

Levitación Magnética

Laboratorio 4

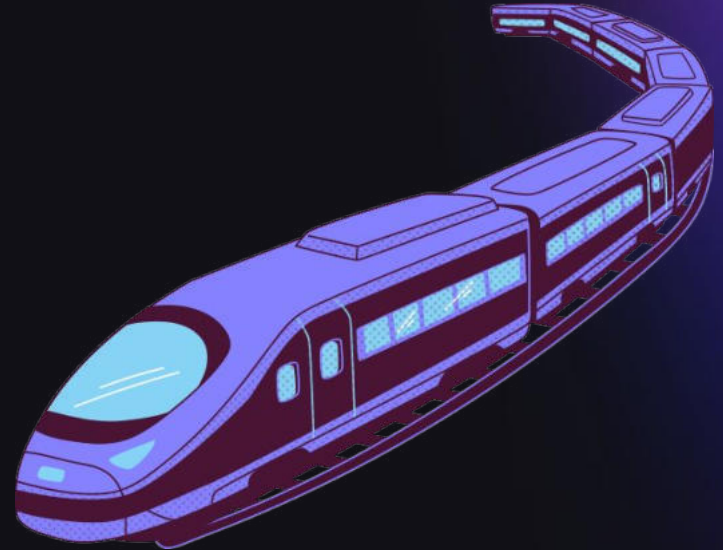
Departamento de Física, FCEyN, UBA

Julio 2025



Grupo 6:

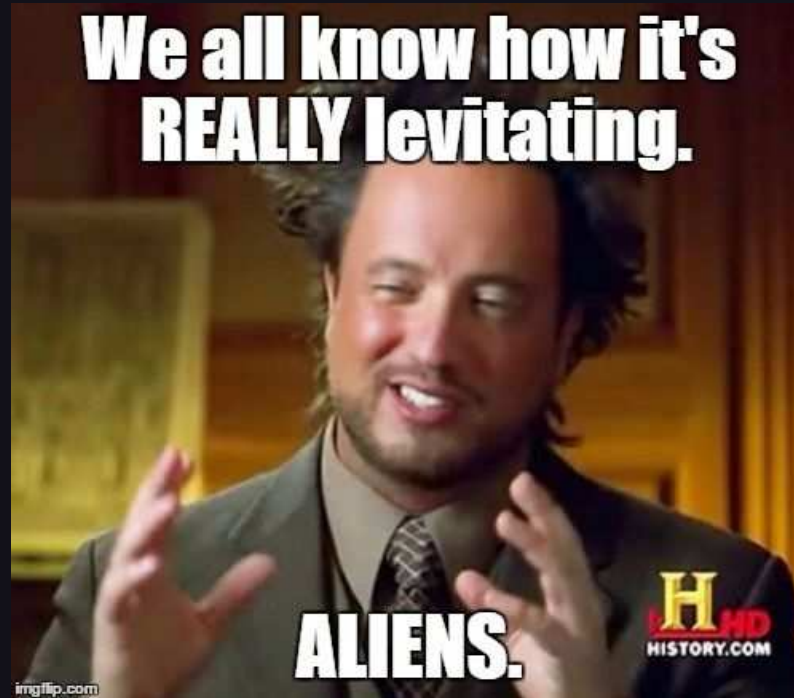
- Santiago Esteban
- Gianotti Lorenzo
- Ceffalotti Sebastián



Orden de la Presentación

1. Motivación
2. Introducción
3. Sensor Hall
4. Montaje Experimental
5. Obtención del PID
6. Resultados
7. Conclusiones

Motivación (Está bueno levitar)

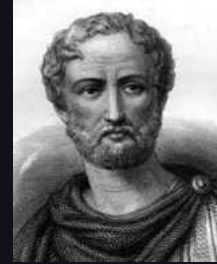


Levitación magnética

Suspensión en contra de la gravedad de un objeto utilizando únicamente campos magnéticos, sin ayuda de contacto físico directo.

Levitación magnética

Suspensión en contra de la gravedad de un objeto utilizando únicamente campos magnéticos, sin ayuda de contacto físico directo.



Plinio el Viejo, Historia
Natural 34.148, S. I

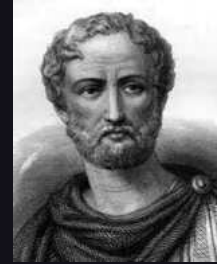


Agustín de Hipona,
La Ciudad de Dios 21.16, S. V

Levitación magnética

Suspensión en contra de la gravedad de un objeto utilizando únicamente campos magnéticos, sin ayuda de contacto físico directo.

