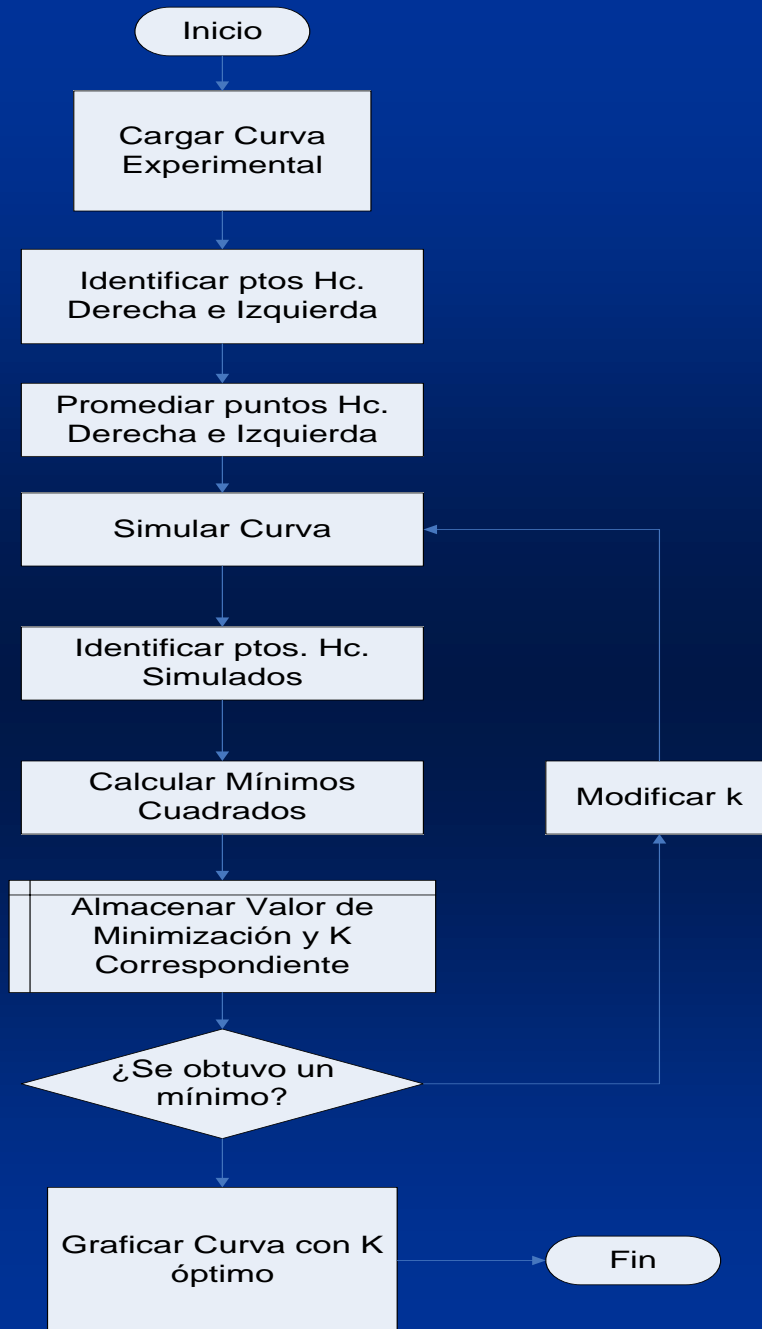


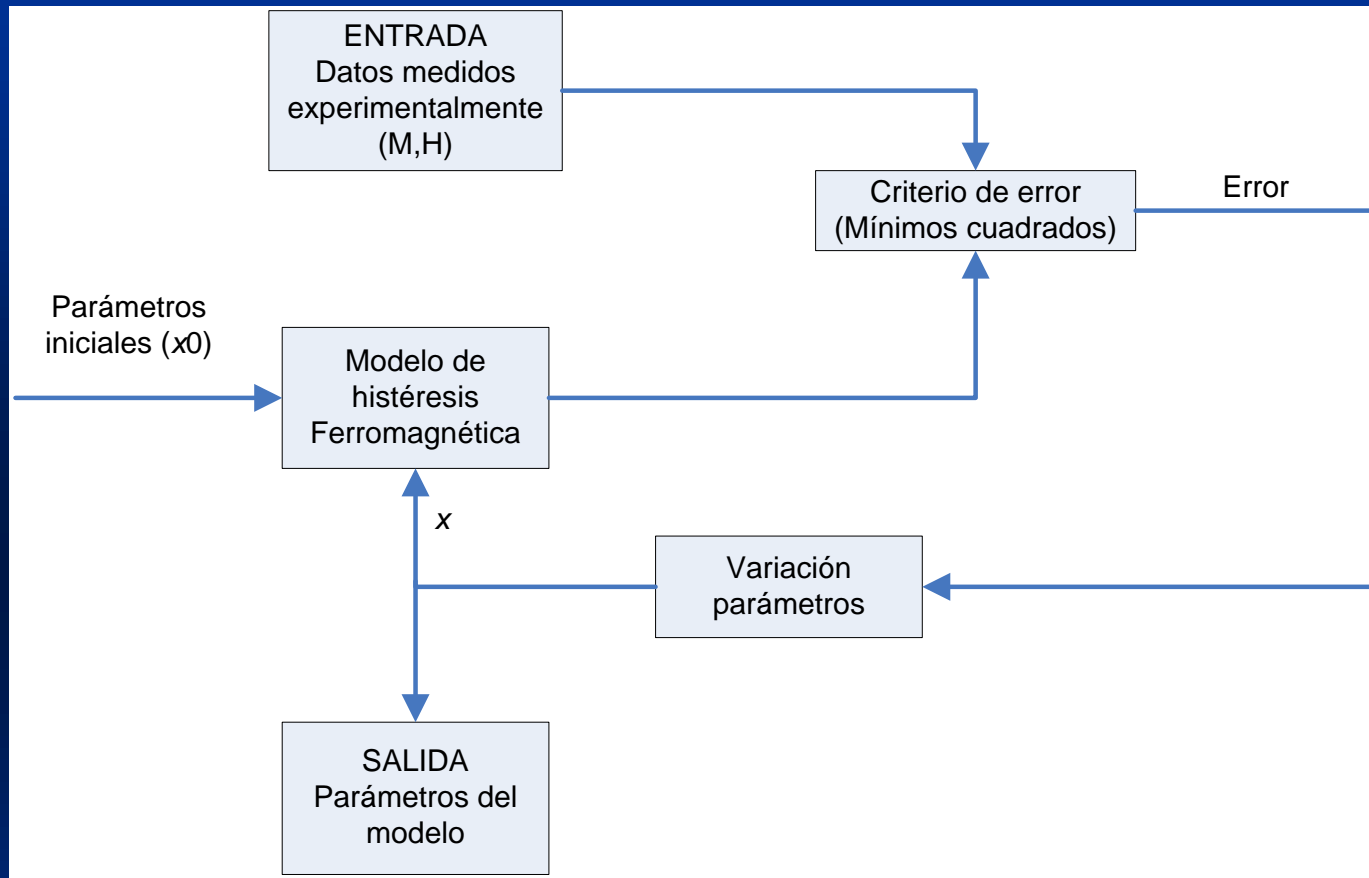
M. Desai *et al*, Anomalous variation of coercivity with annealing in nanocrystalline NiZn ferrite films, **91** (2002) 7592



M. Sorescu *et al*, Structural and magnetic properties of NiZn and Zn ferrite thin films obtained by laser ablation deposition, *J. Appl. Phys.* **97** (2005) 10G105







$$Error = \left[\sum_{muestras} \frac{(B_{experimental} - B_{modelo})^2}{N} \right]^{1/2}$$