



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE  
**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

**INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN**

**Trabajo de Titulación, previo a la obtención del Título de Ingeniero  
en Electrónica e Instrumentación**

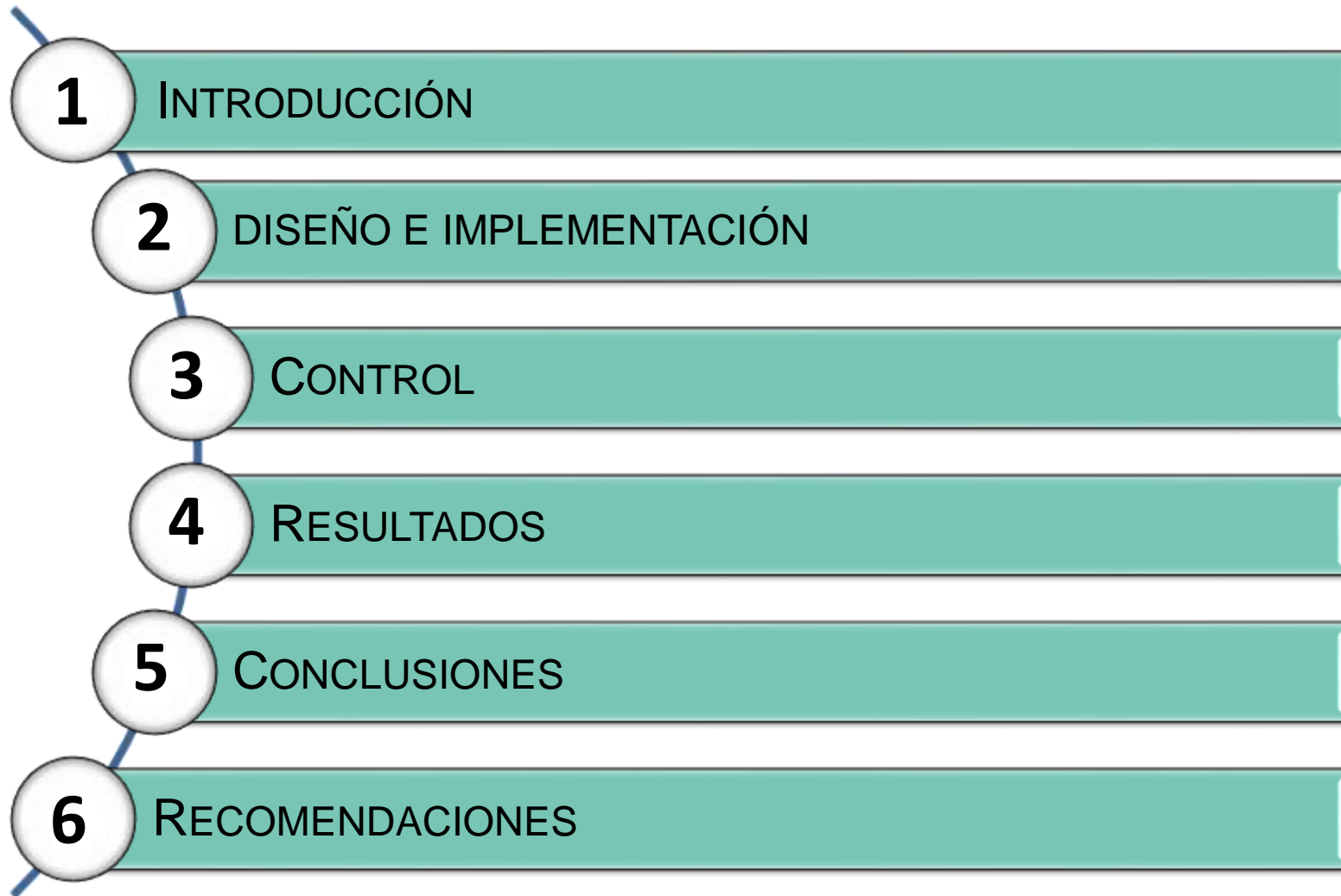
**Levitador magnético para evaluar algoritmos clásicos y modernos, mediante  
dispositivos de bajo costo**

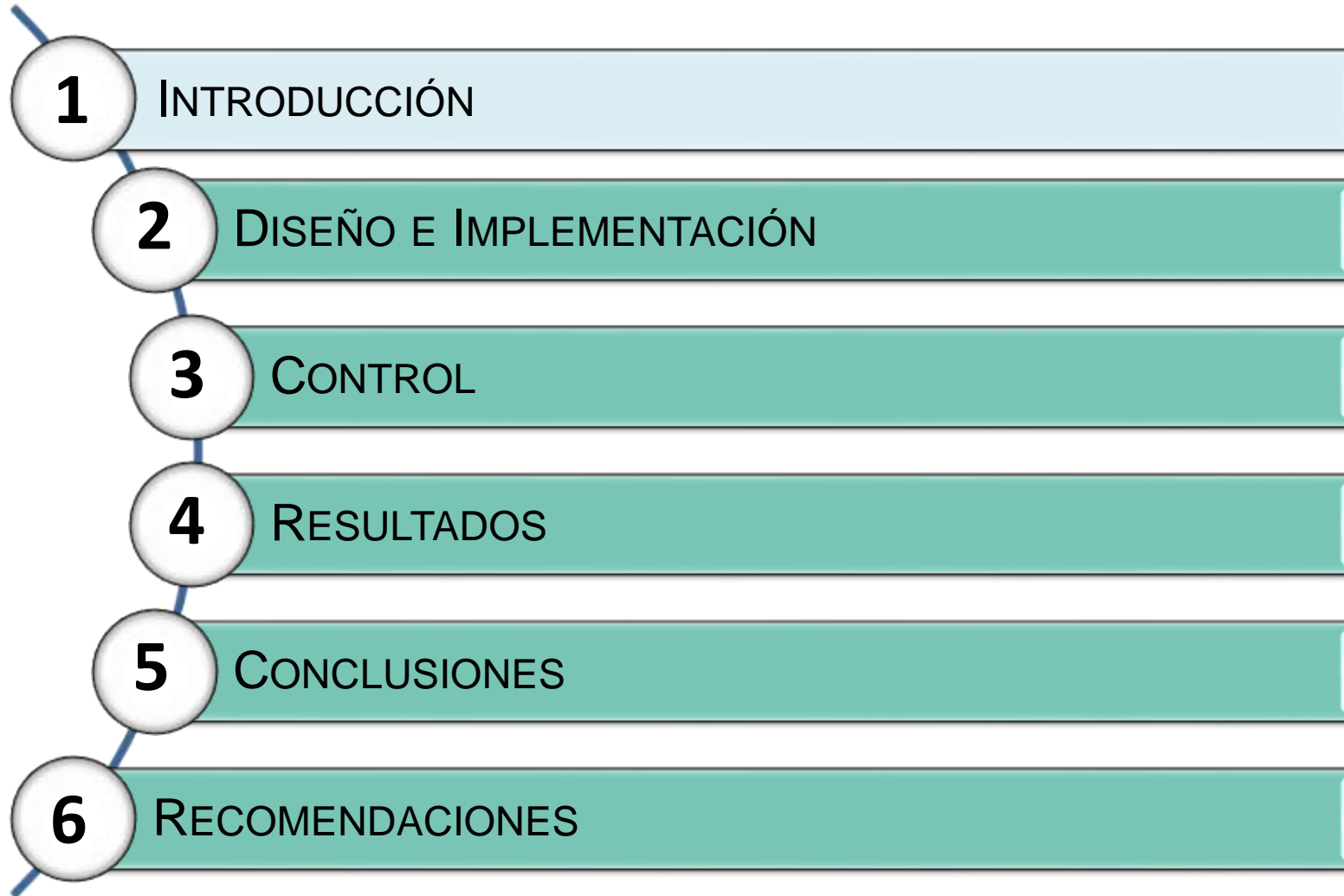
**Autores:**

Aldana Tapia, Jair Alexander  
Tipantuña Lovato, María Daniela

Ing. Pilatasig Panchi Marco Antonio, **Director**

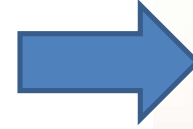
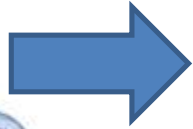






# INTRODUCCIÓN

## ANTECEDENTES



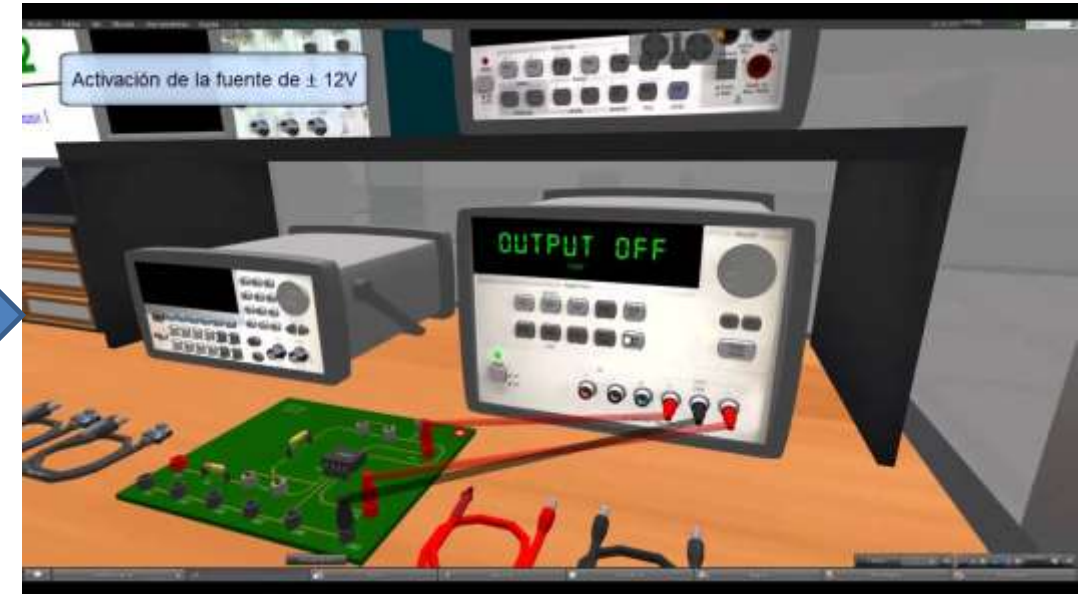
**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# INTRODUCCIÓN

## ANTECEDENTES



## Planteamiento del problema



# INTRODUCCIÓN

## ANTECEDENTES

## Planteamiento del problema



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# INTRODUCCIÓN

## ANTECEDENTES



## Justificación



# INTRODUCCIÓN

## OBJETIVO GENERAL

Implementar un levitador magnético para evaluar algoritmos de control clásicos y modernos, mediante dispositivos de bajo costo.