- Relevancia práctica: Ausencia de fricción
 - Trenes MagLev
 - Rodamientos magnéticos
 - Conservación de muestras delicadas(medicina)



Plinio el Viejo, Historia Natural 34.148, S. I



Agustín de Hipona, La Ciudad de Dios 21.16, S. V



MagLev de Shanghai (431 km/h)

Introducción Teórica

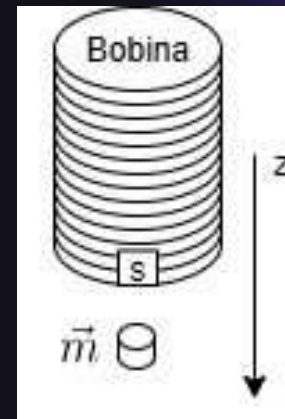
- En un material magnético:

$$\mathbf{F}_m = \mathbf{F}_g = \delta v \rho \mathbf{g}$$

$$\mathbf{F}_m = (\mathbf{m} \cdot \nabla) \mathbf{B} = \delta v \frac{\chi_m}{\mu_0} \nabla B^2 \longrightarrow \boxed{\nabla B^2 = \frac{\mu_0 \rho g}{\chi_m}} \quad \text{Condición de levitación}$$

- Para una bobina en el eje z:

$$\vec{B}(z) = \frac{\mu_0 N I}{2L} \left[\frac{z + \frac{L}{2}}{\sqrt{R^2 + \left(z + \frac{L}{2}\right)^2}} - \frac{z - \frac{L}{2}}{\sqrt{R^2 + \left(z - \frac{L}{2}\right)^2}} \right] \hat{z}$$



Teorema de Earnshaw (1812)

$$\begin{aligned} U &= -\mathbf{M} \cdot \mathbf{B} = -\chi_m \mathbf{B} \cdot \mathbf{B} \\ &= -\chi_m |\mathbf{B}|^2 ; \quad \nabla^2 |\mathbf{B}|^2 \geq 0 \end{aligned}$$



Teorema de Earnshaw (1812)

$$U = -\mathbf{M} \cdot \mathbf{B} = -\chi_m \mathbf{B} \cdot \mathbf{B}$$
$$= -\chi_m |\mathbf{B}|^2 ; \quad \nabla^2 |\mathbf{B}|^2 \geq 0$$



- Diamagnetismo: $\chi_m > 0 \longrightarrow \nabla^2 U \leq 0$
- Paramagnetismo/
Ferromagnetismo: $\chi_m < 0 \longrightarrow \nabla^2 U \geq 0$

Existen puntos de equilibrio estables

NO existen puntos de equilibrio estables

Levitación Diamagnética

- En este caso, el equilibrio magnetostático estable es posible.

Levitación Diamagnética

- En este caso, el equilibrio magnetostático estable es posible.
- Diamagnetismo es débil. Se necesitan campos magnéticos intensos.

Levitación Diamagnética

- En este caso, el equilibrio magnetostático estable es posible.
- Diamagnetismo es débil. Se necesitan campos magnéticos intensos.



Rana levitando, $B = 16\text{T}$.
Premio Ig Nobel 2010

Para el agua:

$$\chi_m \approx 10^{-5} \quad \rho \approx 1\text{g/cm}^3 \quad \xrightarrow{\nabla B^2 = \frac{\mu_0 \rho g}{\chi_m}} B \approx 10\text{T}$$

Levitación Diamagnética

- En este caso, el equilibrio magnetostático estable es posible.
- Diamagnetismo es débil. Se necesitan campos magnéticos intensos.



Rana levitando, $B = 16\text{T}$.
Premio Ig Nobel 2010

Para el agua:

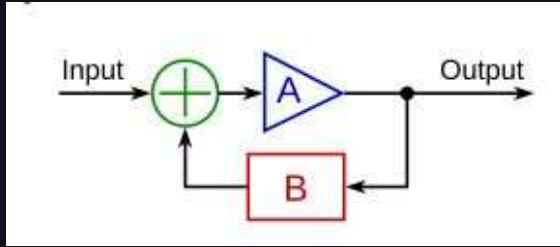
$$\chi_m \approx 10^{-5} \quad \rho \approx 1\text{g/cm}^3 \quad \xrightarrow{\nabla B^2 = \frac{\mu_0 \rho g}{\chi_m}} B \approx 10\text{T}$$



TRM, $B=1,5\text{T}$

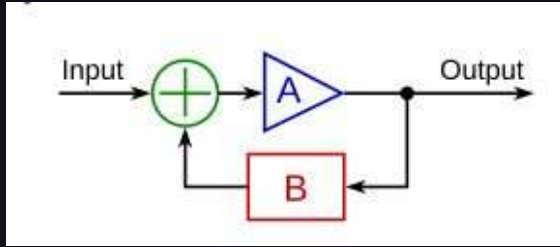
Estabilidad dinámica

Se logra usando realimentación negativa.

