



**Área de Ingeniería de Sistemas y Automática
Universidad de Oviedo**

**SISTEMA DE LEVITACIÓN MAGNÉTICA DE UN IMÁN ESFÉRICO
CON DETERMINACIÓN DE LA POSICIÓN 3D**

Ponente: Alberto Zapico Ania

ÍNDICE

- **INTRODUCCIÓN**
- **SENSORES DE CAMPO MAGNÉTICO**
- **DETERMINACIÓN DE LA POSICIÓN**
- **IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE LEVITACIÓN MAGNÉTICA**
- **CONCLUSIONES**

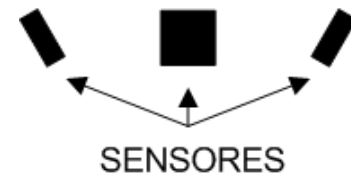
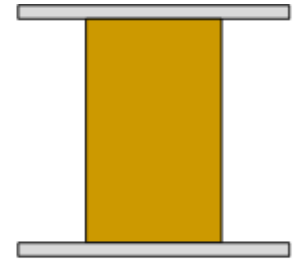
INTRODUCCIÓN: Levitación magnética

- Fuerza magnética que compensa la masa de la bola
- Sistema inestable, es necesario implementar control
- Aplicaciones: tren levitación magnética, cojinetes magnéticos, industria



INTRODUCCIÓN: Objetivos

- Espacio libre alrededor
 - Bola imantada
 - Sensores de campo muy sensibles
 - Distancia de levitación máxima
- Sensores magnetorresistivos:
 - Determinar la sensibilidad de los sensores
 - Factores que afectan a los sensores
 - Distribución de sensores apropiada
 - Determinación de la posición lineal, 2D y 3D en la zona más alejada posible en compromiso con la sensibilidad
 - Desacoplo del campo de la bobina de levitación
- Implementación del control de levitación



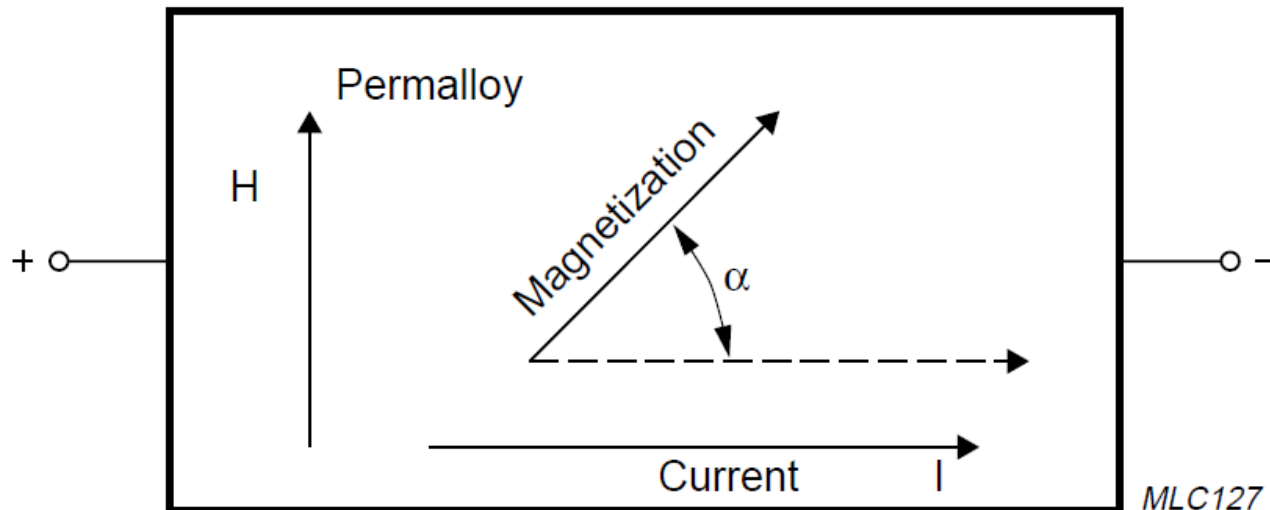
ÍNDICE

- **INTRODUCCIÓN**
- **SENSORES DE CAMPO MAGNÉTICO**
- **DETERMINACIÓN DE LA POSICIÓN**
- **IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE LEVITACIÓN MAGNÉTICA**
- **CONCLUSIONES**

SENSORES: Fundamento

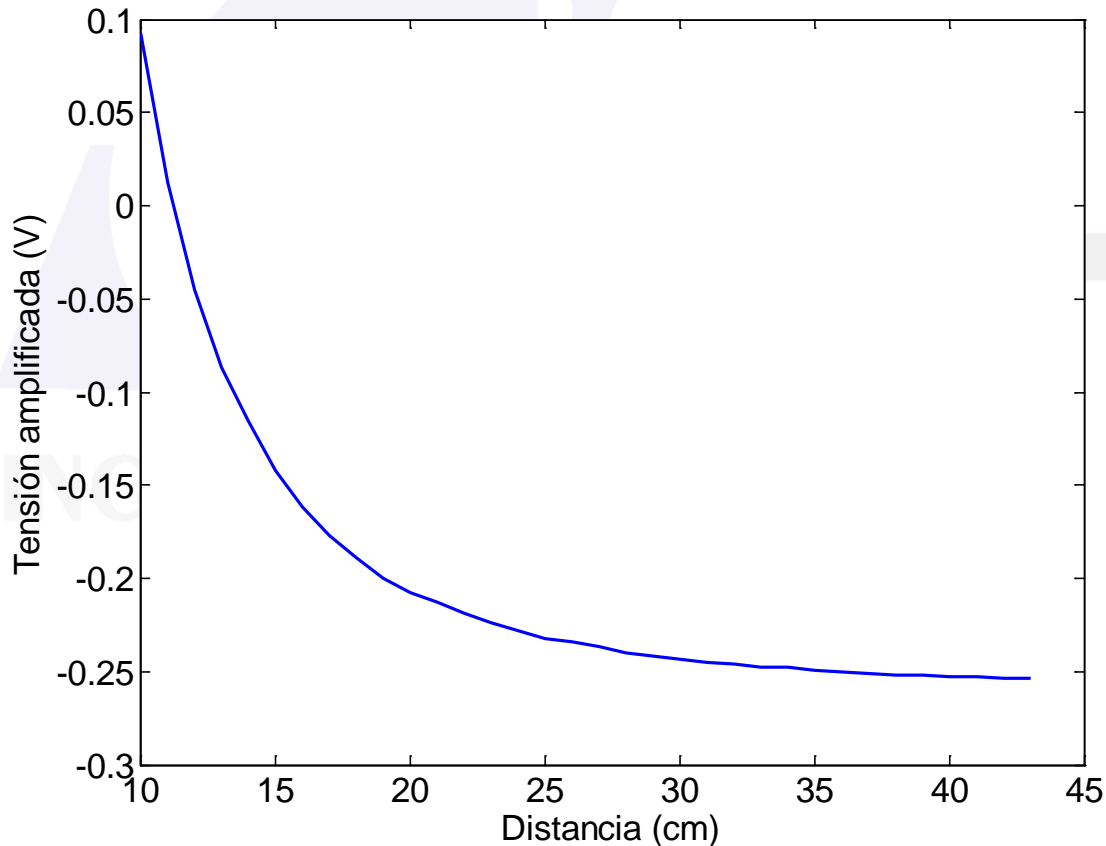
- **Efecto magnetorresistivo**: variación de R en un material (permalloy) debido a un campo externo.
- Al aplicar un campo paralelo al material y perpendicular a la corriente gira el vector polarización (cambia α) variando R