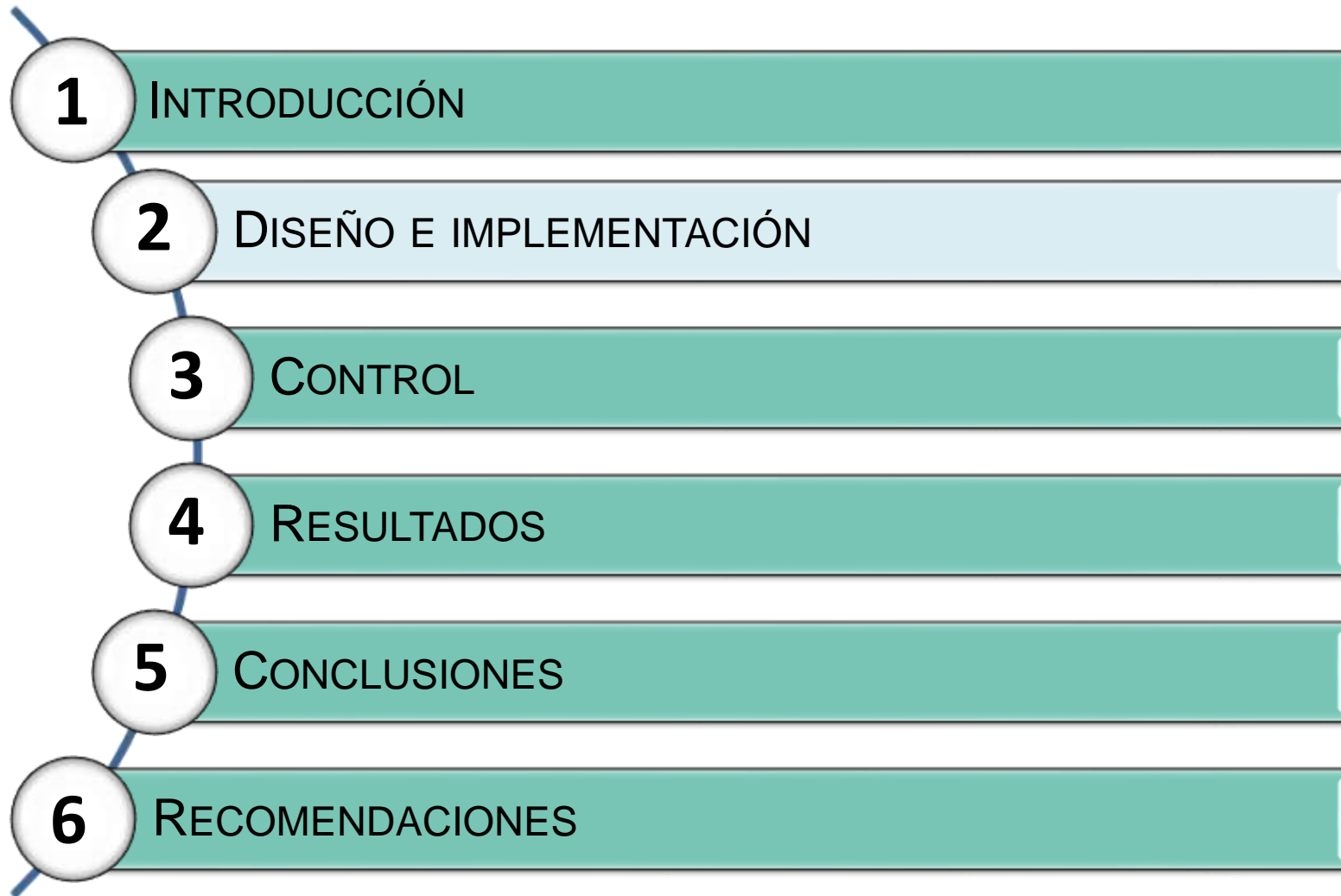


# INTRODUCCIÓN

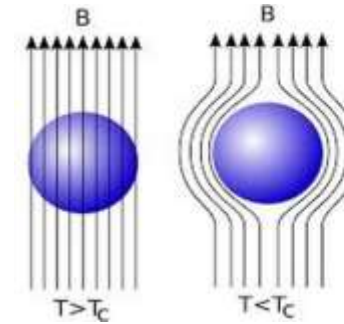
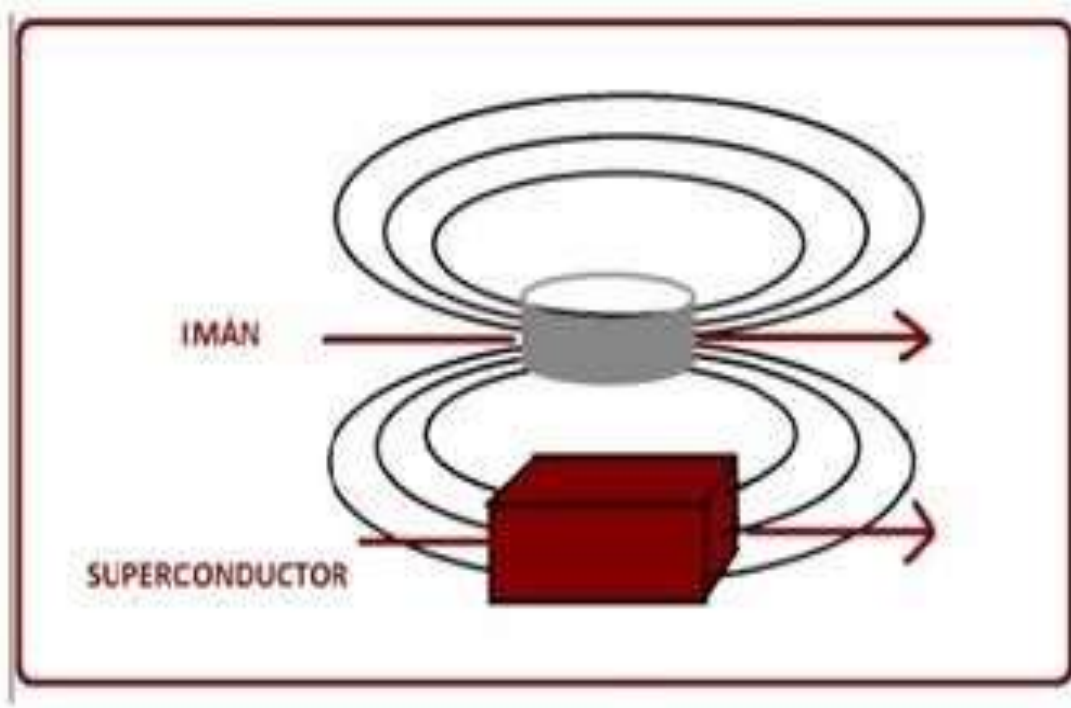
## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar acerca de las características y principios de funcionamiento de los campos magnéticos generados por los electroimanes para una correcta levitación.
- Investigar sobre algoritmos de control clásicos y modernos.
- Diseñar e implementar un prototipo de un sistema de levitación magnética.
- Obtener el modelo matemático del sistema de levitación magnética.
- Desarrollar algoritmos de control para evaluar el comportamiento de la planta.
- Analizar los resultados obtenidos al aplicar los algoritmos de control.

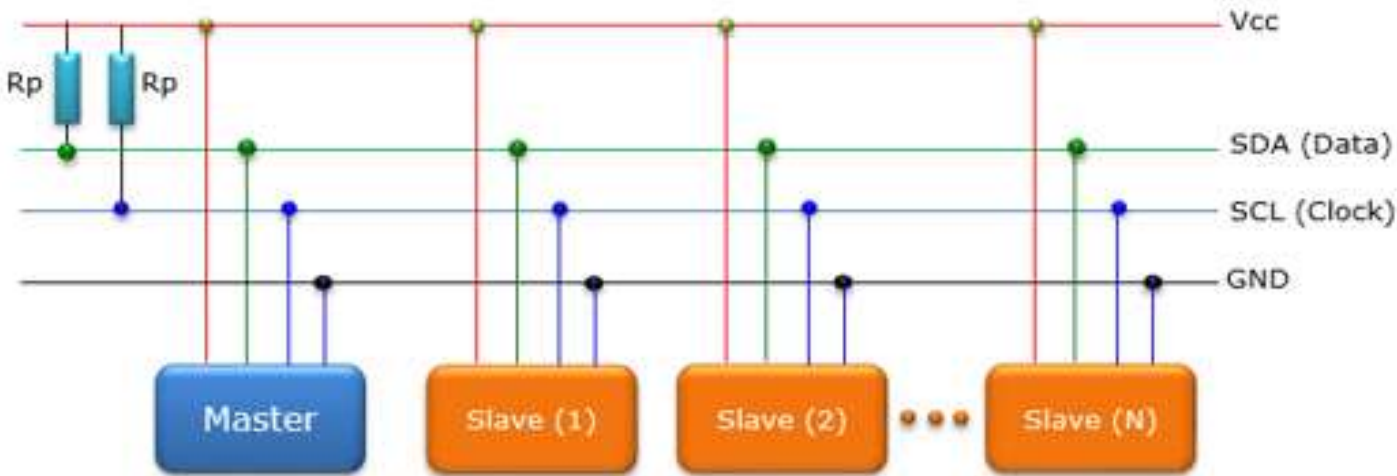
**¿ La implementación del levitador magnético permitirá evaluar algoritmos de control clásico y modernos mediante dispositivos de bajo costo.?**



## LEVITACIÓN MAGNÉTICA

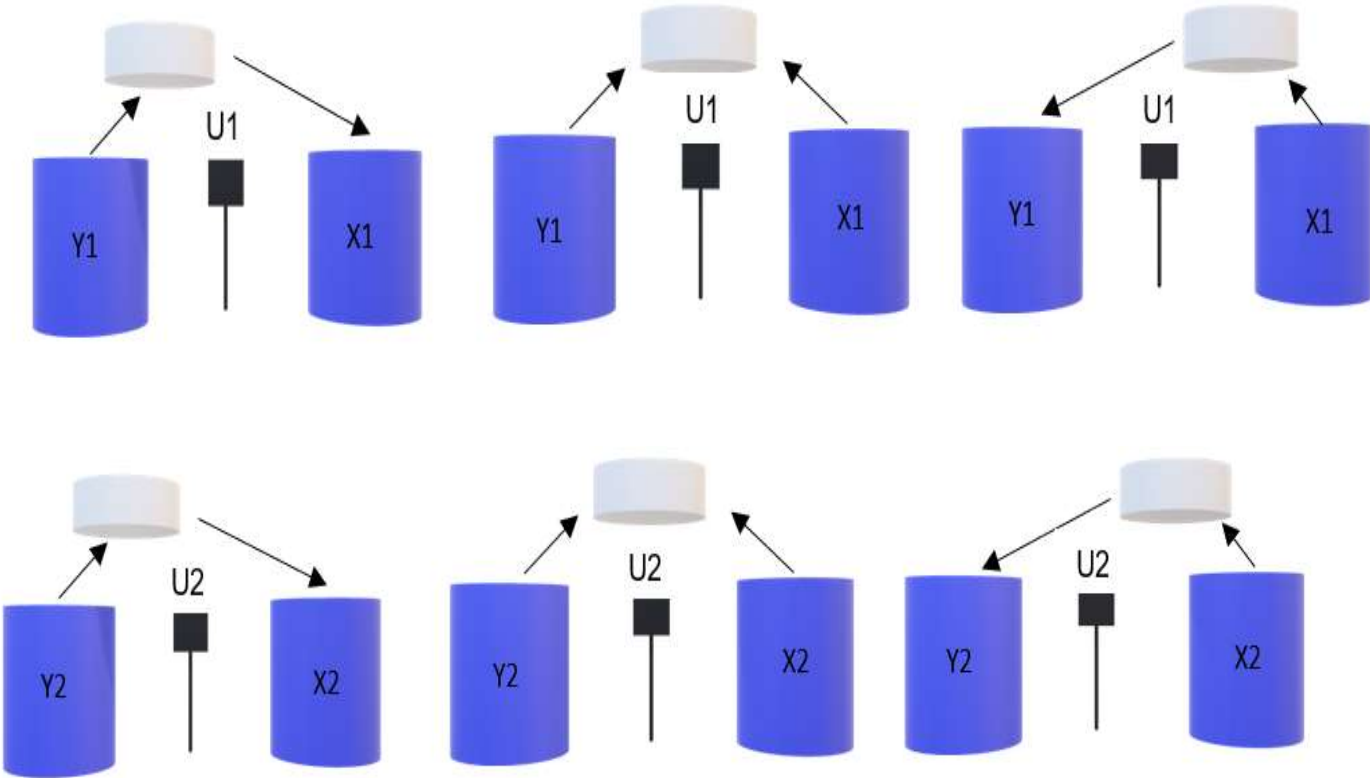


La levitación magnética se denomina al efecto que se da cuando un material generalmente ferromagnético puede levitar, entre polos iguales de dos imanes existe la repulsión que se conoce como el efecto Meissner, mientras que entre polos diferentes existe atracción.