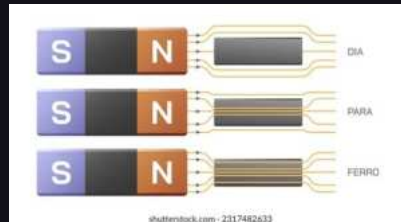


Estabilidad dinámica

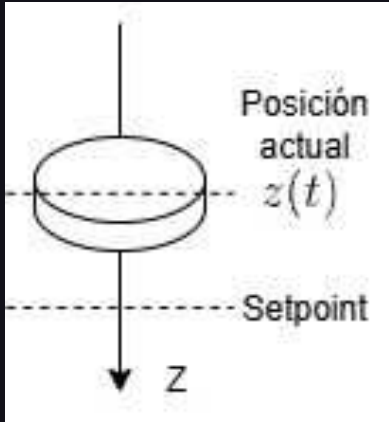
Se logra usando realimentación negativa.



Permite usar imanes permanentes, mucho mas sencillos de levantar.

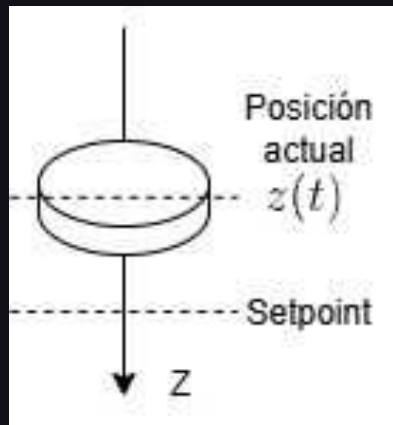


Estabilidad dinámica → PID



Se calcula el error: $e(t) = \text{setpoint} - z(t)$

Estabilidad dinámica → PID



Se calcula el error: $e(t) = \text{setpoint} - z(t)$

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D \frac{de(t)}{dt}$$

Ajusta la señal de manera proporcional al error.

Acumula y compensa el error en estado estacionario

Se opone a cambios bruscos en el error, amortigua.

Estabilidad dinámica → PID

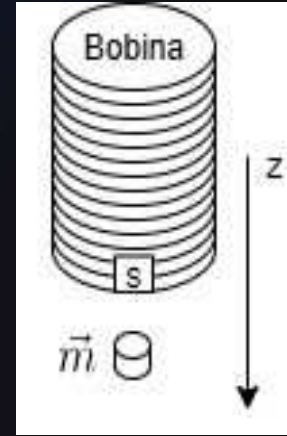
$$\text{Error: } e(t) = \textit{setpoint} - z(t)$$

**¿Pero cuál es la señal de control,
y cómo se calcula el error?**

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D \frac{de(t)}{dt}$$

Sensor Hall

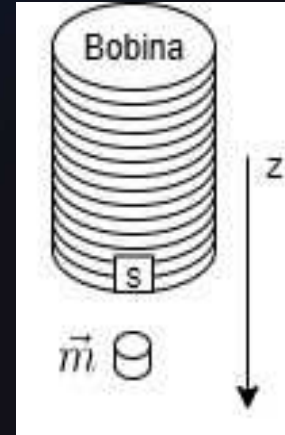
El sensor Hall mide el campo total: $B_{\text{total}} = B_{\text{imán}} + B_{\text{bobina}}$



Sensor Hall

El sensor Hall mide el campo total: $B_{\text{total}} = B_{\text{imán}} + B_{\text{bobina}}$

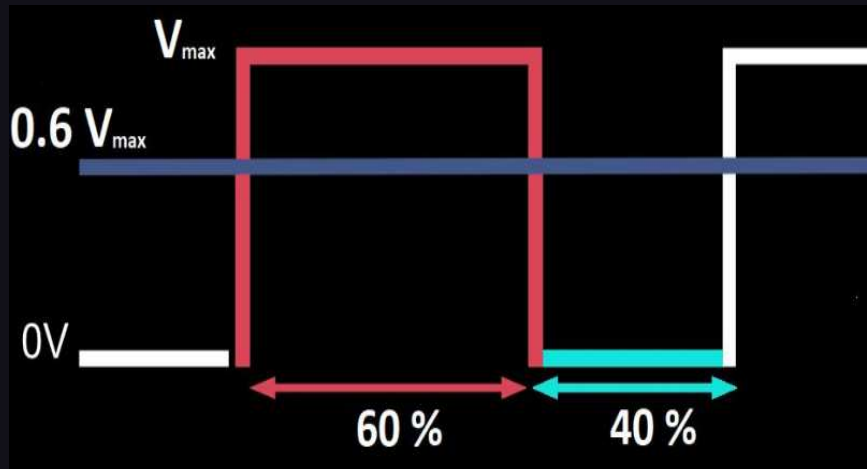
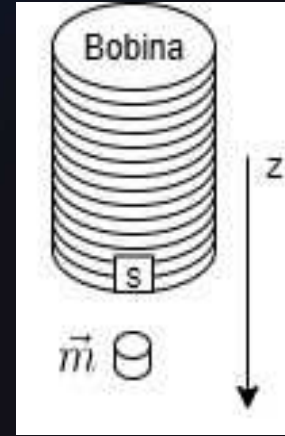
La altura del sensor es fija: $B_{\text{bobina}} = B_{\text{bobina}}(z, I)$