$$R = R_0 + \Delta R_0 \cos^2 \alpha$$



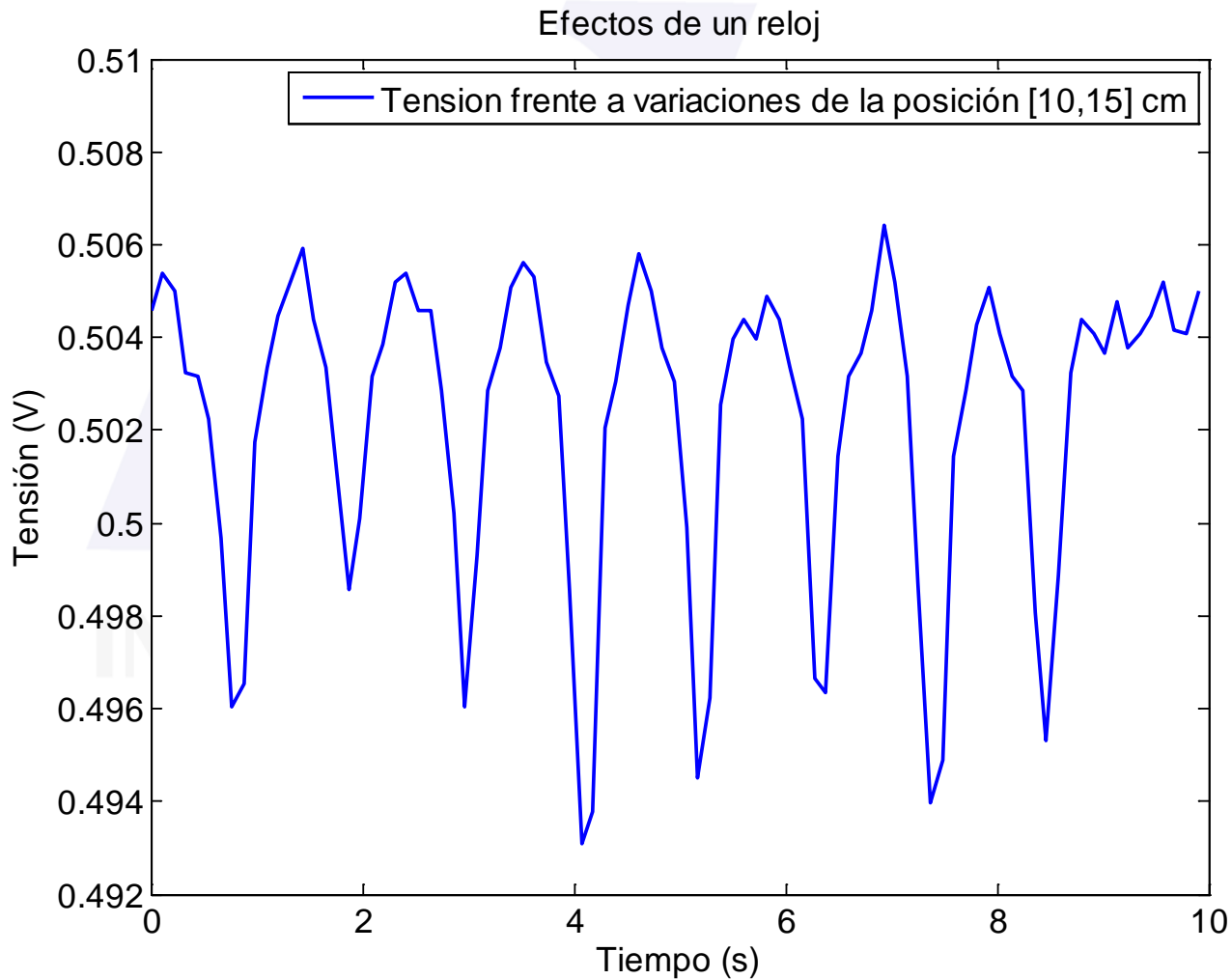
SENSORES: Sensibilidad

- Sensibilidad: variación en la tensión de los sensores cuando se aplica una variación de campo magnético.
- Se observa variación de campo hasta a unos 40 cm



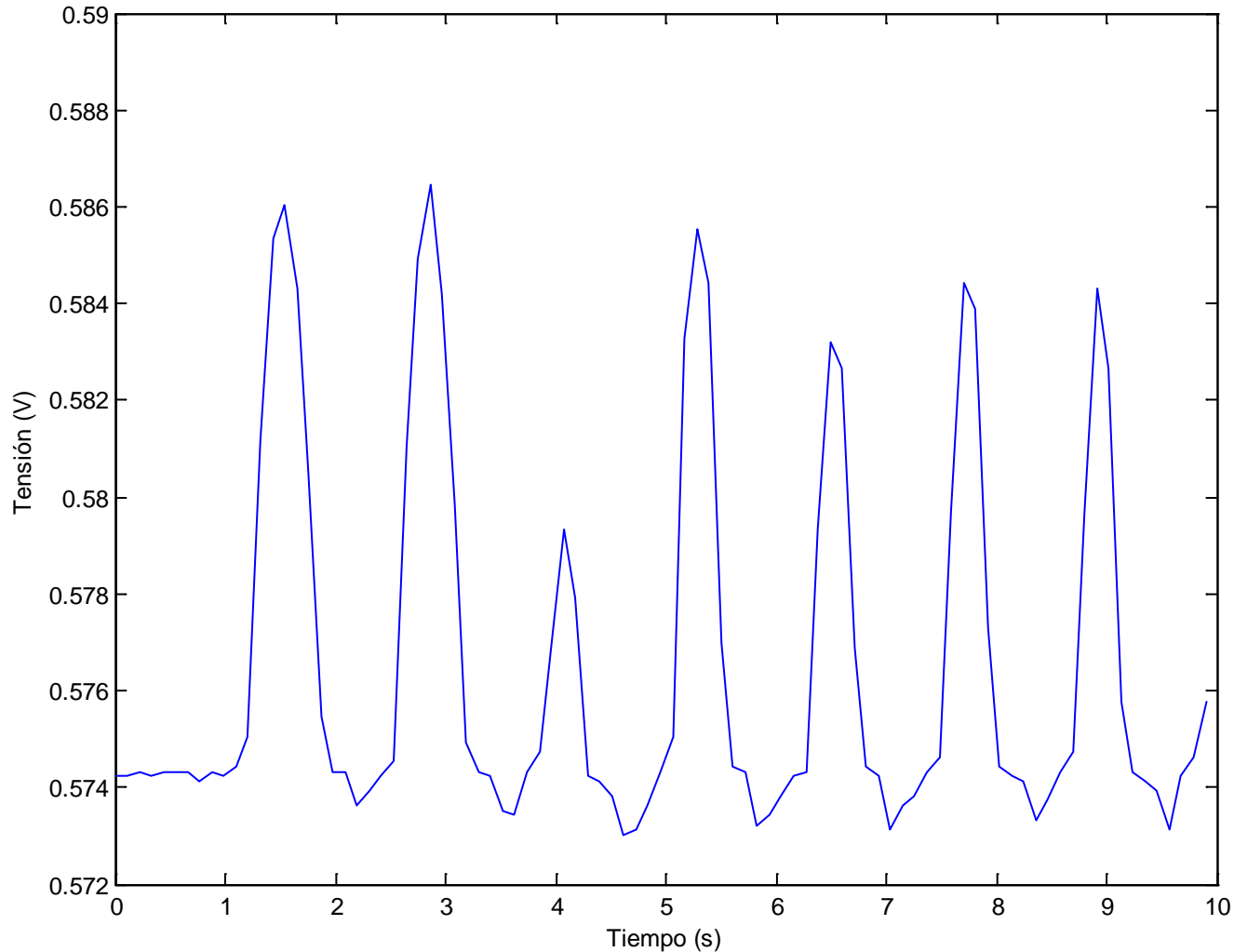
SENSORES: Factores que afectan

- Objetos ferromagnéticos



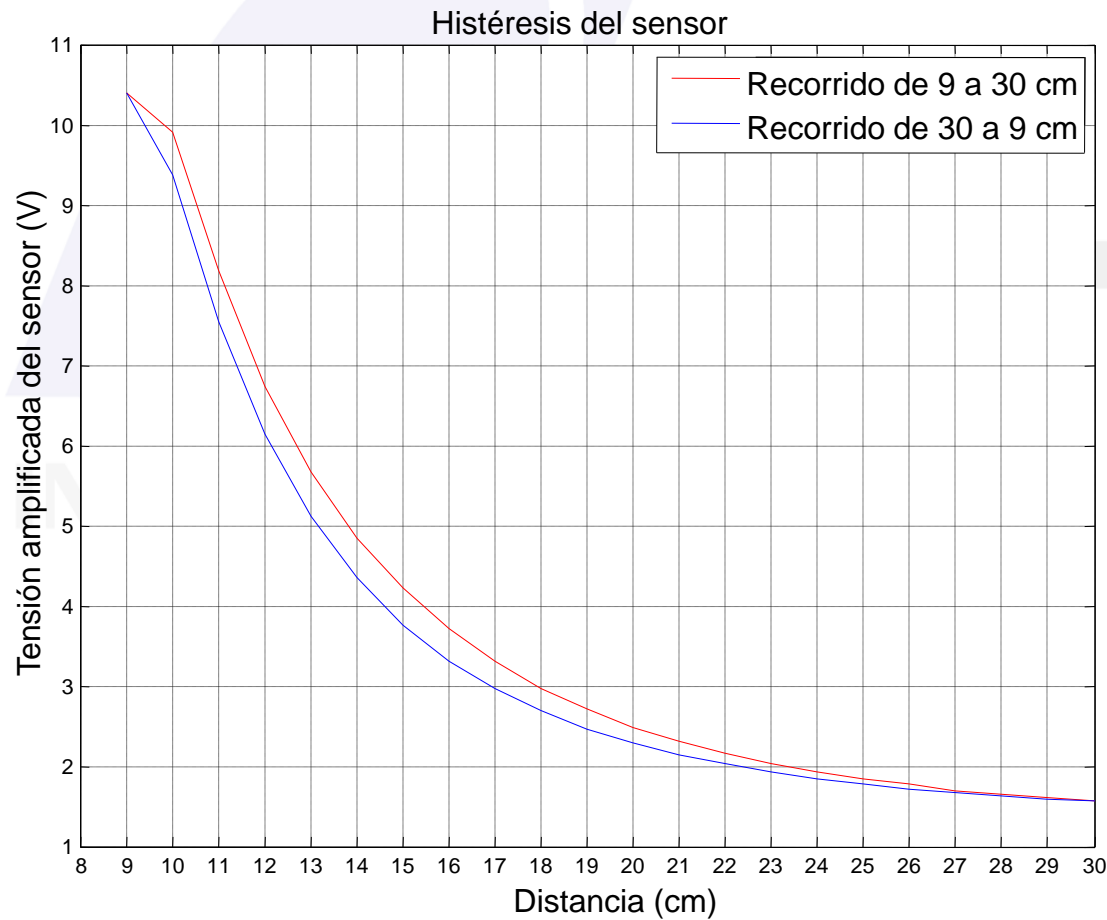
SENSORES: Factores que afectan

- Aparatos que radien campo (p.e. un teléfono móvil)



SENSORES: Problemas

- Sensibilidad a campos externos
- Variación por temperatura
- Principal problema -> **Histéresis magnética**