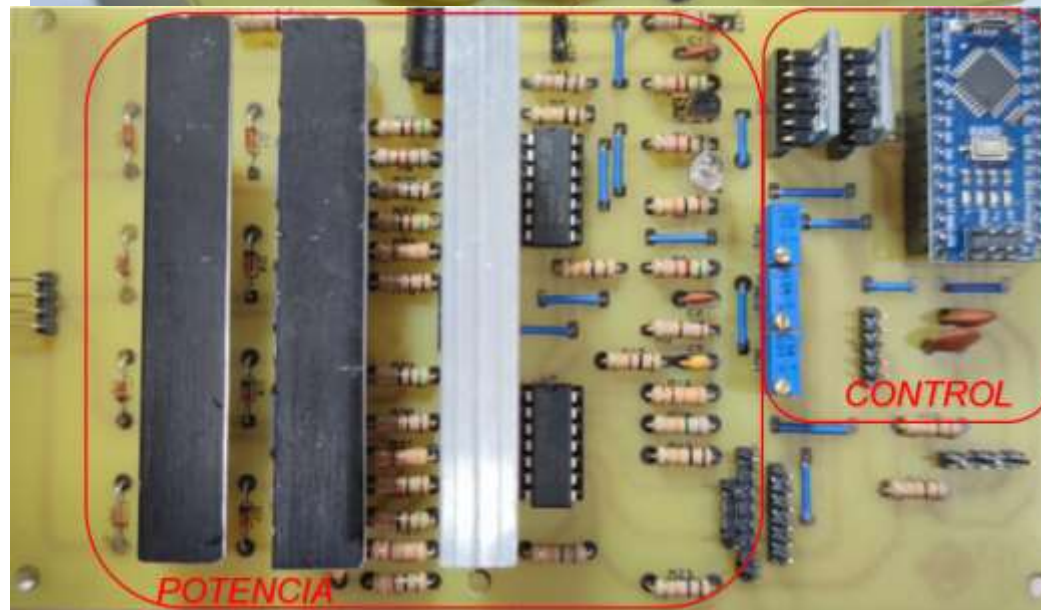


Examples

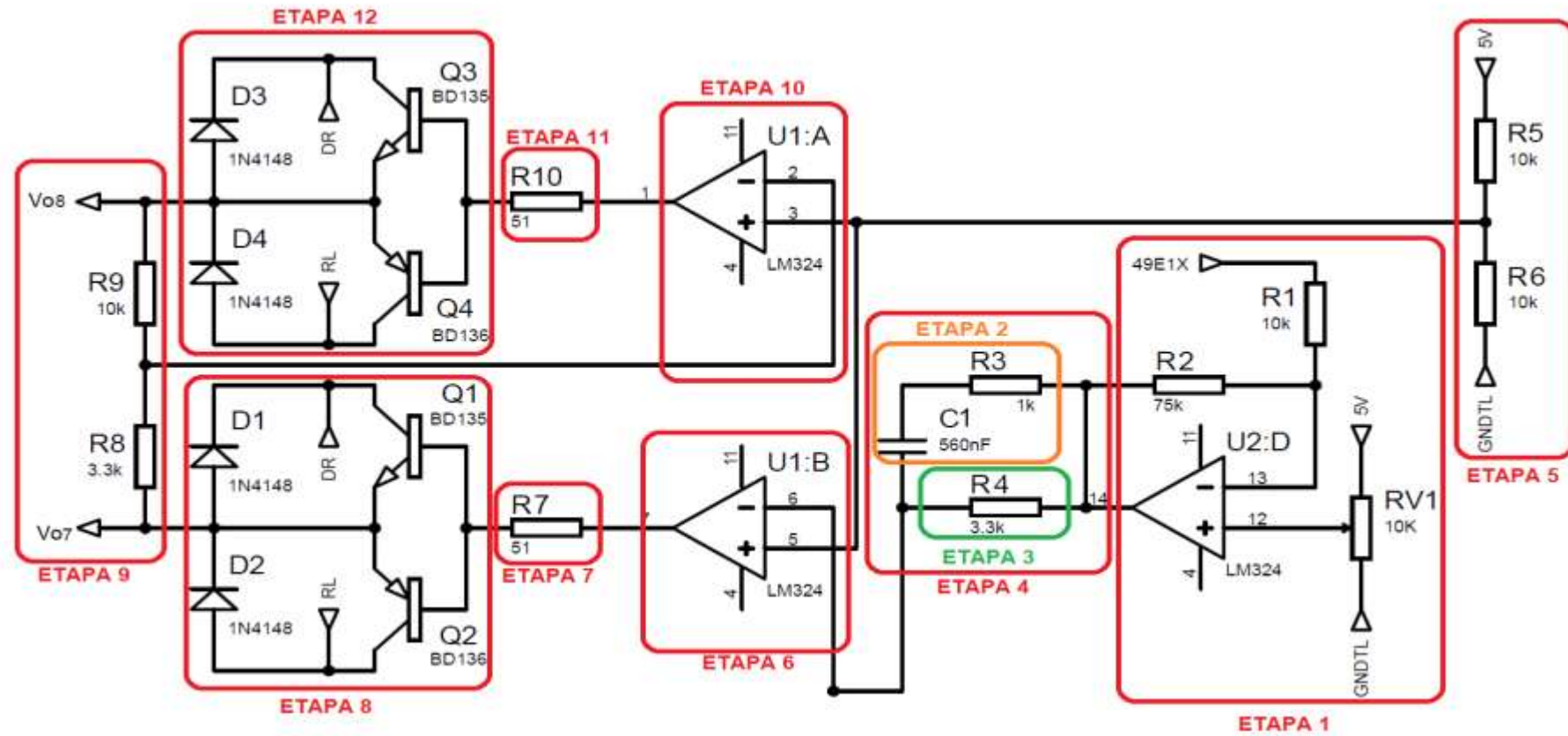
# DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN



# PLANTA FÍSICA

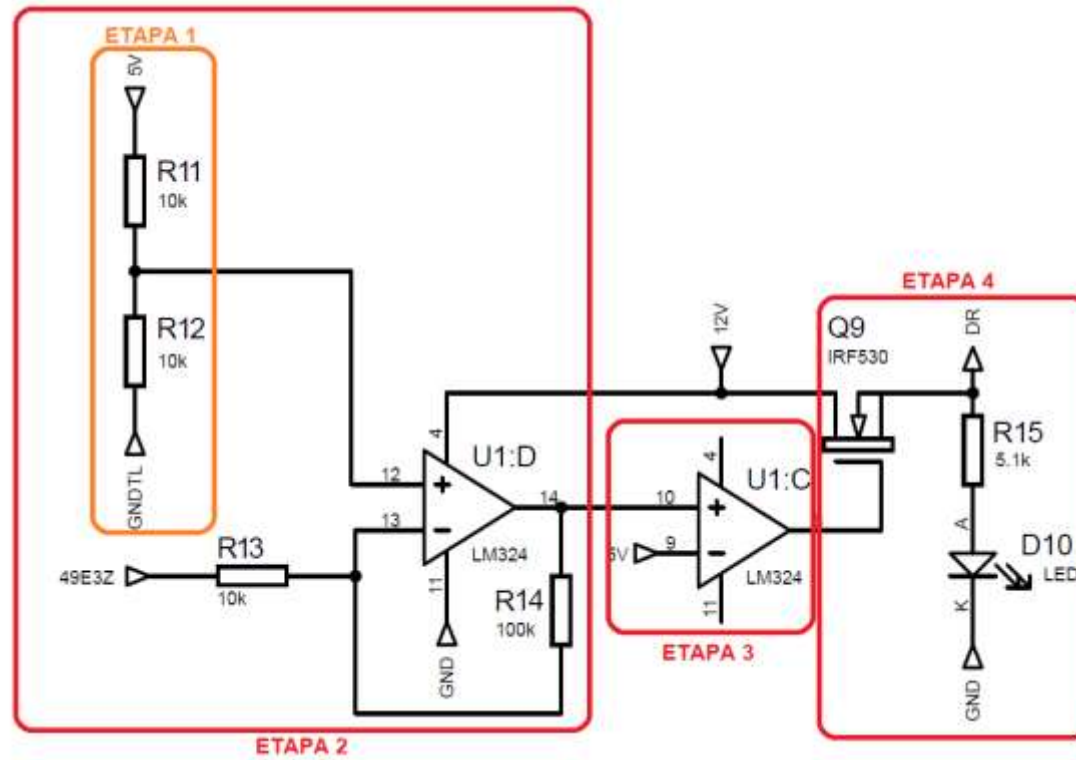


# DIAGRAMA EJE X,Y

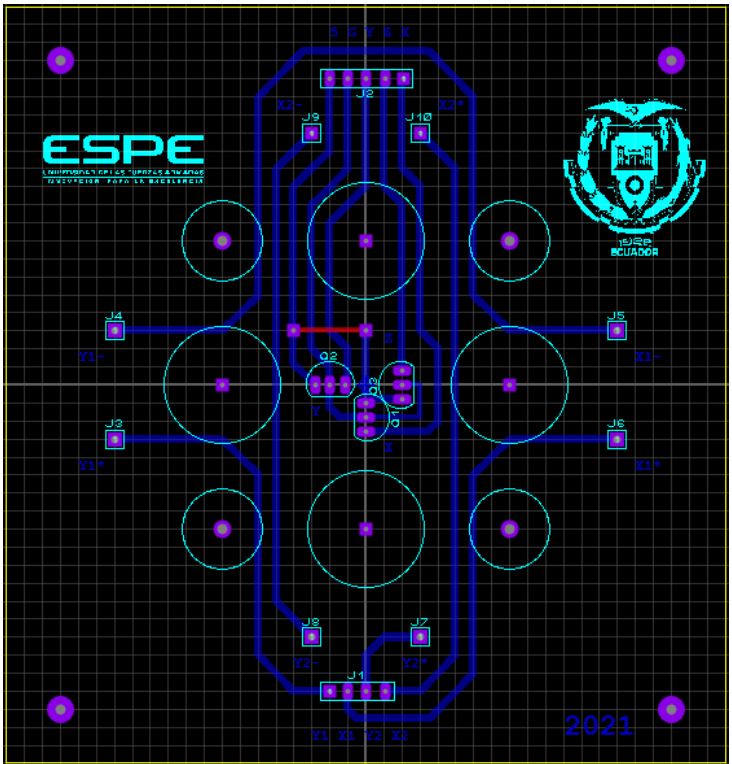
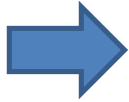




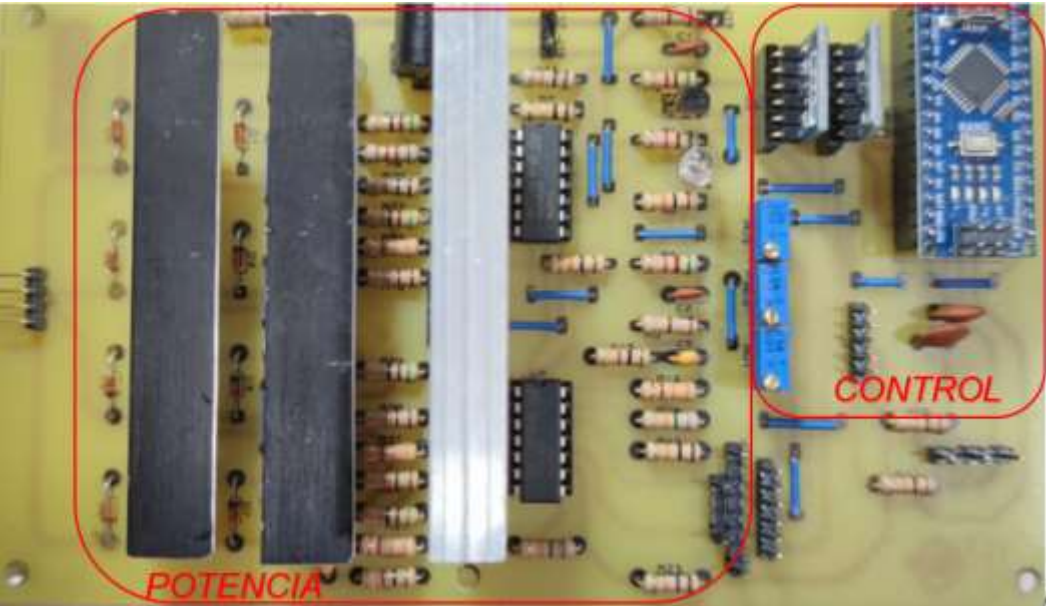
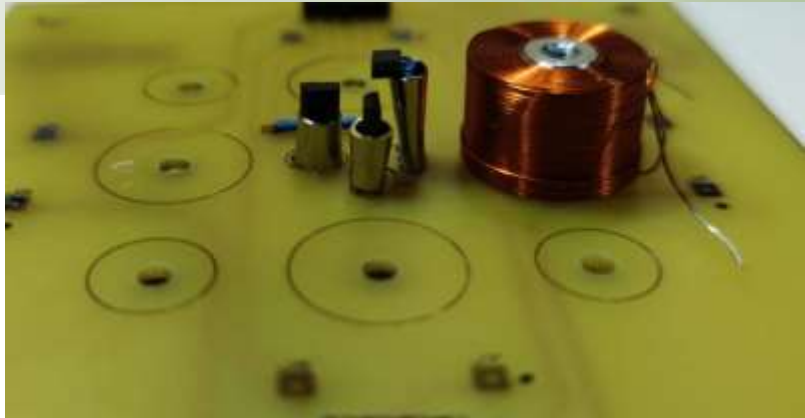
# DIAGRAMA EJE Z