Sensor Hall

El sensor Hall mide el campo total: $B_{\text{total}} = B_{\text{imán}} + B_{\text{bobina}}$

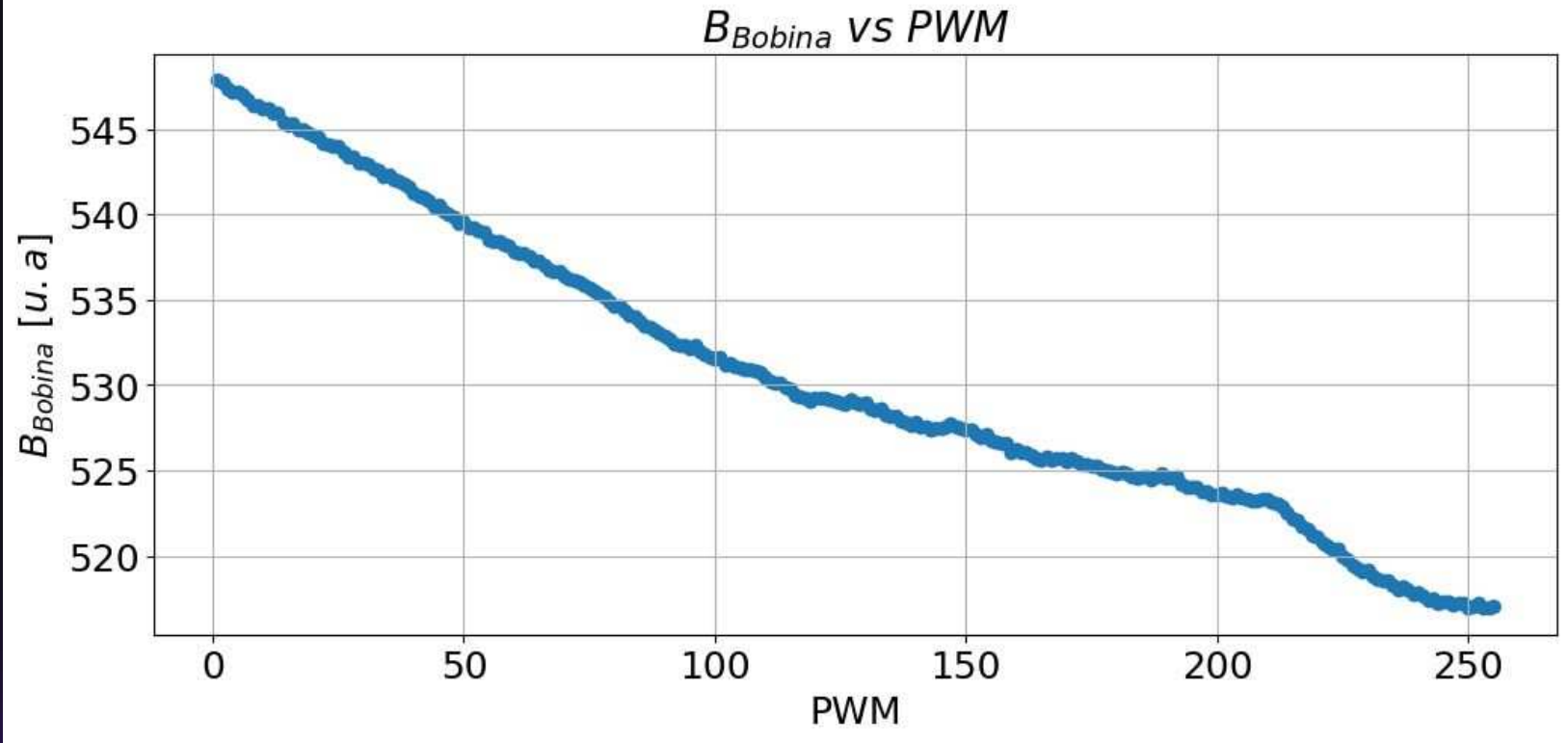
La altura del sensor es fija: $B_{\text{bobina}} = B_{\text{bobina}}(z, I)$