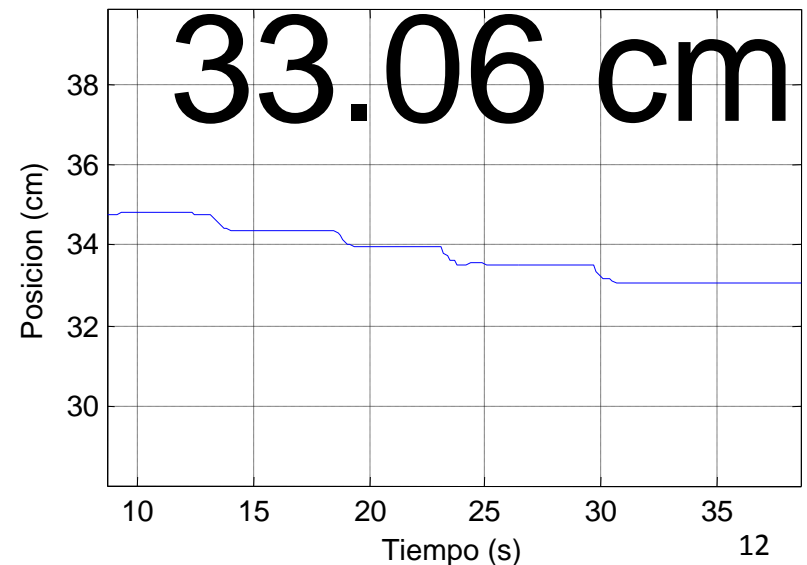
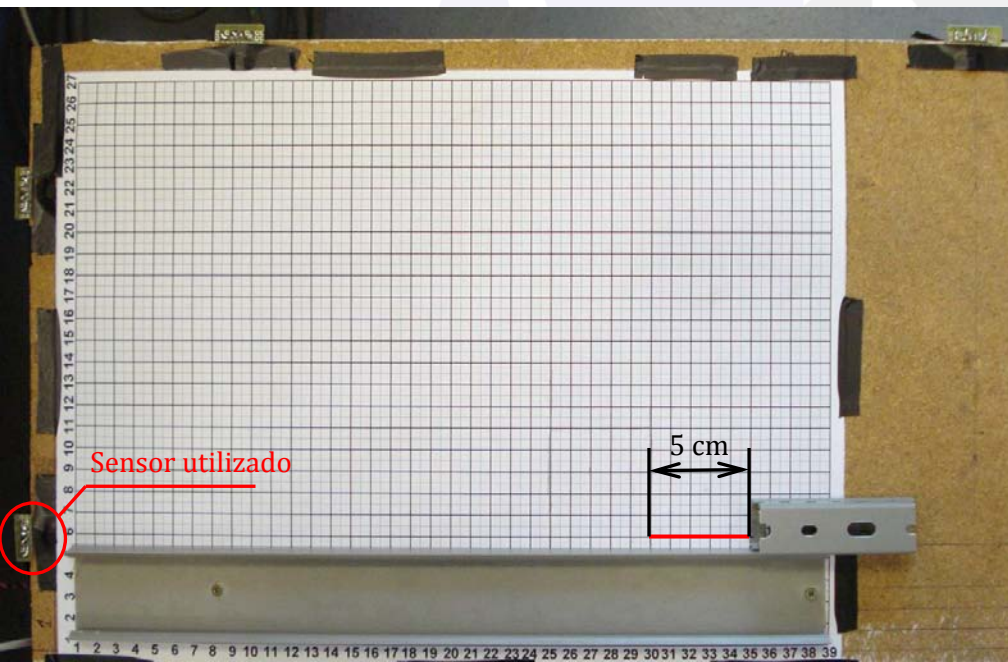


ÍNDICE

- **INTRODUCCIÓN**
- **SENSORES DE CAMPO MAGNÉTICO**
- **DETERMINACIÓN DE LA POSICIÓN**
- **IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE LEVITACIÓN MAGNÉTICA**
- **CONCLUSIONES**

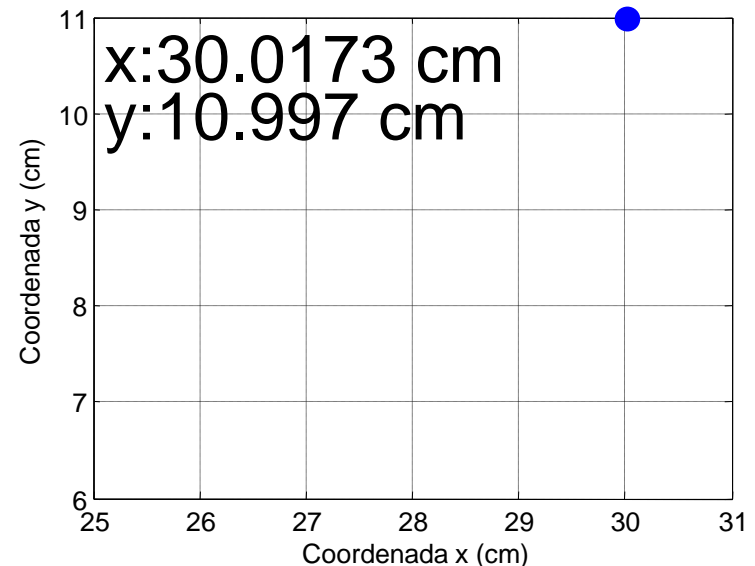
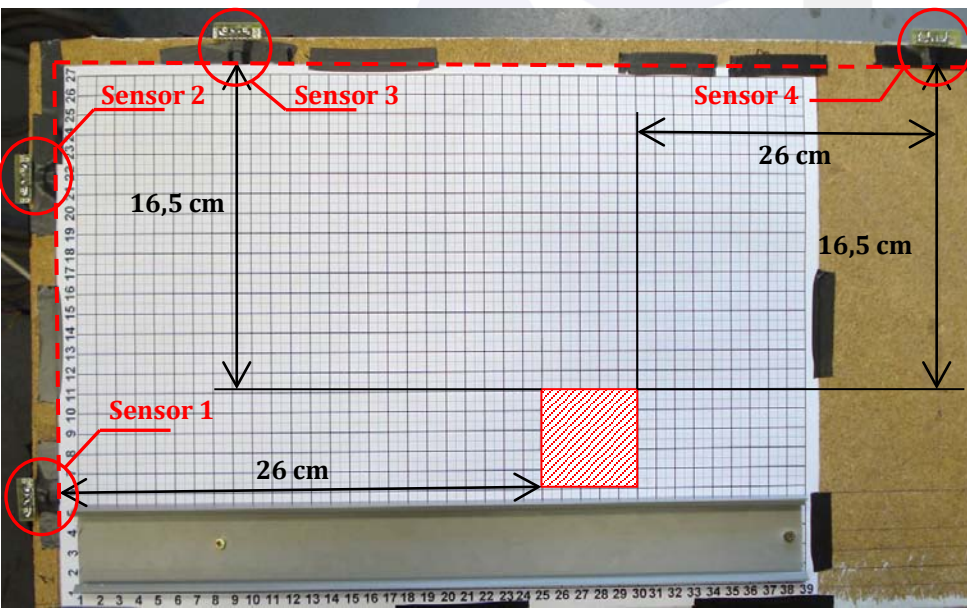
DETERMINACIÓN DE LA POSICIÓN: lineal

- Se utiliza 1 sensor
- Imán entre 30 y 35 cm de distancia del sensor
- Se obtiene un error inferior a 1 mm:
 - Error máximo: 0,6 mm
 - Error medio: 0,18 mm
 - Desviación típica: 0,19 mm



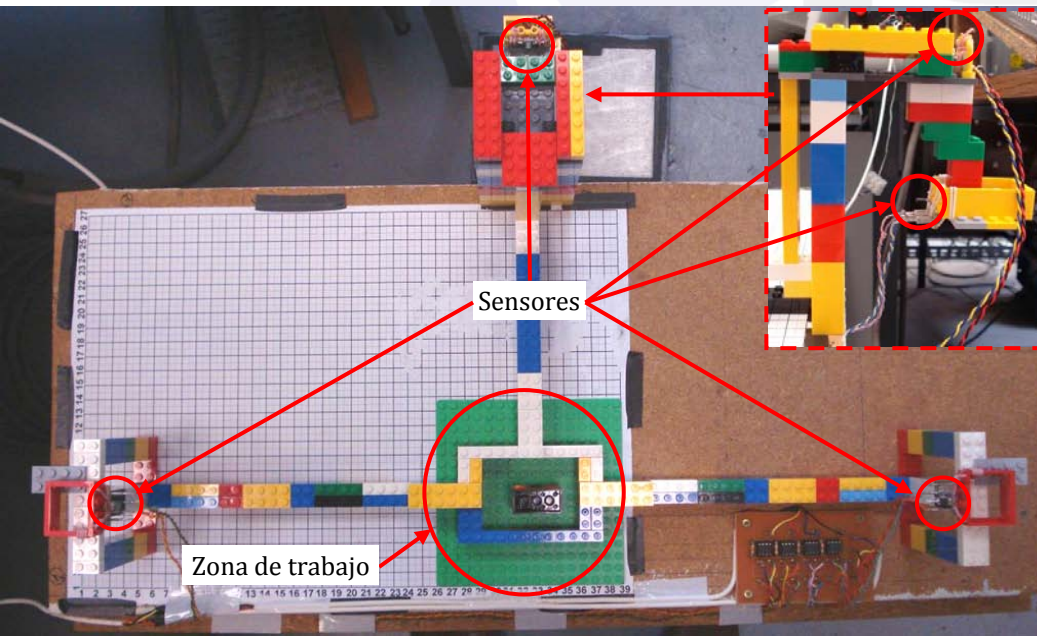
DETERMINACIÓN DE LA POSICIÓN 2D

- Se utilizan 4 sensores
- Imán a unos 26 cm de cada sensor. Se mueve en una retícula de 5x5 cm.
- Se obtiene un error inferior a 1 mm:
 - Error máximo: 0,95 mm (x) – 0,35 (y)
 - Error medio: 0,19 mm (x) – 0,14 mm (y)
 - Desviación típica: 0,16 mm (x) – 0,10 mm (y)