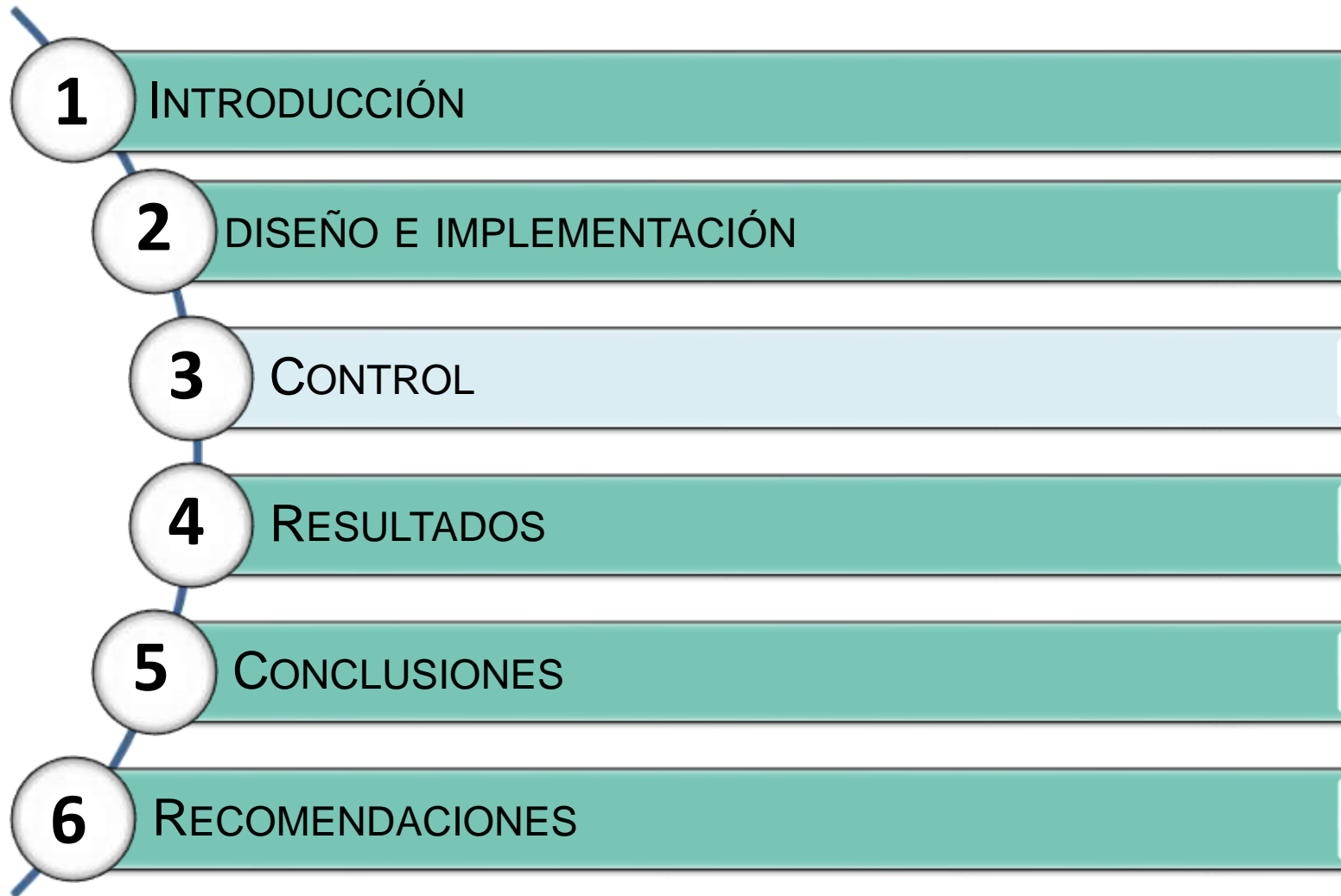


# DISEÑO

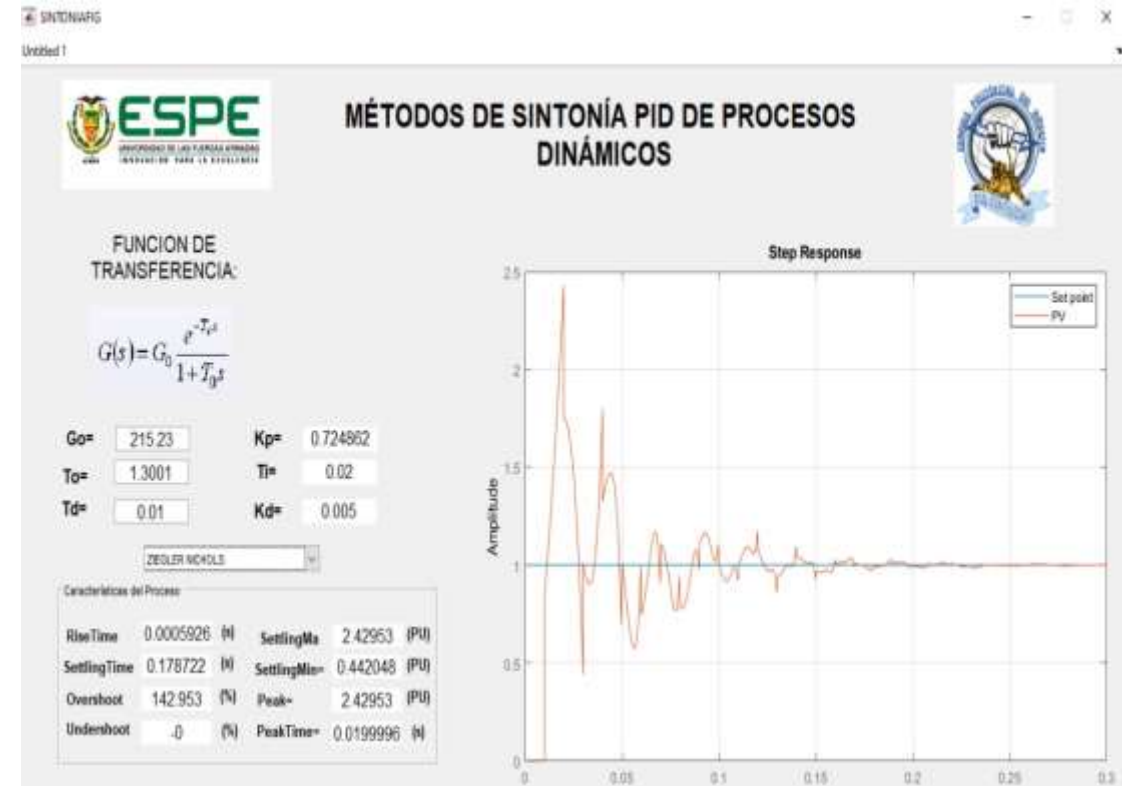
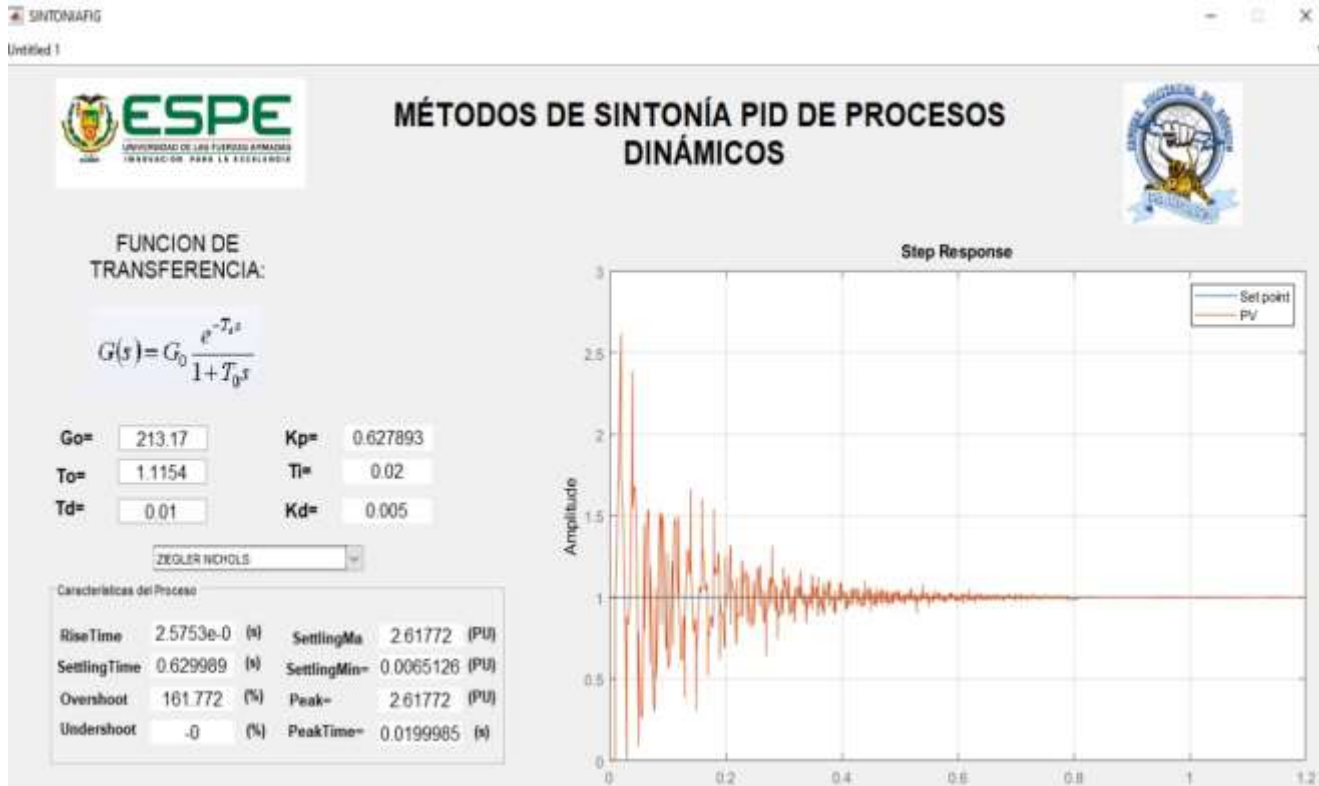


# DISEÑO

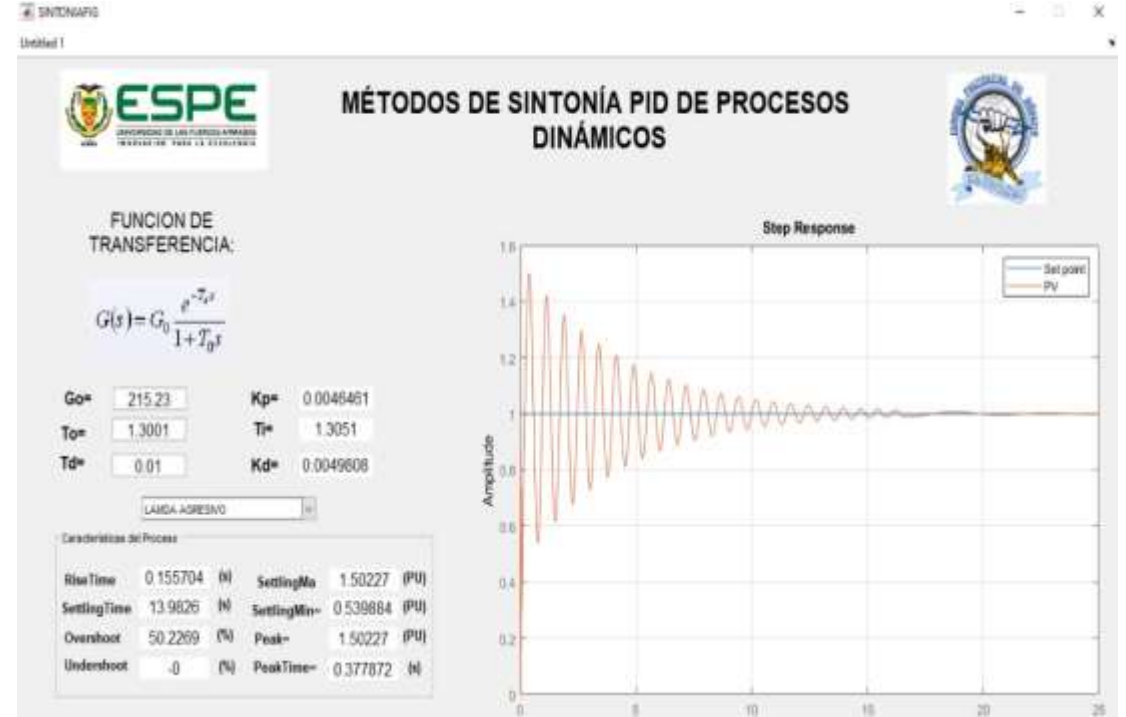
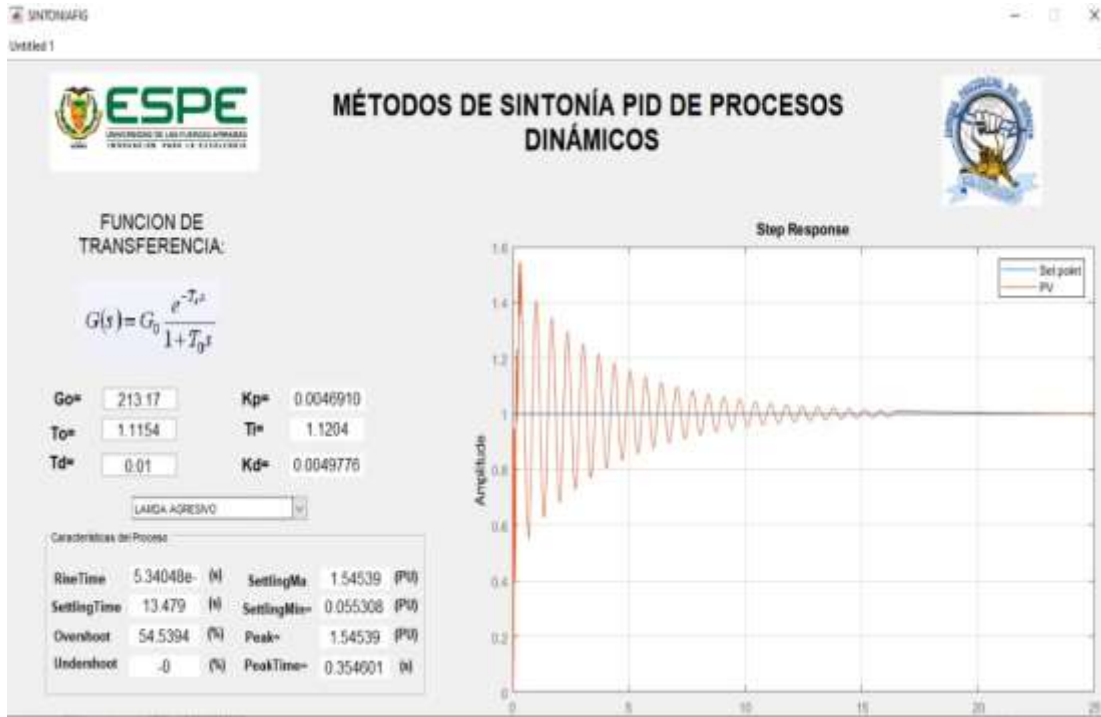