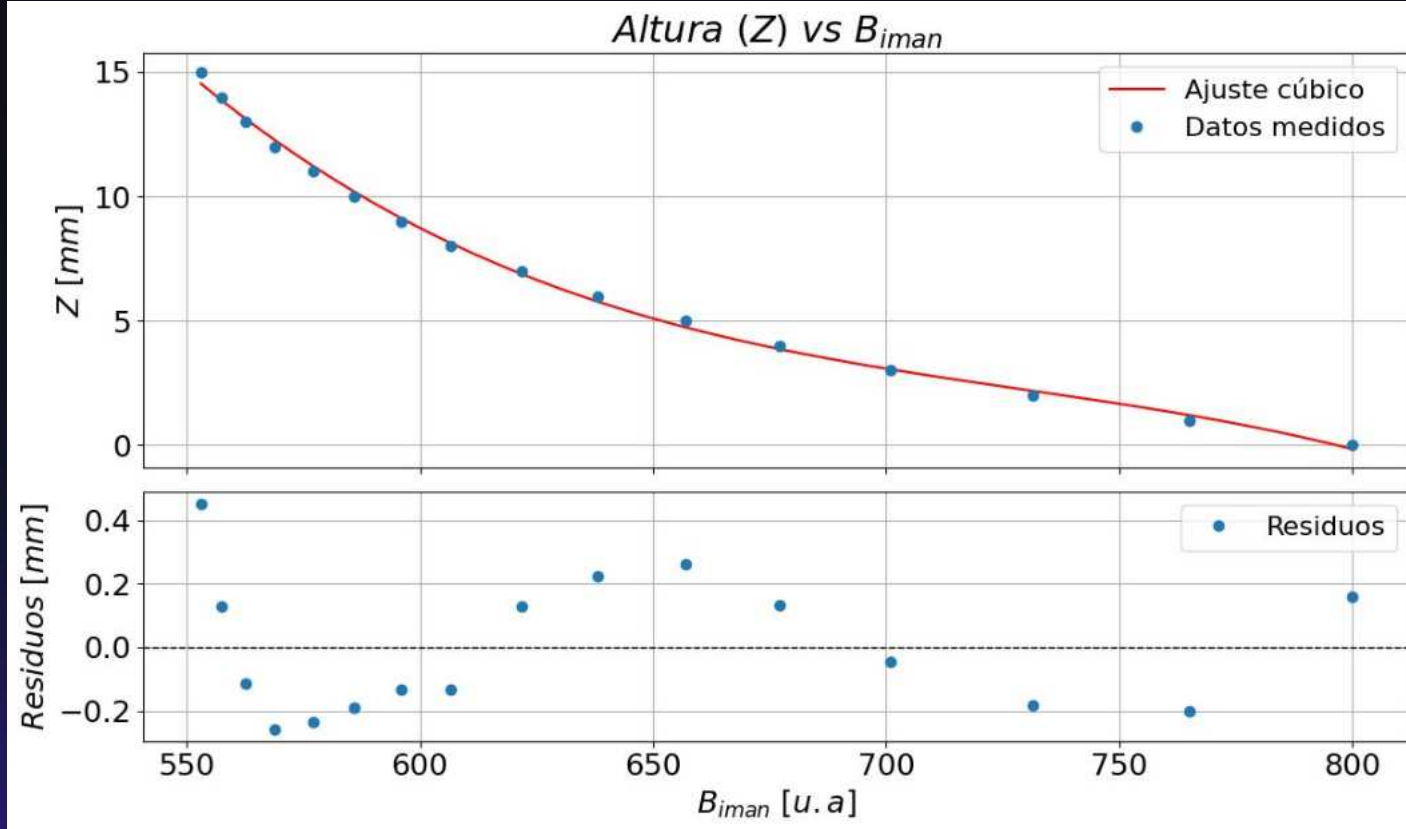
$$\langle V_{\text{out}} \rangle = \text{PWM} \cdot V_{\text{max}}$$

$$B_{\text{bobina}}(I) = B_{\text{bobina}}(\text{PWM})$$

Usamos pwm como señal de control, pues regula la corriente media.



Se puede obtener entonces: $B_{imán} = B_{total} - B_{bobina}$

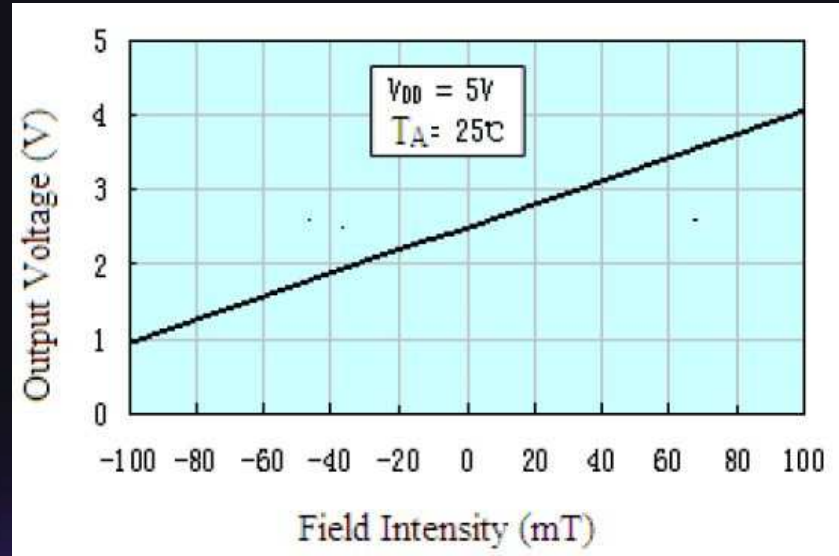


Se puede determinar: $z(B_{imán})$ y así obtener el error.