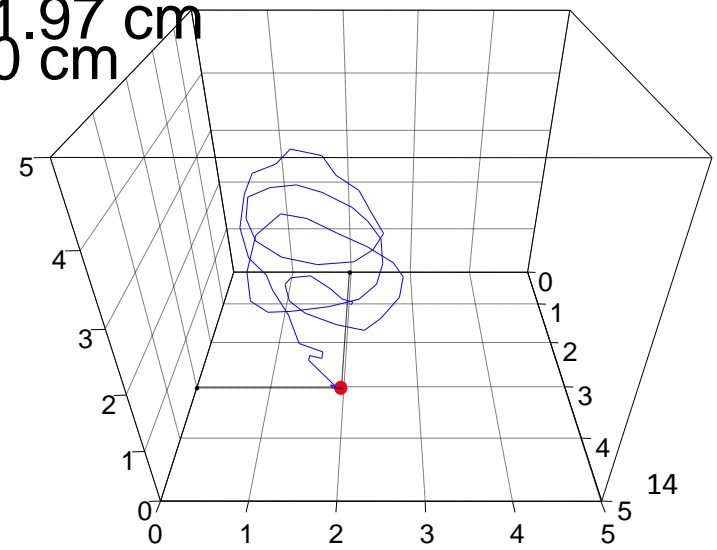


DETERMINACIÓN DE LA POSICIÓN: 3D

- Se utilizan 4 sensores
- Imán a unos 25 cm de distancia a cada sensor. Se mueve en un cubo de 5x5x5 cm.
- Se obtiene un error inferior a 1 mm:
 - Error máximo: 0,80 mm (x) – 0,12 mm (y) – 0,71 mm (z)
 - Error medio: 0,21 mm (x) – 0,34 mm (y) – 0,23 mm (z)
 - Desviación típica: 0,23 mm (x) – 0,25 mm (y) – 0,18 mm (z)

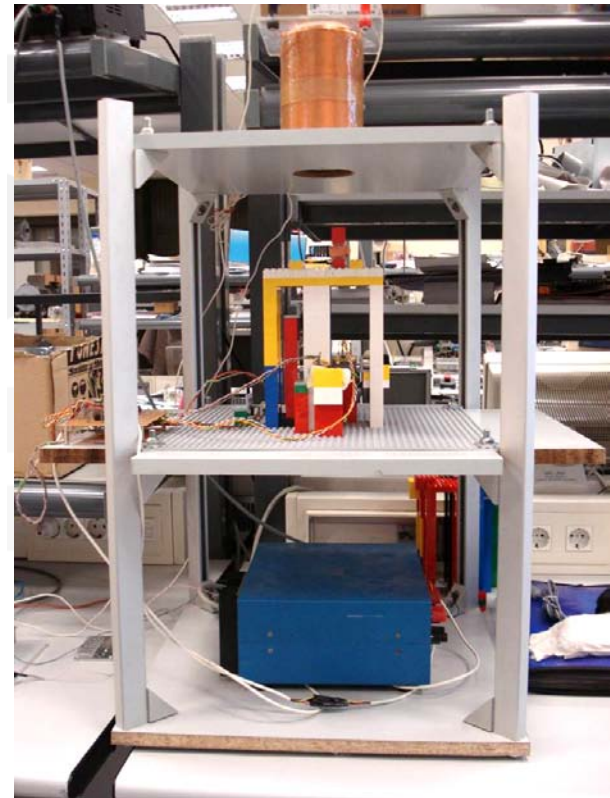
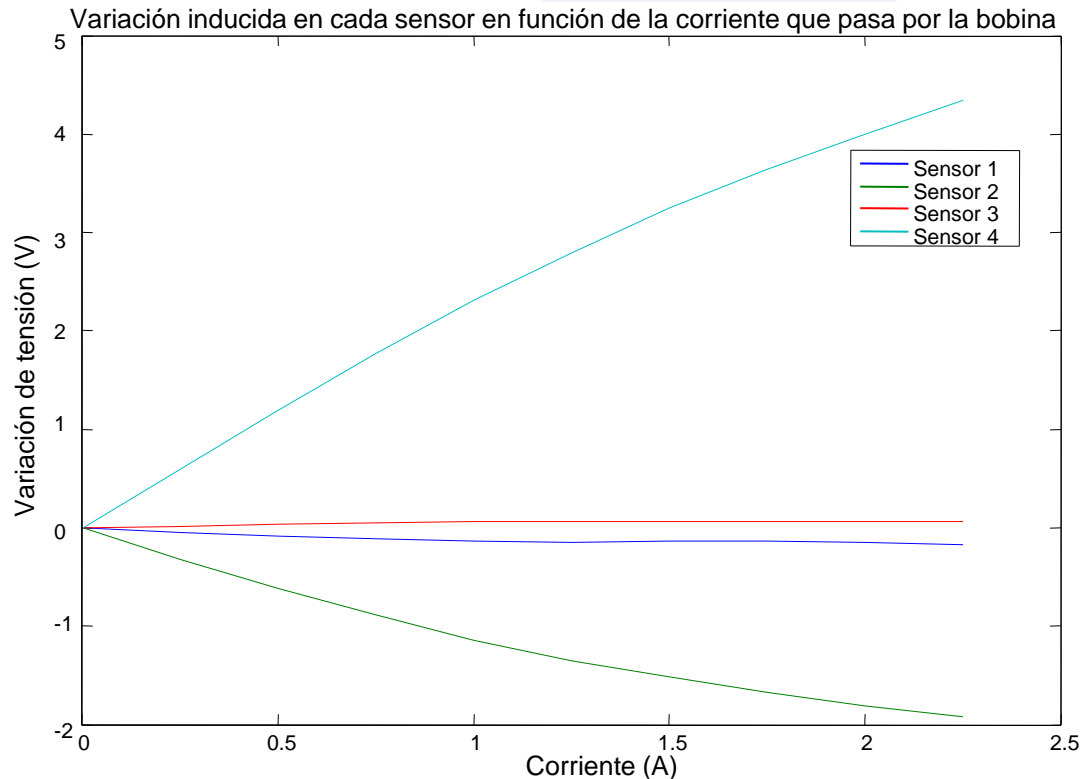


x:3.03 cm
y:1.97 cm
z:0 cm



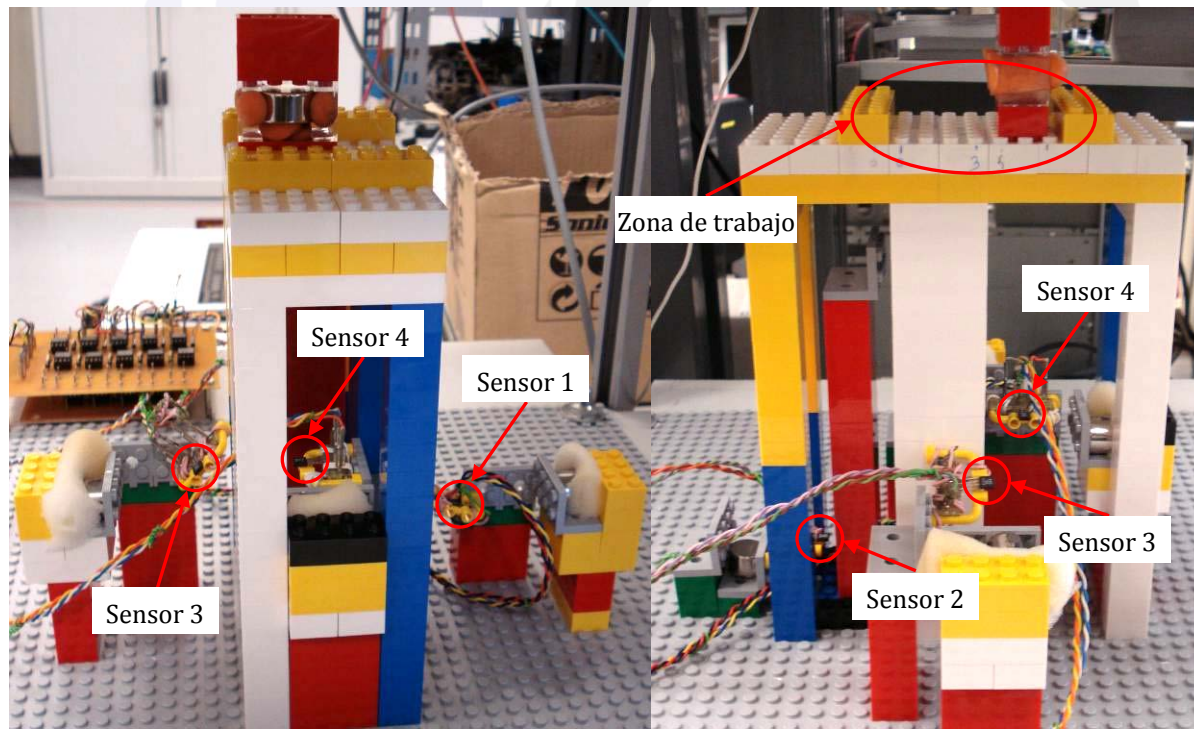
DETERMINACIÓN DE LA POSICIÓN: Desacoplo de la bobina

- Primera solución (desacoplo por software)
 - Ensayo variando la corriente de la bobina manualmente.
 - Se modela el efecto de la corriente sobre la tensión de los sensores, que se calcula y se resta antes de calcular la posición.