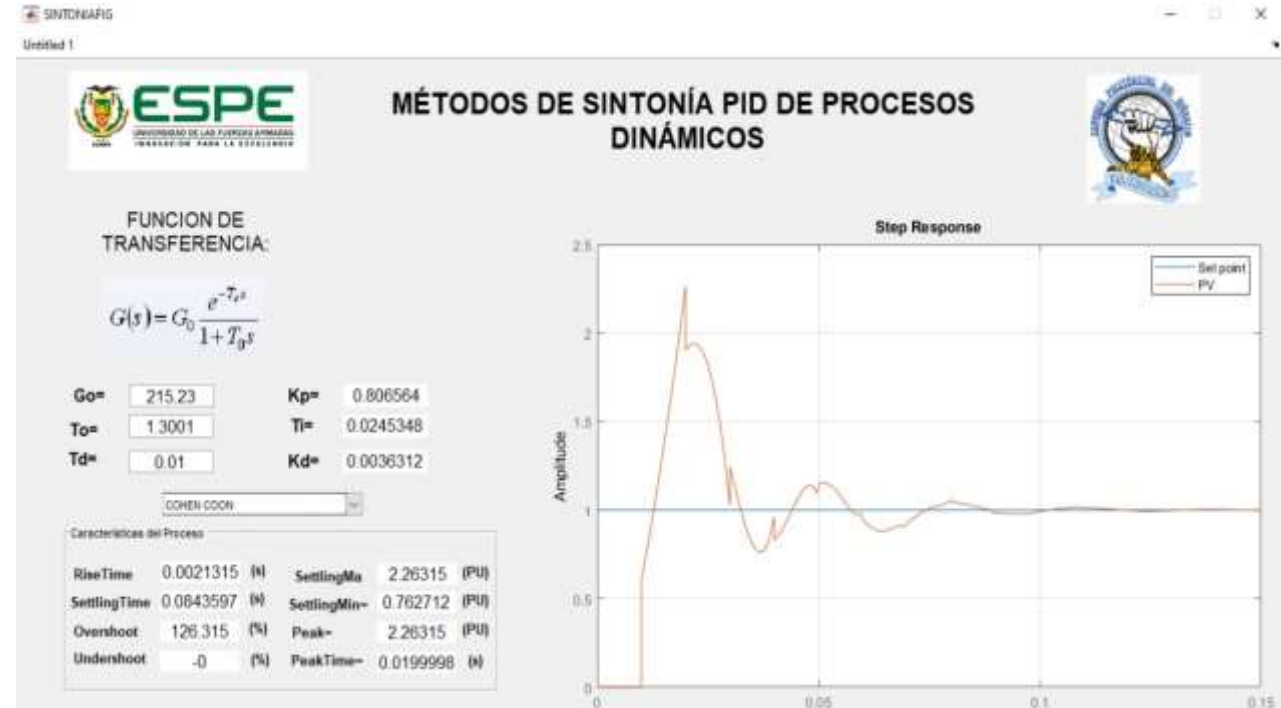
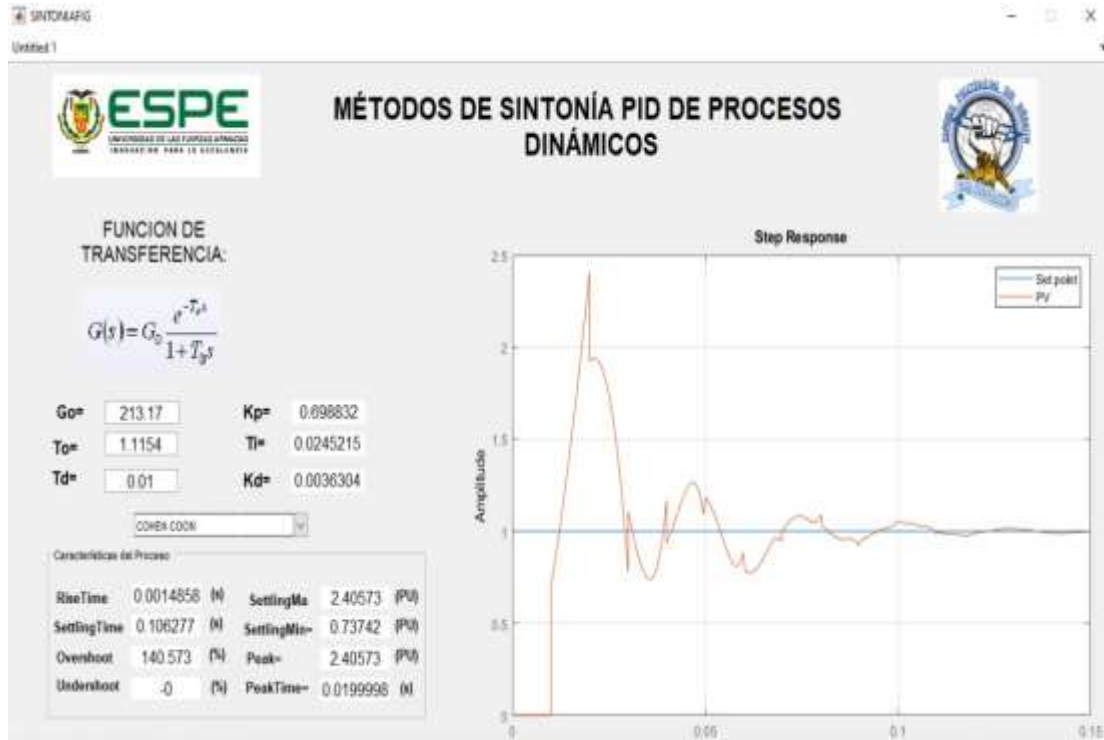
## MÉTODO ZIEGLER & NICHOLS X, Y



## MÉTODO LAMBDA AGRESIVO X, Y



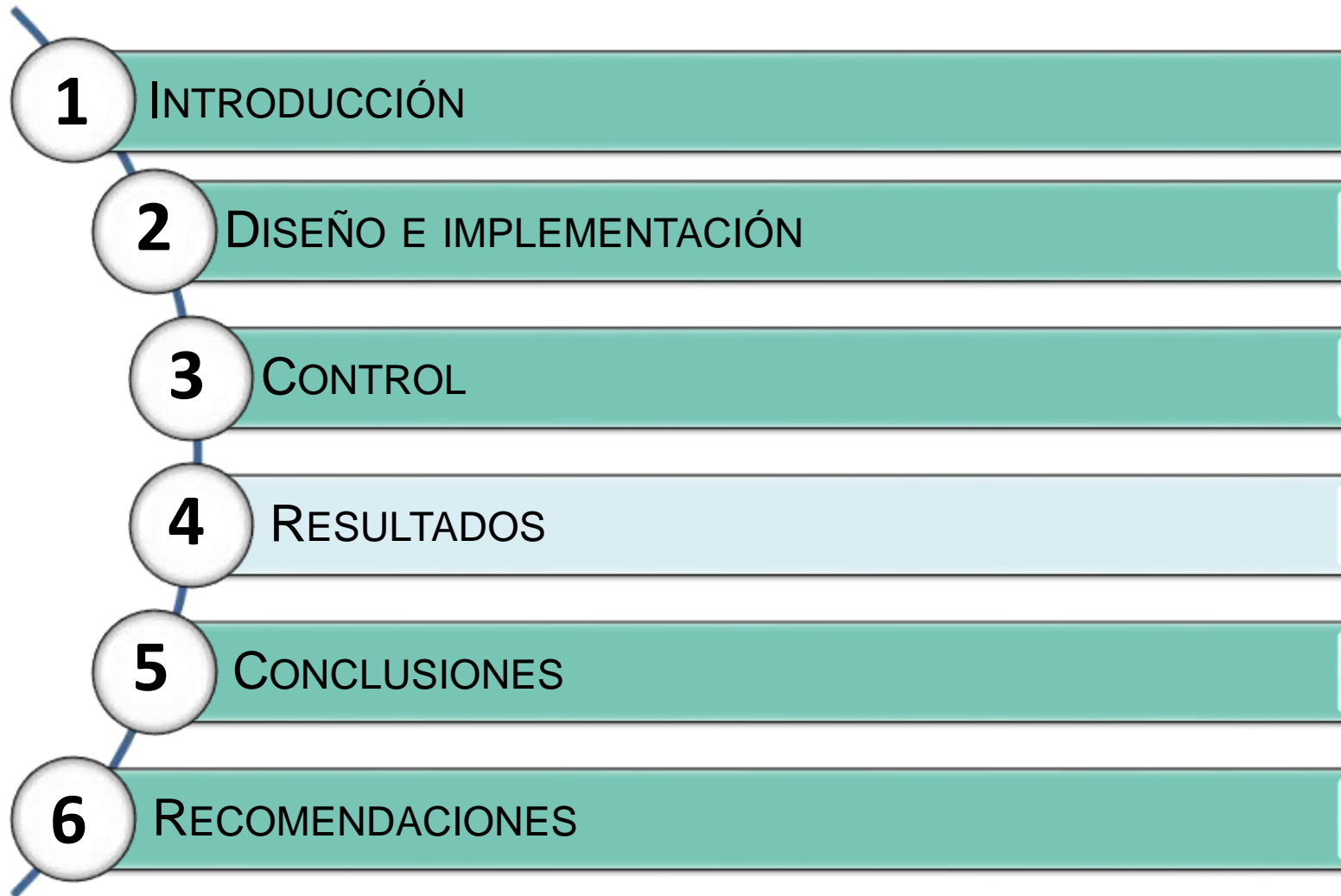
## MÉTODO COHEN COON X, Y



## MÉTODO IAE X, Y



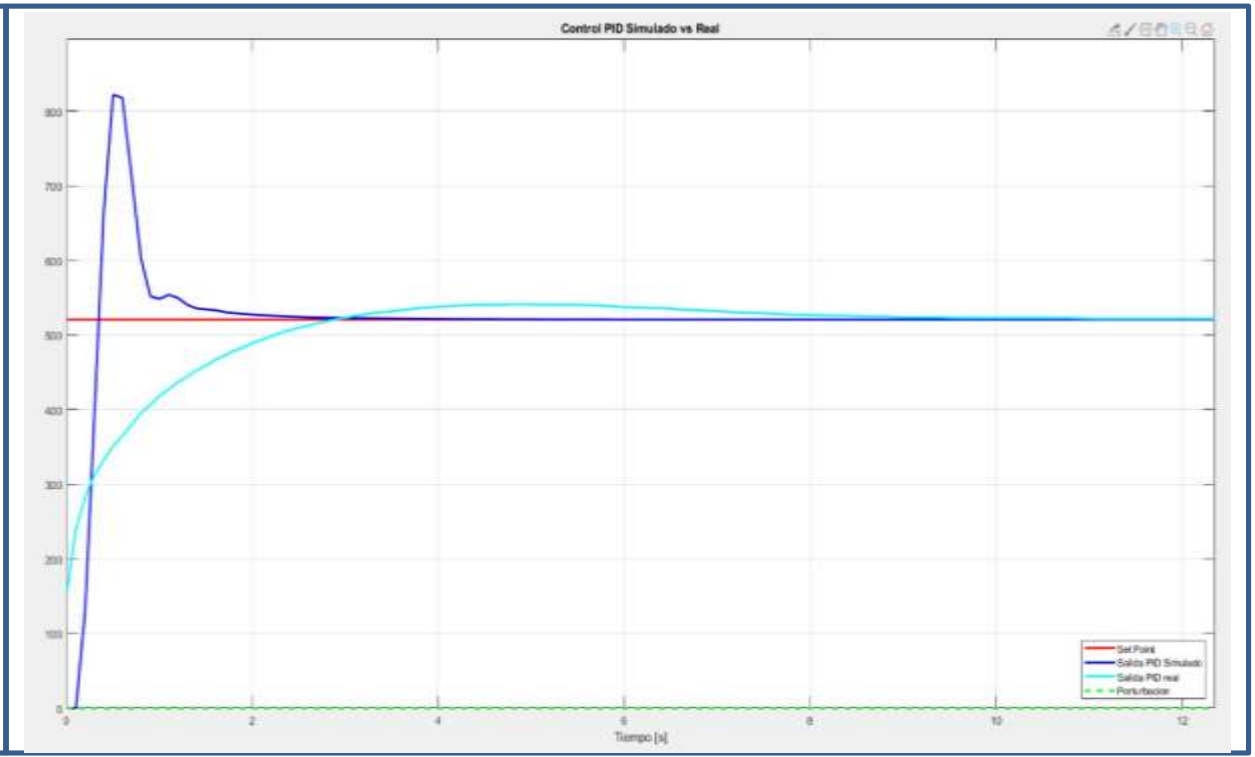
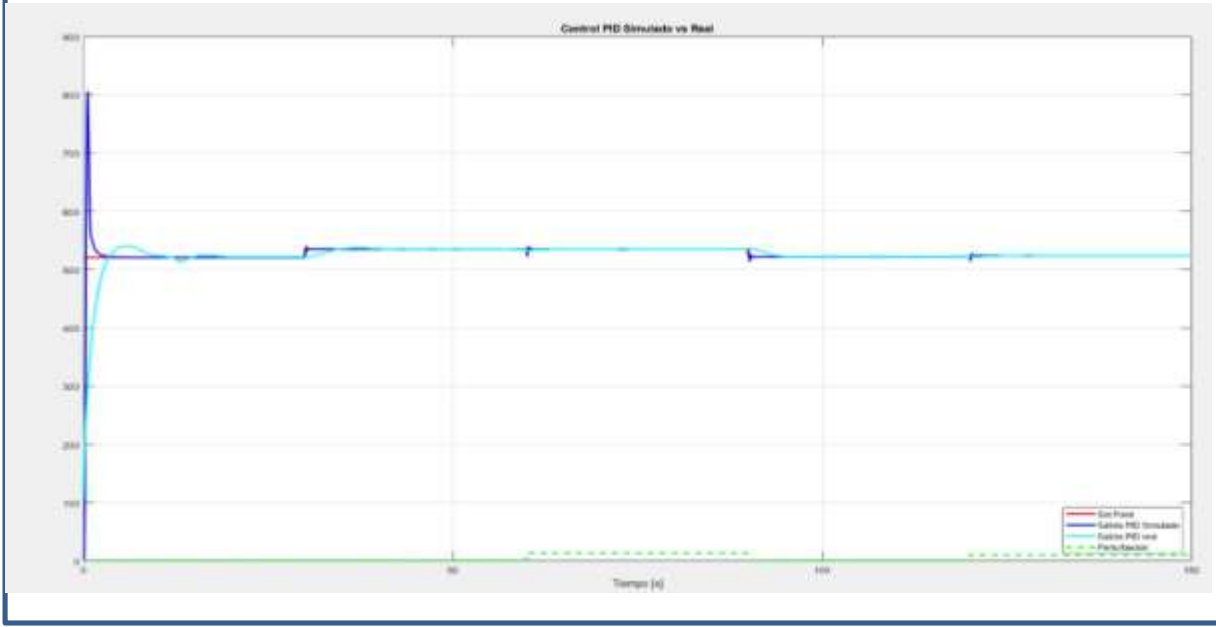




# RESULTADOS

## CURVA DE RESPUESTA DEL SISTEMA SIMULADO VS REAL, FRENTE A PERTURBACIONES CON EL CONTROLADOR PID MEDIANTE SINTONÍA ZIEGLER & NICHOLS.