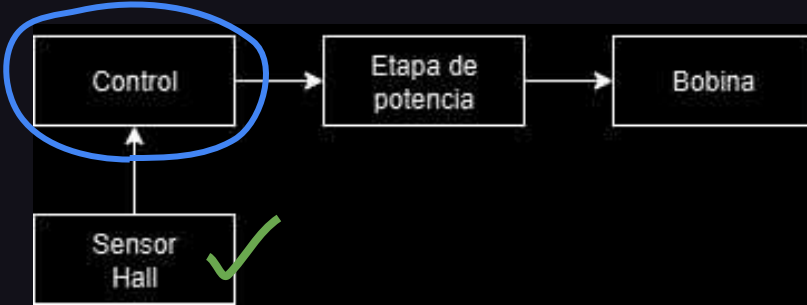
Montaje Experimental



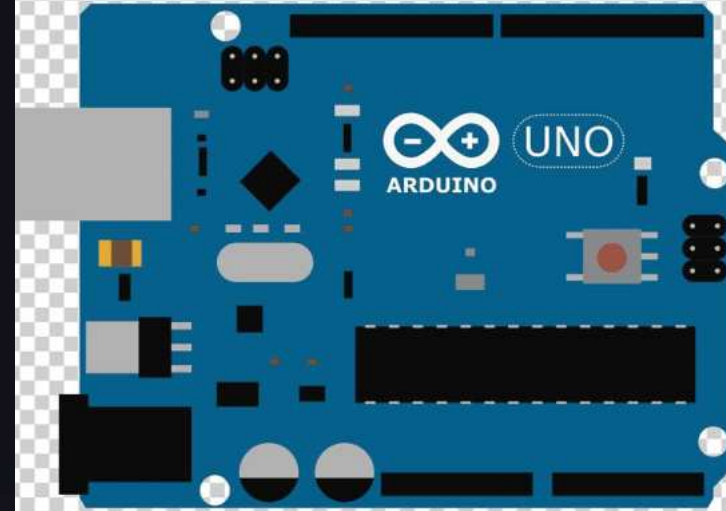
Sensor hall ss49e, respuesta lineal con la intensidad del campo.



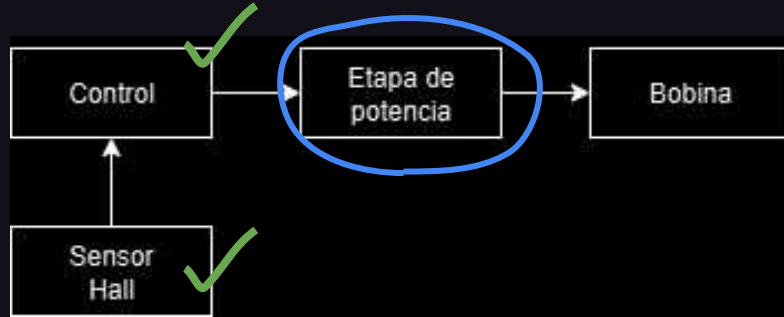
Montaje Experimental



Arduino Uno:
Lee el sensor hall y controla el PWM

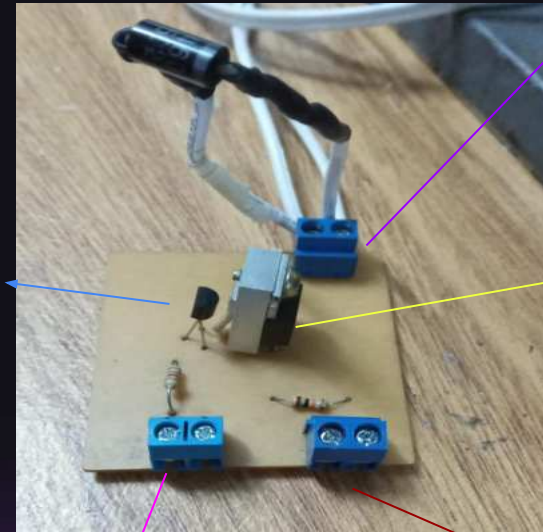


Montaje Experimental



El PWM alimenta el transistor 2n2222, que al recibir un estado alto actúa como llave y conduce. Genera que el transistor mosfet deje de conducir, y viceversa. Es una etapa inversora!

Transistor 2n2222



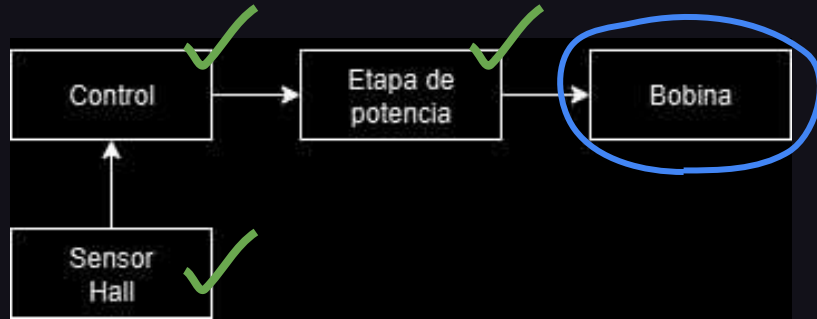
A la bobina

Mosfet IRF540N

PWM

Fuente

Calibración Sensor Hall



Bobina:

$N = 1041$,

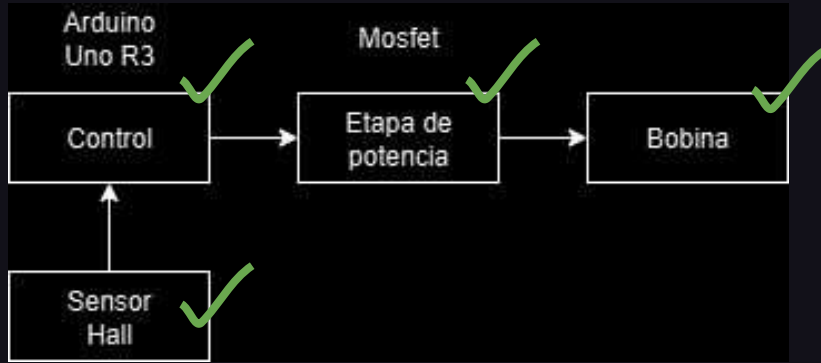
$R = 4.32 \text{ ohm}$

diámetro de 0.8 mm

Se utilizaron 12 V

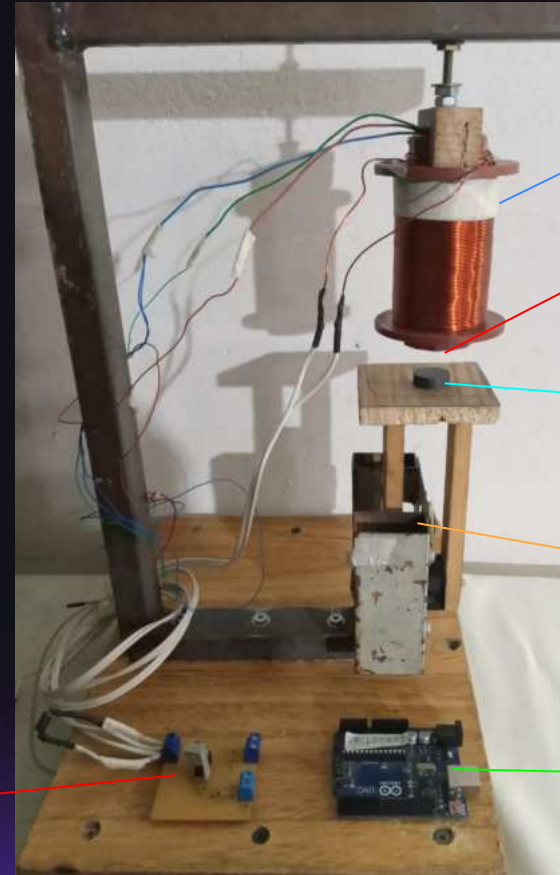


Montaje experimental



El ciclo de retroalimentación duraba alrededor de 12 a 13 ms o unos 83 Hz.