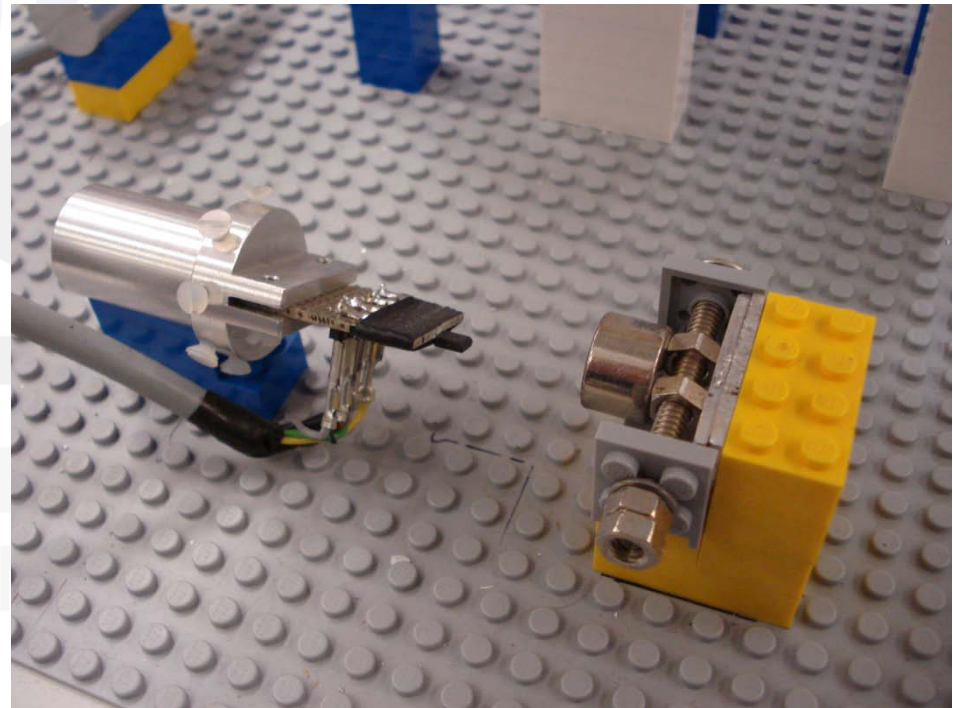
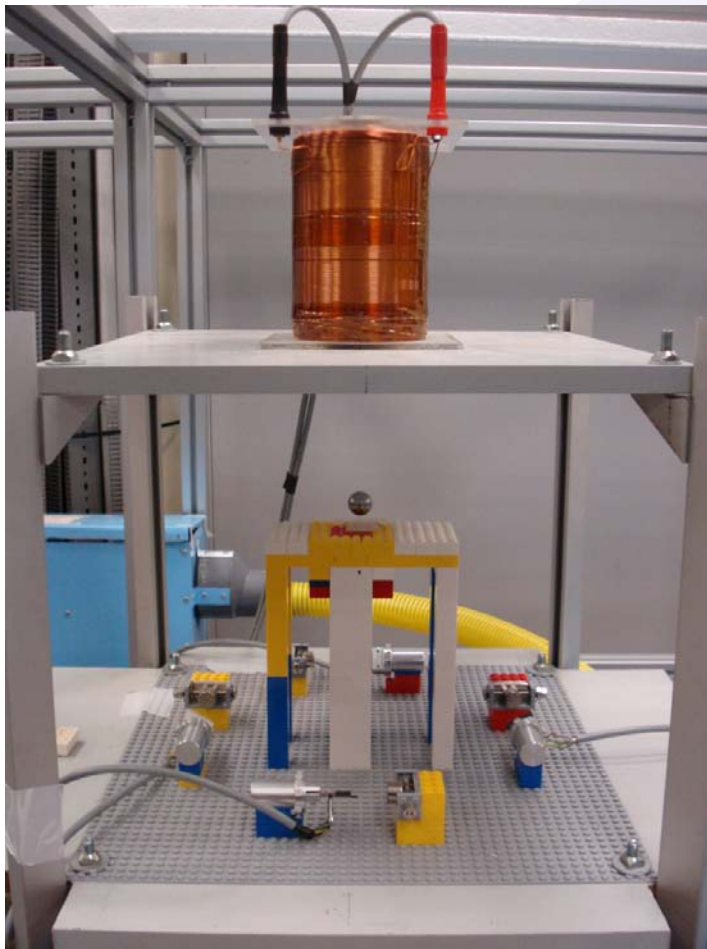
DETERMINACIÓN DE LA POSICIÓN: Desacoplo de la bobina

- Primera solución (desacoplo por software)
 - Se utilizan 4 sensores MR y uno de corriente de efecto Hall
 - Se utilizan unos imanes de ajuste de offset
 - La corriente de la bobina varía 1 A (entre 0,5 A y 1,5 A)
 - El error máximo aumenta hasta unos 4 mm.



DETERMINACIÓN DE LA POSICIÓN: Bobina

- Segunda solución (desacoplo por hardware)
 - Se orientan los sensores para no medir el campo de la bobina (mejor solución que la anterior)

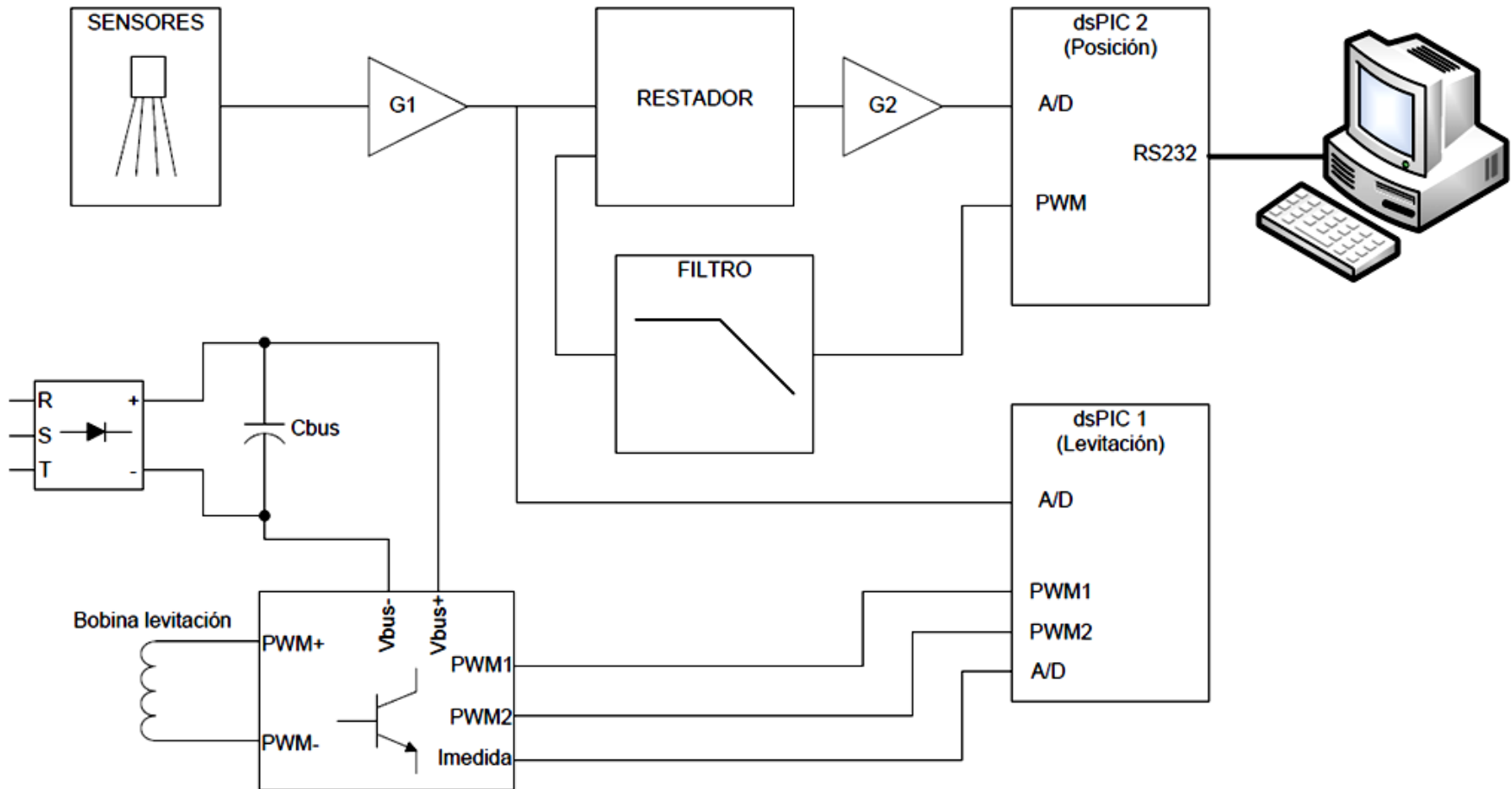


ÍNDICE

- **INTRODUCCIÓN**
- **SENSORES DE CAMPO MAGNÉTICO**
- **DETERMINACIÓN DE LA POSICIÓN**
- **IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE LEVITACIÓN MAGNÉTICA**
- **CONCLUSIONES**