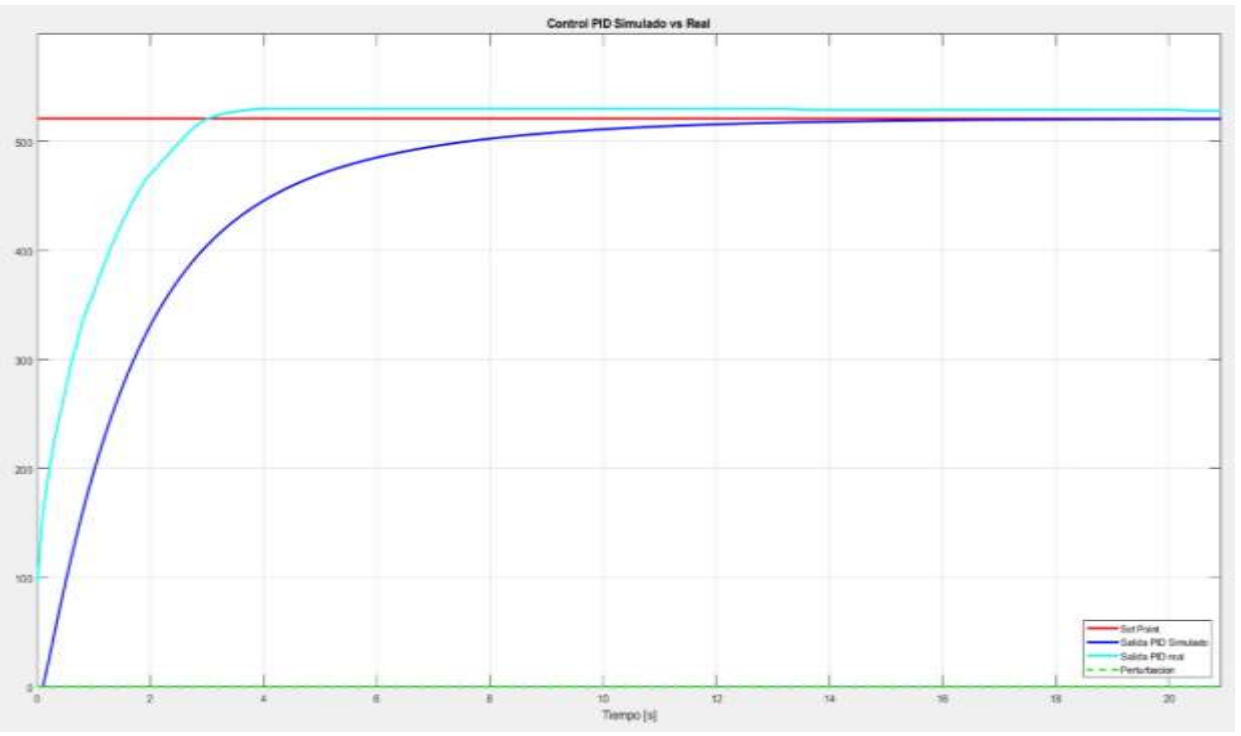
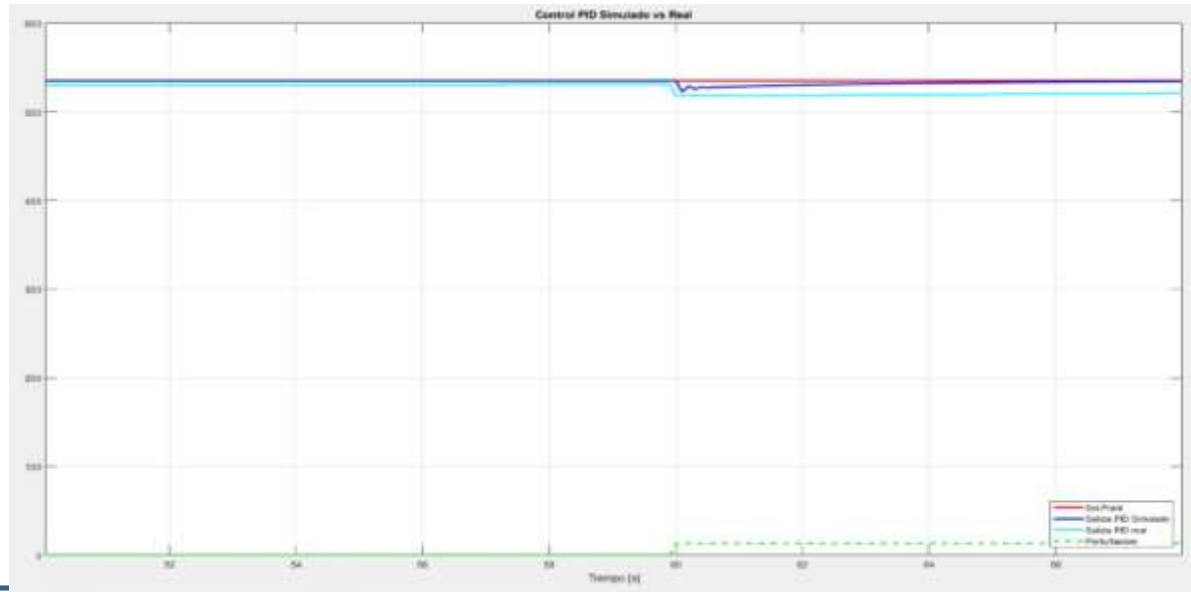
*Curva de respuesta del sistema con el control PID.*



# RESULTADOS

## CURVA DE RESPUESTA DEL SISTEMA SIMULADO VS REAL, FRENTE A PERTURBACIONES CON EL CONTROLADOR PID MEDIANTE SINTONÍA LAMBDA AGRESIVO.

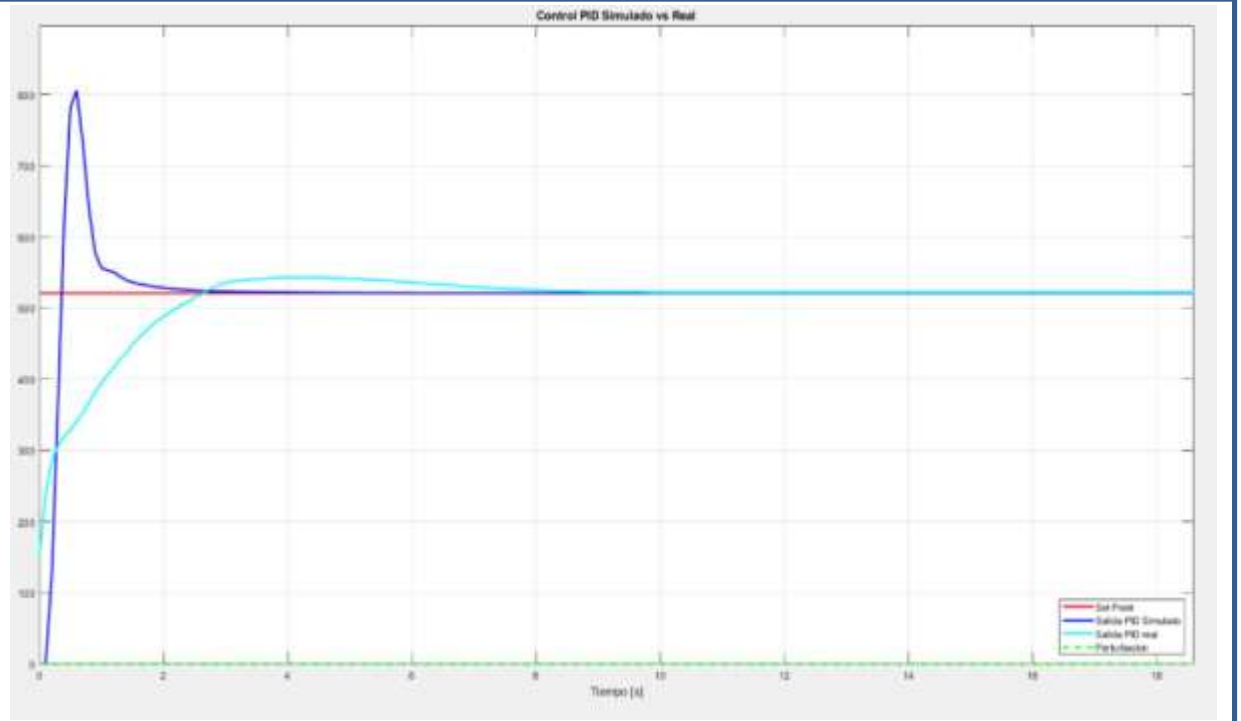
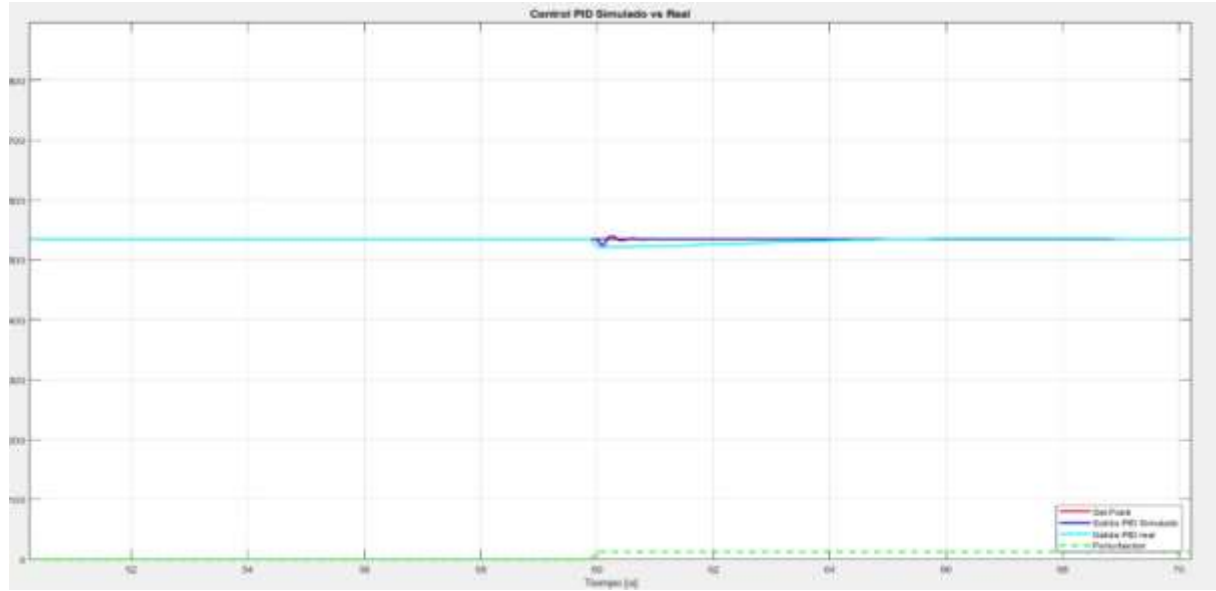
*Curva de respuesta del sistema con el control PID.*



# RESULTADOS

## CURVA DE RESPUESTA DEL SISTEMA SIMULADO VS REAL, FRENTE A PERTURBACIONES CON EL CONTROLADOR PID MEDIANTE SINTONÍA COHEN COON.