Etapa de potencia



Bobina

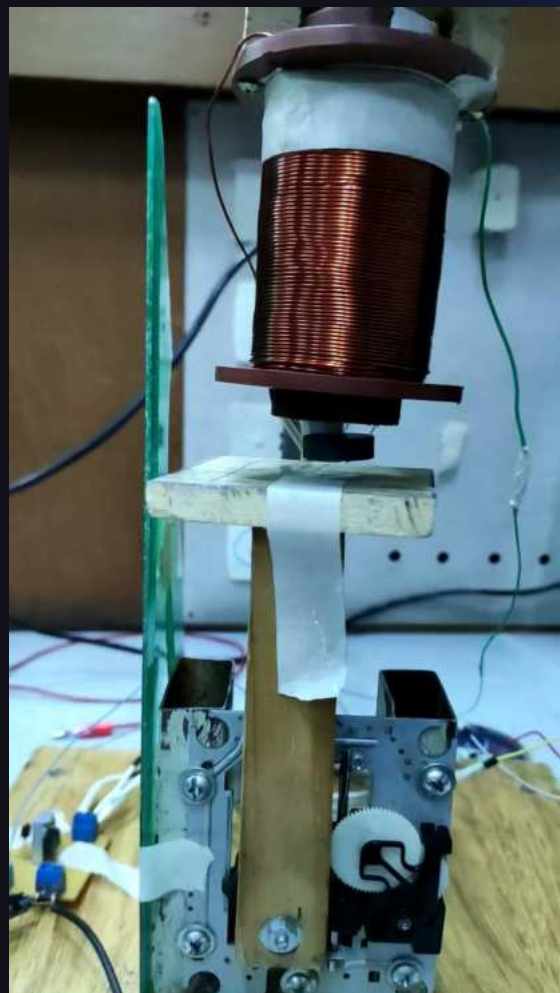
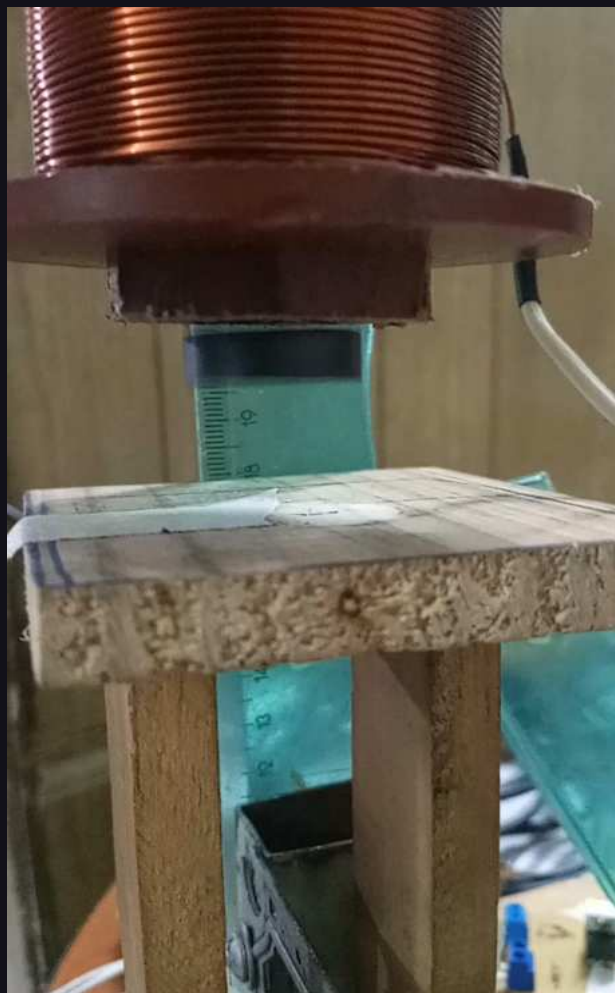
Sensor hall

Imán

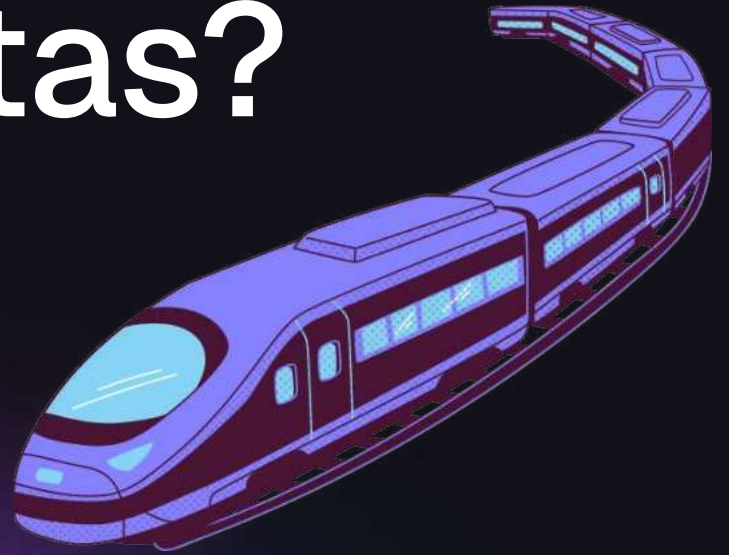
Riel

Control

Resultados



¿Preguntas?



```
// Calibracion del campo de la bobina
const float B_bobina[256] = {547.8500, 547.7000, ..., 517.0500, 517.0000};
// Calibracion de la distancia en funcion del campo del iman
const float a = 740.8619;
const float b = -3.04238;
const float c = 0.00421184;
const float d = -0.00000195874;
// Funcion para calcular la distancia
float getDist(){
    // Lectura del sensor hall
    B_total = analogRead(PIN_HALL);
    // B_iman = B_total - B_bobina. Se agrega 517 que es campo nulo
    B_iman = 517 + B_total - B_bobina[pwm];
    distancia = ((d * B_iman + c) * B_iman + b) * B_iman + a;
    return distancia;
}
```

```
void pid_update(void){
    distancia = getDist();
    error = setpoint - distancia;
    // ERROR INTEGRAL
    error_integral += error * redu_ki;
    // Se agrega un "wind up"
    if (error_integral > 255) error_integral = 255;
    else if (error_integral < -255) error_integral = -255;
    // ERROR DERIVATIVO
    error_derivativo = redu_kd * (error - error_anterior);
    //ERROR PROPORCIONAL
    error_proporcional = redu_kp * error;
    // PID completo
    salida = error_proporcional + error_integral + error_derivativo;
    // Limitar PWM y convertir a entero
    if (salida > 255) salida = 255;
    else if (salida < 0) salida = 0;
    pwm = roundf(salida);
    analogWrite(PIN_PWM, pwm);
}
```