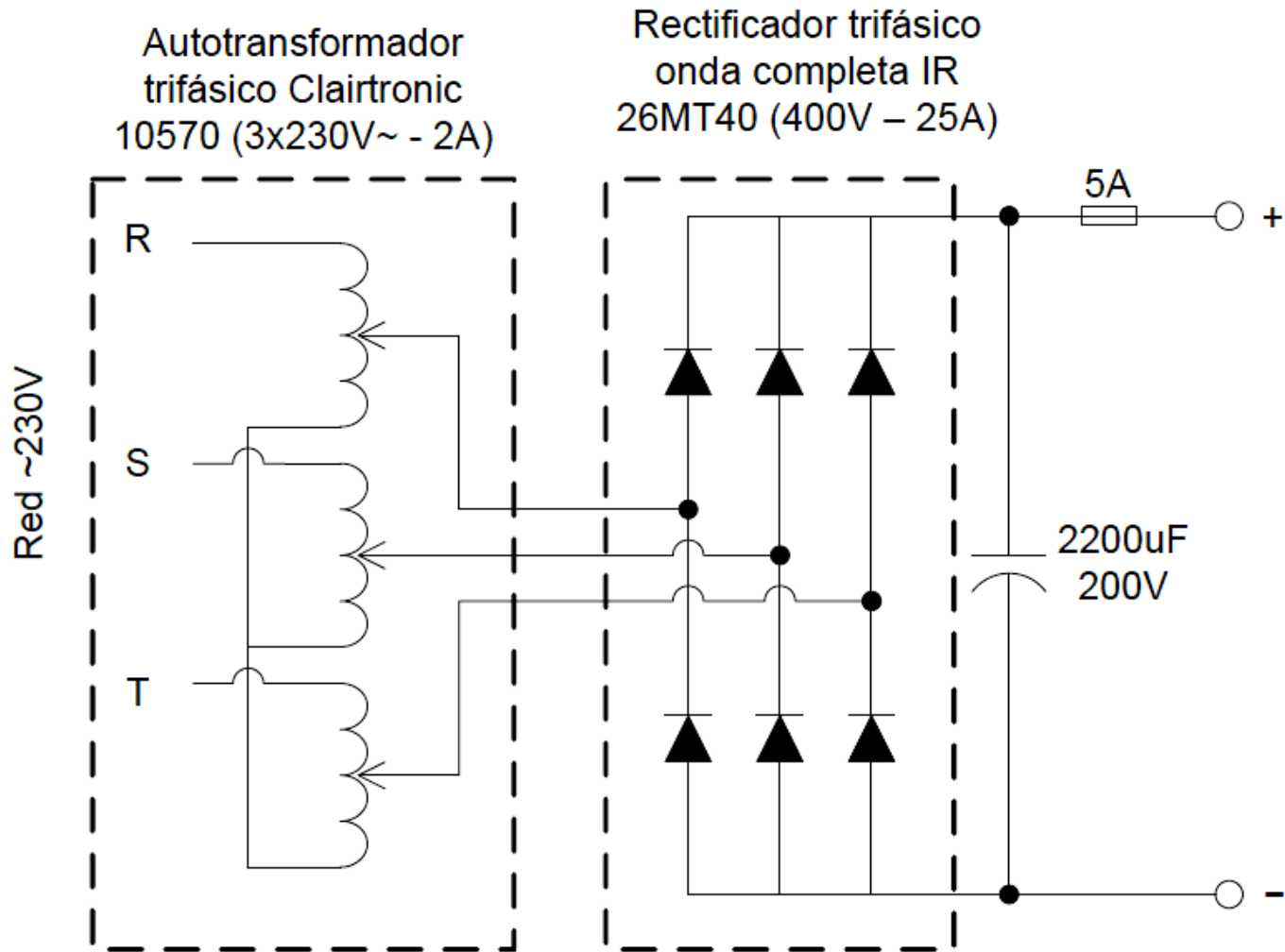
LEVITACIÓN: Descripción del sistema

- Dos subsistemas: cálculo de la posición y control de la levitación



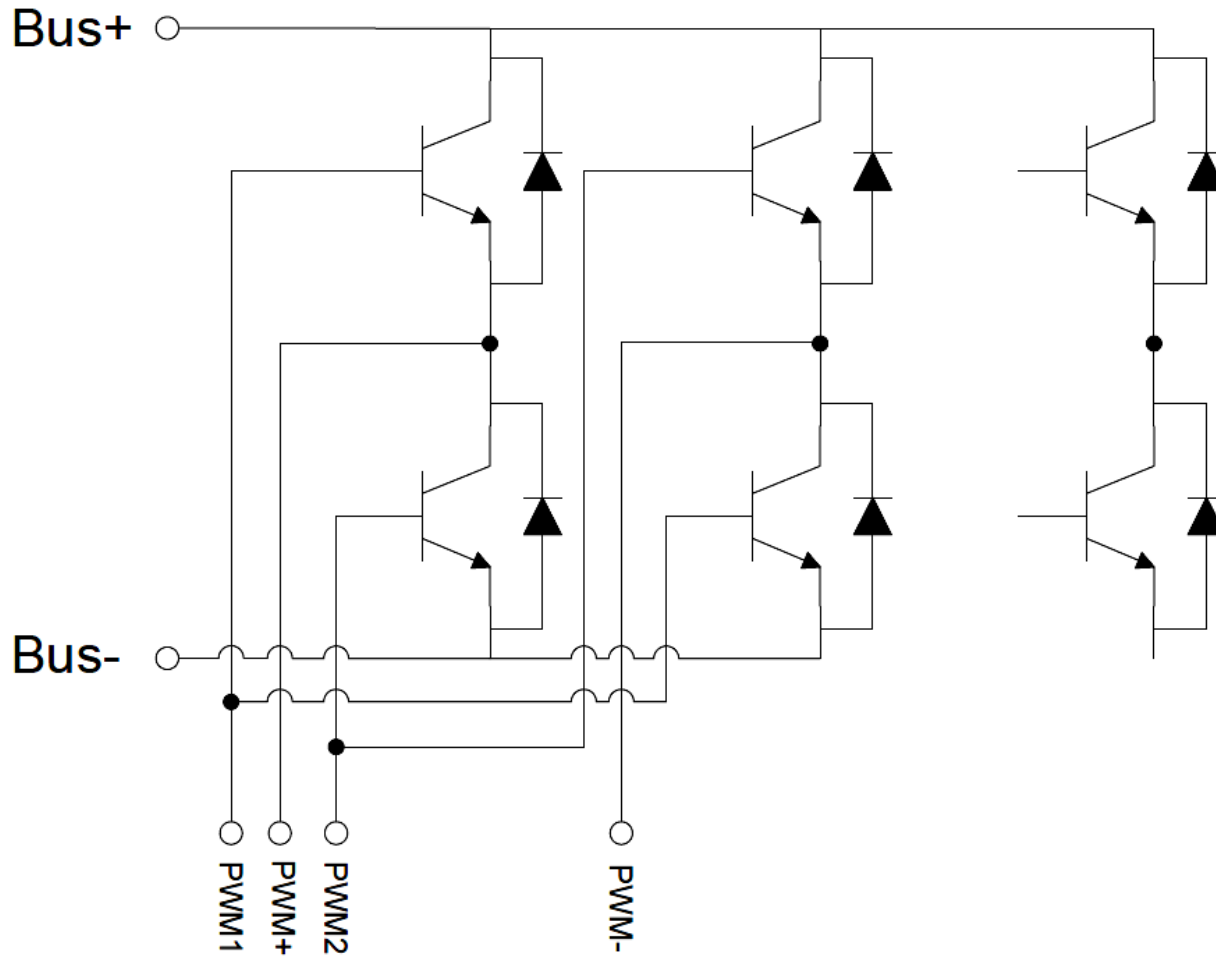
LEVITACIÓN: Fuente de bus

- Utiliza una fuente de 0V a 200V.