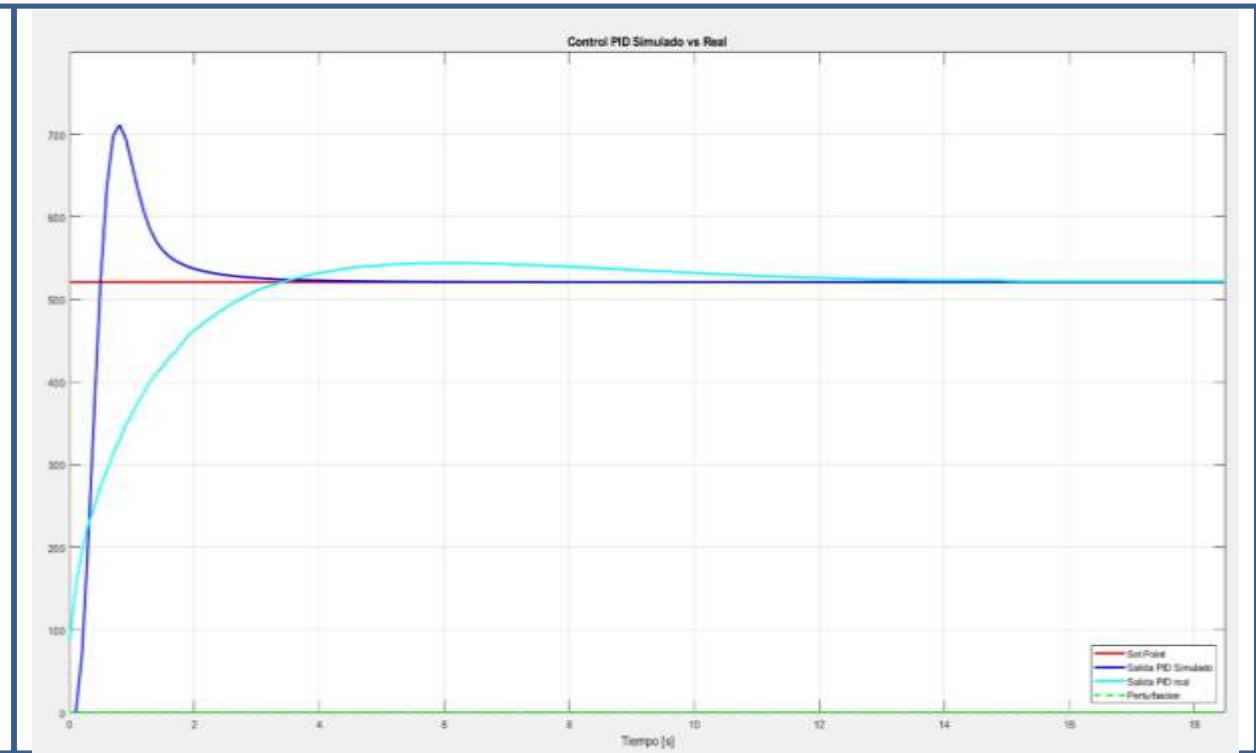
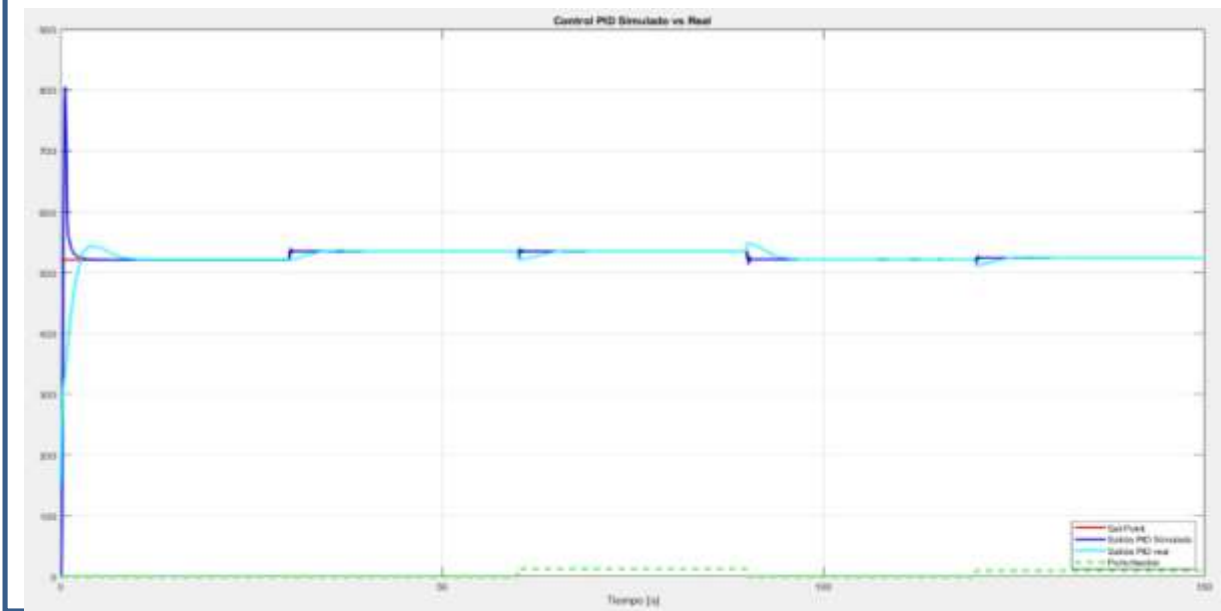
Curva de respuesta del sistema con el control PID.



# RESULTADOS

## CURVA DE RESPUESTA DEL SISTEMA SIMULADO VS REAL, FRENTE A PERTURBACIONES CON EL CONTROLADOR PID MEDIANTE SINTONÍA IAE.

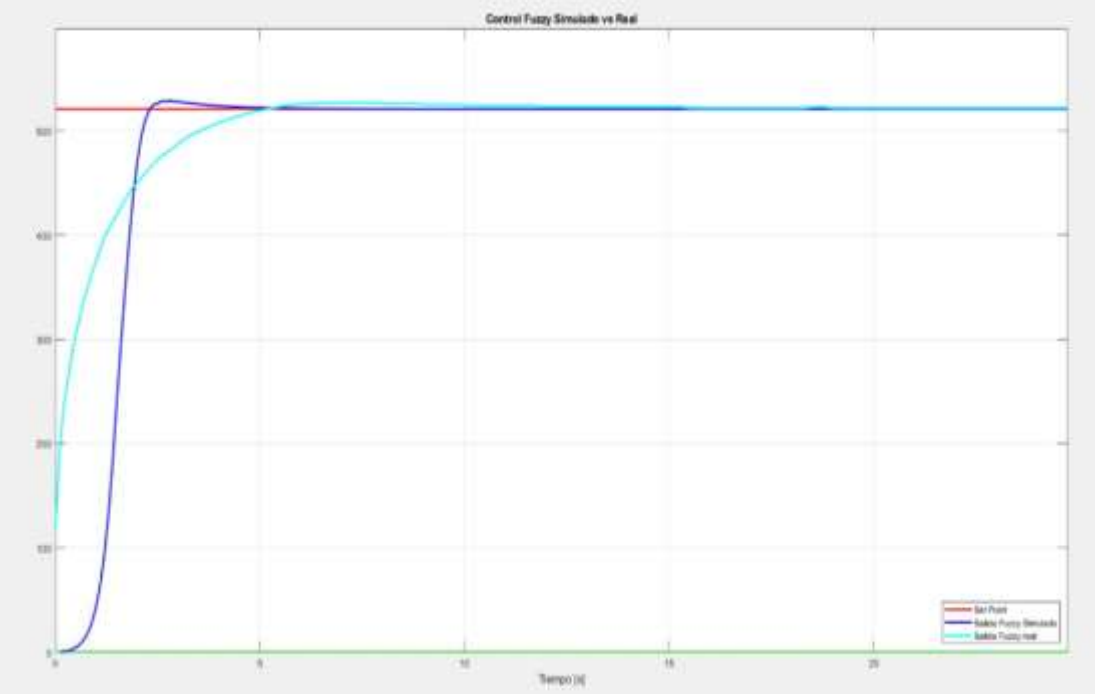
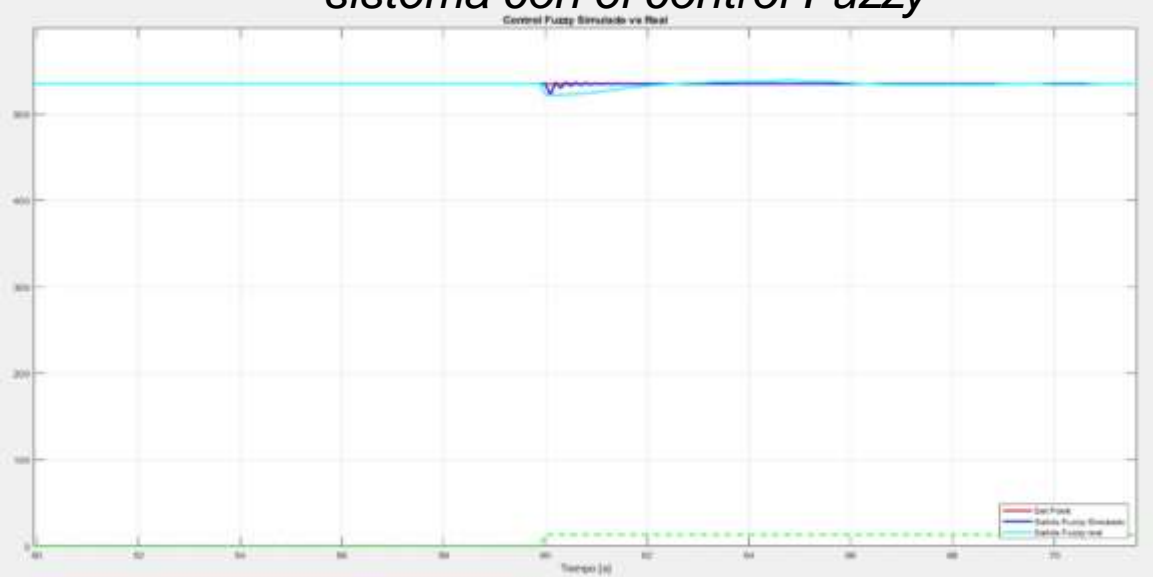
*Curva de respuesta del sistema con el control PID.*



# RESULTADOS

## CURVA DE RESPUESTA DEL SISTEMA SIMULADO VS REAL, FRENTE A PERTURBACIONES CON EL CONTROLADOR FUZZY.

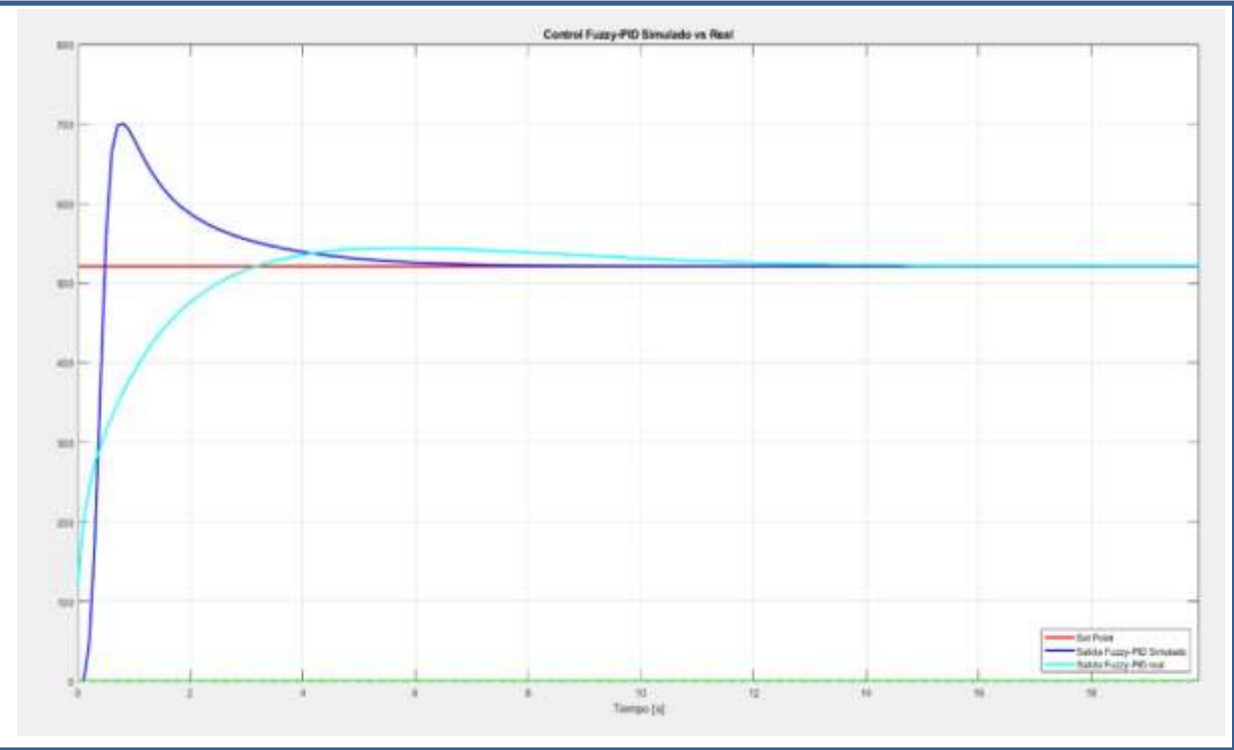
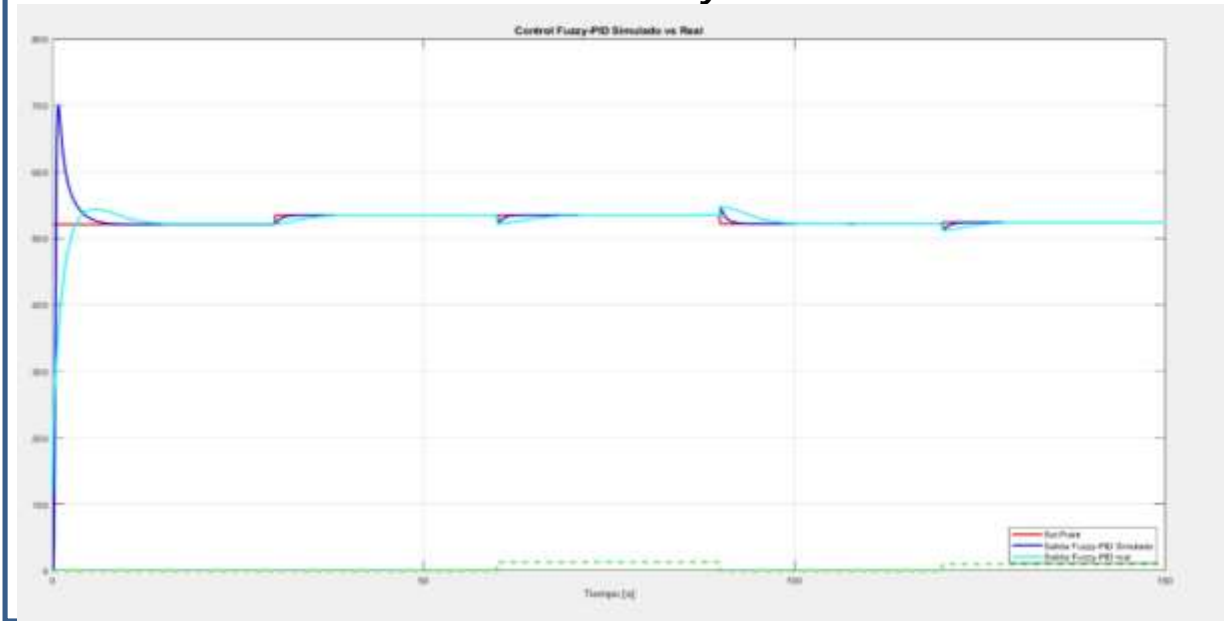
Curva de respuesta del sistema con el control Fuzzy



# RESULTADOS

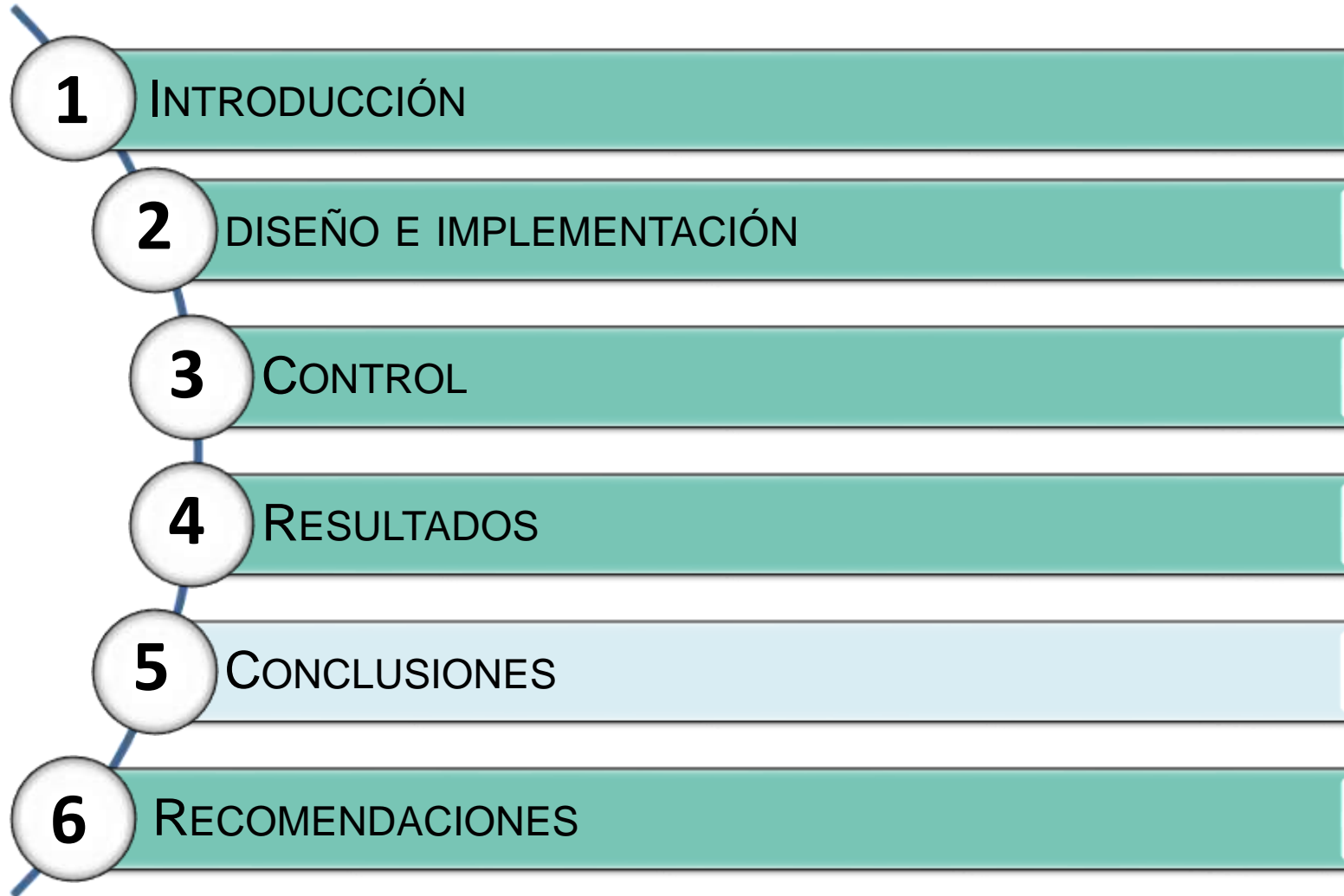
## CURVA DE RESPUESTA DEL SISTEMA SIMULADO VS REAL, FRENTE A PERTURBACIONES CON EL CONTROLADOR FUZZY PID.

*Curva de respuesta del sistema con Fuzzy PID.*



# RESULTADOS VIDEO DE FUNCIONAMIENTO DEL PROCESO



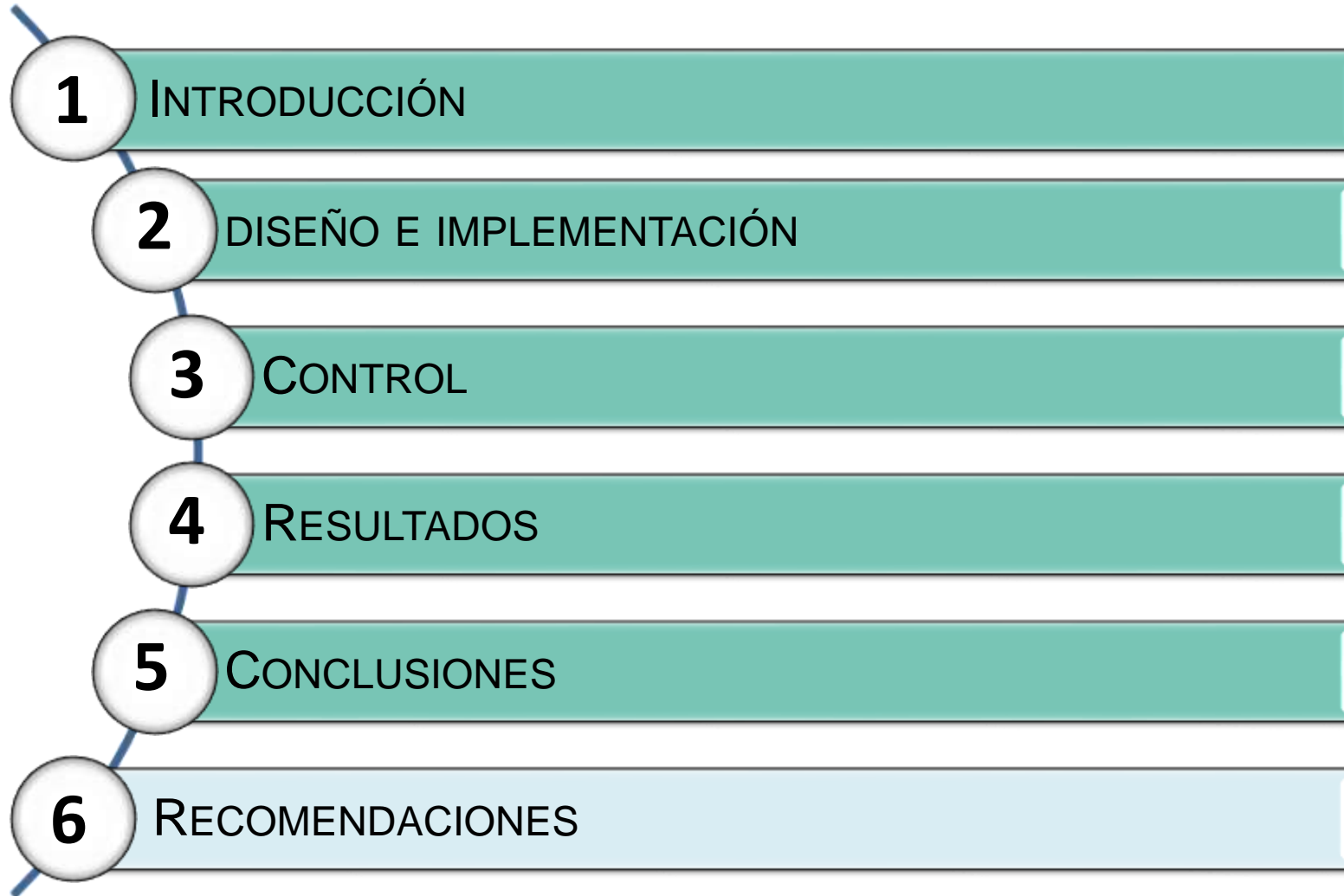


# CONCLUSIONES

- Con la investigación e implementación del proyecto se pudo concluir que el principio de la suspensión electrodinámica corta las líneas de campo magnética del imán levitado, con lo que se produce un campo magnético cambiante, creando líneas de campo repulsivas permitiendo que el imán tenga una correcta suspensión.
- Se realizó la investigación de los algoritmos de control clásicos como: el PID con los métodos de sintonía Ziegler & Nichols, Lambda agresivo, Cohen Coon y el IAE, en la evaluación del algoritmo clásico se determina que la mejor respuesta se obtuvo con el método de sintonía IAE y los algoritmos de control modernos como: Fuzzy y Fuzzy PID, se obtuvo mejor resultado con el controlador Fuzzy PID.
- Se diseñó e implementó un prototipo de levitación magnética para ello fue necesario la ayuda del software Proteus, debido a que es una herramienta que facilita la construcción de esquemas electrónicos, simulación y diseño de circuitos impresos. Este software facilitó la construcción de la planta con todas las medidas, donde va a estar ubicado cada componente, tanto en la placa de control y de potencia.

# CONCLUSIONES

- Con la investigación e implementación del proyecto se pudo concluir que el principio de la suspensión electrodinámica corta las líneas de campo magnética del imán levitado, con lo que se produce un campo magnético cambiante, creando líneas de campo repulsivas permitiendo que el imán tenga una correcta suspensión.
- Se realizó la investigación de los algoritmos de control clásicos como: el PID con los métodos de sintonía Ziegler & Nichols, Lambda agresivo, Cohen Coon y el IAE, en la evaluación del algoritmo clásico se determina que la mejor respuesta se obtuvo con el método de sintonía IAE y los algoritmos de control modernos como: Fuzzy y Fuzzy PID, se obtuvo mejor resultado con el controlador Fuzzy PID.
- Se diseñó e implementó un prototipo de levitación magnética para ello fue necesario la ayuda del software Proteus, debido a que es una herramienta que facilita la construcción de esquemas electrónicos, simulación y diseño de circuitos impresos. Este software facilitó la construcción de la planta con todas las medidas, donde va a estar ubicado cada componente, tanto en la placa de control y de potencia.



# RECOMENDACIONES

- Realizar pruebas de polaridad en los imanes, electroimanes e imán de levitación, para asegurar un correcto funcionamiento al momento de excitar los mismos y no se produzcan errores en el sistema de levitación magnética.
- Tomar en cuenta las dimensiones de la placa de levitación para ubicar los elementos (electroimán, imán y sensores), debido a que la parte estructural también influye al momento del desarrollo del control y el funcionamiento del sistema.
- Al realizar pruebas de funcionamiento se debe tomar en cuenta no alterar la posición de los sensores de Efecto Hall, ya que este influye en la correcta lectura de la posición del imán suspendido dando un error.

# RECOMENDACIONES

- Revisar los voltajes de los ejes x,y,z tanto de los sensores como de los potenciómetros lineales para la operación inicial y posteriores pruebas desde la tarjeta de control(DAC).
- Se debe realizar varios filtrados al momento de obtener la señal del sensor ya que el sensor adquirido proporciona una señal sinusoidal por lo que se dificulta la lectura de datos y se requiere realizar la linealización.
- Para posteriores proyectos realizar pruebas de la posición de los imanes y electroimanes para incrementar el rango de desplazamiento en los ejes x e y.

# AGRADECIMIENTOS



**GRACIAS POR SU  
ATENCIÓN**





**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE  
**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

**INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN**

**Trabajo de Titulación, previo a la obtención del Título de Ingeniero  
en Electrónica e Instrumentación**

**Levitador magnético para evaluar algoritmos clásicos y modernos, mediante  
dispositivos de bajo costo**

**Autores:**

Aldana Tapia, Jair Alexander  
Tipantuña Lovato, María Daniela

Ing. Pilatasig Panchi Marco Antonio, **Director**