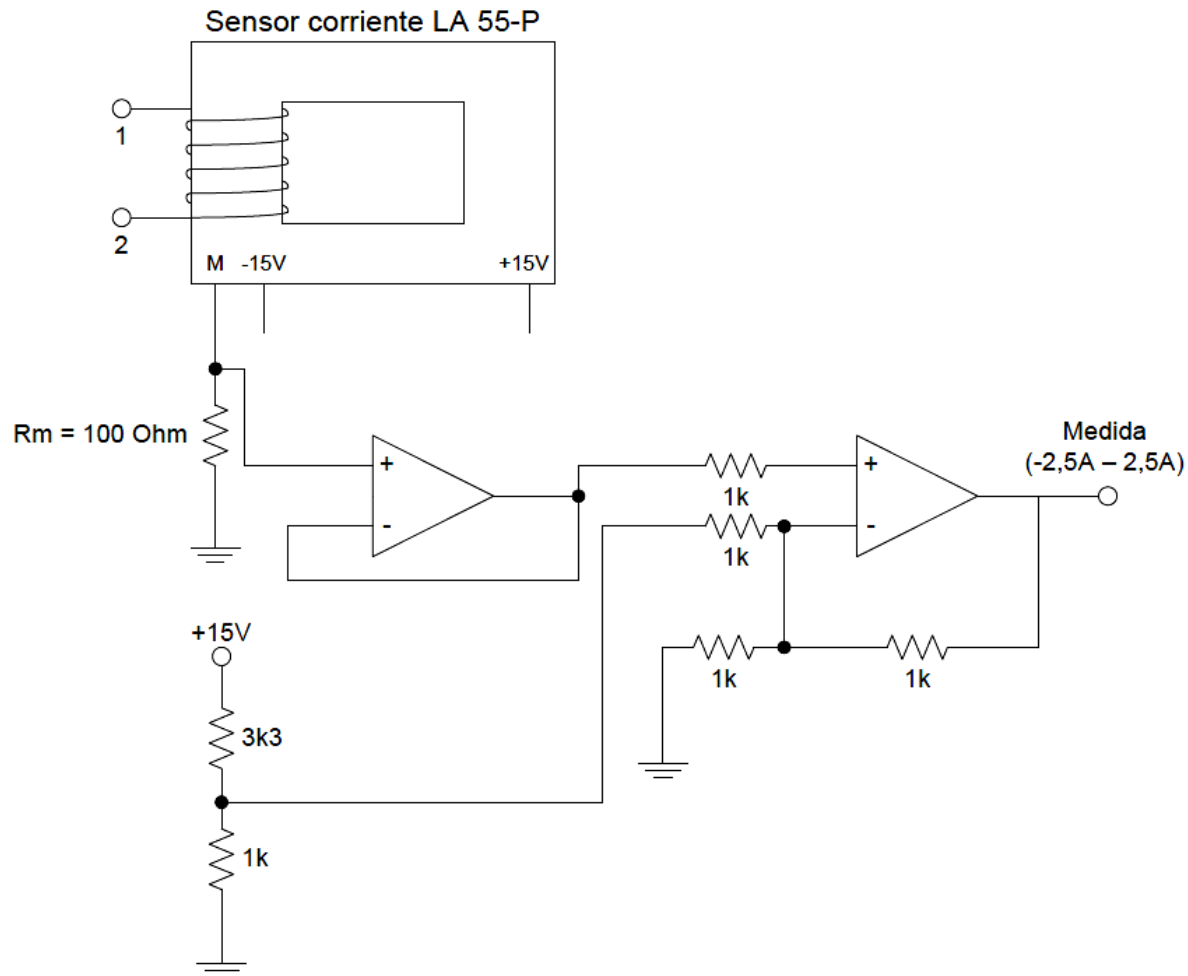
LEVITACIÓN: Inversor

- Módulo inversor IRAMX16UP60A formando un puente en H.



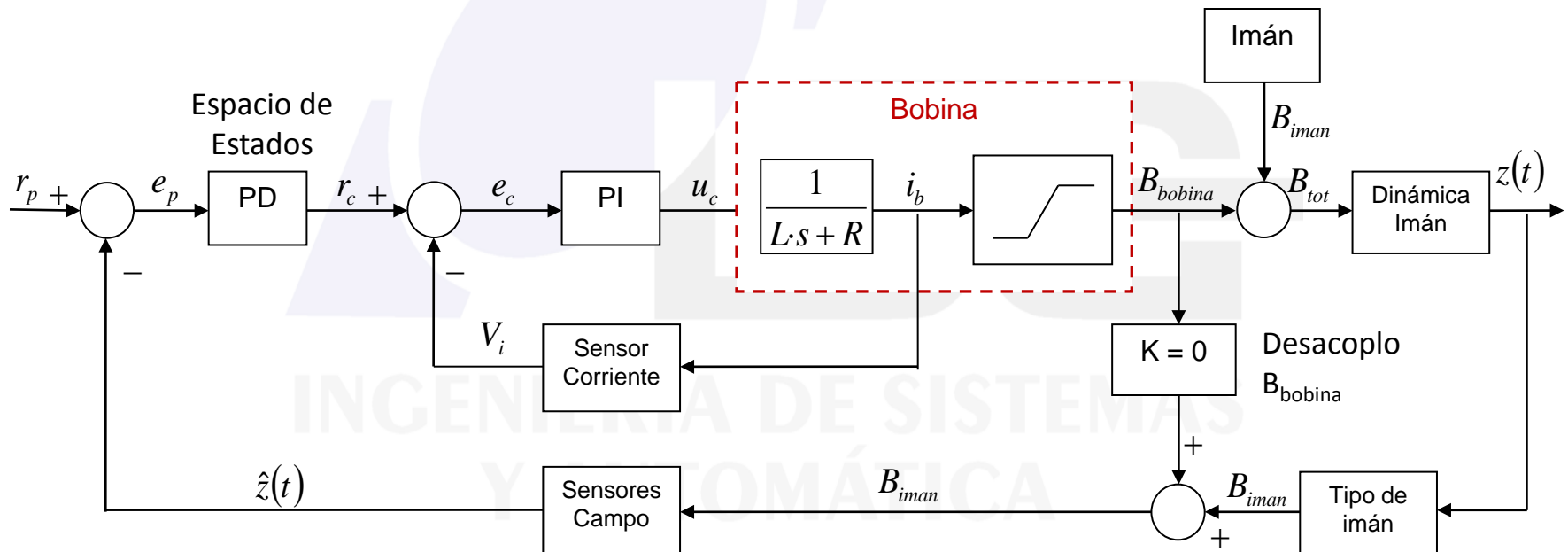
LEVITACIÓN: Medida corriente

- Medida entre $-2,5A$ y $2,5A$. Se suman $2,5V$ para medir con el dsPIC (puede medir entre $0V$ y $5V$).



LEVITACIÓN: Control cascada

- PI lazo interno de corriente (1250 Hz)
- PD modelado en **espacio de estados** del lazo externo de posición (625 Hz)



LEVITACIÓN: Posición (Espacio de estados)

- Modelo de la bobina

$$\frac{i}{u} = \frac{K_b}{s + a_b} \rightarrow i \cdot (s + a_b) = u \cdot K_b \rightarrow \boxed{\frac{di}{dt} + i \cdot a_b = u \cdot K_b \quad [1]} \rightarrow \begin{cases} a_b = \frac{R_s}{L_s} = 15,8223 \\ K_b = \frac{1}{L_s} = 0,3897 \end{cases}$$

- Sistema bobina-bola

$$\sum F = m \cdot a \rightarrow m \cdot \ddot{x} = K_i \cdot i + K_x \cdot x \rightarrow \begin{cases} K_i = \text{para } x \text{ fija, F lineal con } i \\ K_x = \text{en un rango pequeño, F lineal con } x \end{cases}$$

- Estados: corriente, posición y velocidad

$$X = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} i \\ x \\ \dot{x} \end{Bmatrix}$$

LEVITACIÓN: Posición (Espacio de estados)

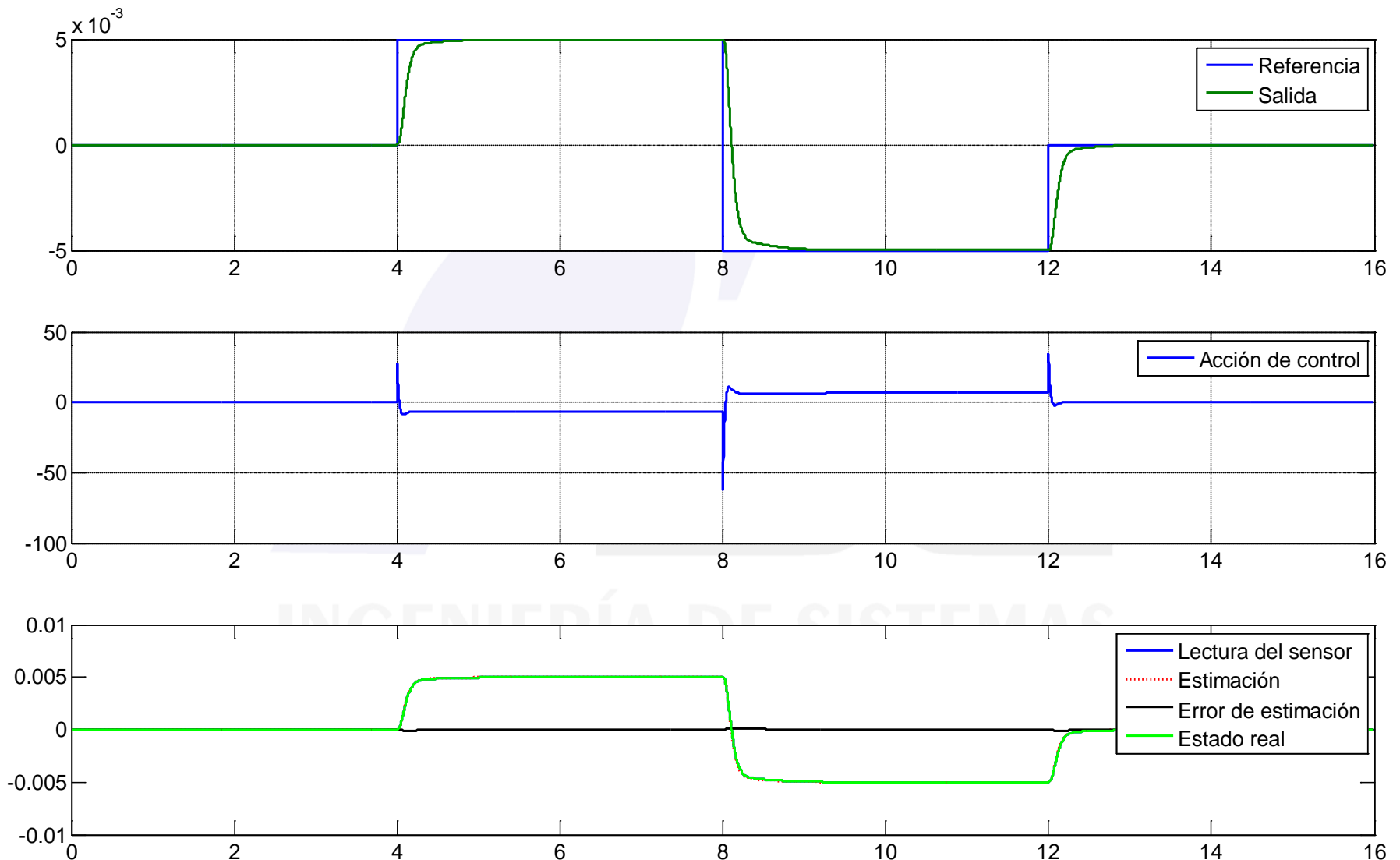
- Ecuaciones Espacio de Estados

$$\begin{aligned} \frac{dX}{dt} &= A \cdot X + B \cdot u \\ Y &= C \cdot X + D \cdot u \end{aligned} \quad Y = \begin{pmatrix} i \\ x \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{di}{dt} = -i \cdot a_b + u \cdot K_b = -x_1 \cdot a_b + u \cdot K_b \\ \dot{x}_2 = \frac{dx}{dt} = \dot{x} = x_3 \\ \dot{x}_3 = \frac{d\dot{x}}{dt} = \ddot{x} = \frac{K_i}{m} \cdot i + \frac{K_x}{m} \cdot x = \frac{K_i}{m} \cdot x_1 + \frac{K_x}{m} \cdot x_2 \end{cases} \Rightarrow \boxed{\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -a_b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{K_i}{m} & \frac{K_x}{m} & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} K_b \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot u}$$

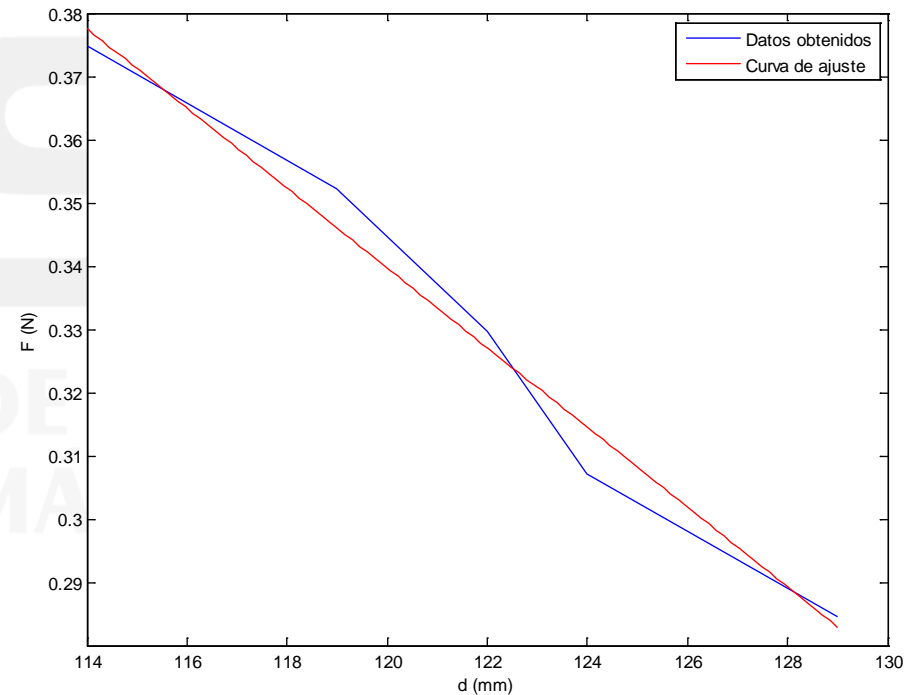
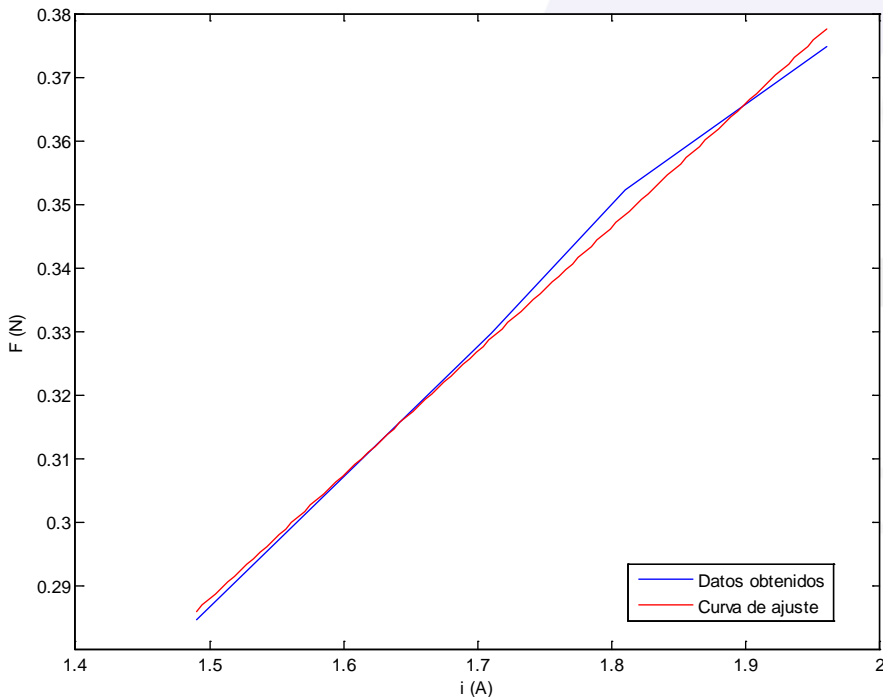
- Salidas del sistema: corriente y posición
- Observador que estima los estados
- Acción de control en función de los estados estimados y la referencia de posición

LEVITACIÓN: Posición (Espacio de estados)



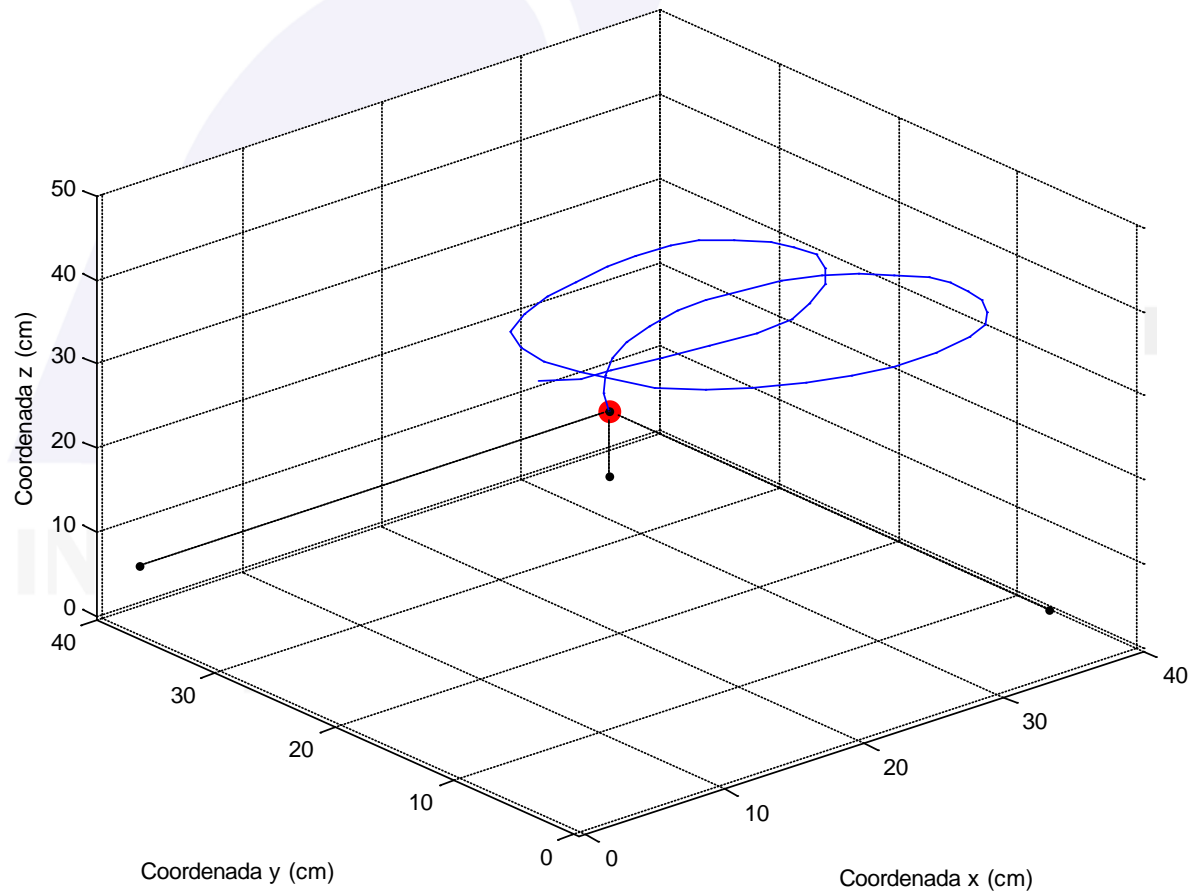
LEVITACIÓN: Modelo bobina-bola

- K_i : fuerza proporcional a la corriente para una posición
- K_x : fuerza proporcional a la distancia en un rango pequeño de alturas



LEVITACIÓN: Programa dsPIC

- dsPIC posición 3D: envío por RS232 de las coordenadas de posición al PC y visualización en Matlab



ÍNDICE

- **INTRODUCCIÓN**
- **SENSORES DE CAMPO MAGNÉTICO**
- **DETERMINACIÓN DE LA POSICIÓN**
- **IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE LEVITACIÓN MAGNÉTICA**
- **CONCLUSIONES**

CONCLUSIONES

- Buena sensibilidad de los sensores (histéresis)
- Posición 3D de un imán midiendo campo
- Implementación de un sistema de levitación magnética
- Levitación a 11 cm con buena estabilidad
- Sensores a más de 20 cm de la bola
- Ruidos electromagnéticos

FIN DE LA PRESENTACIÓN

