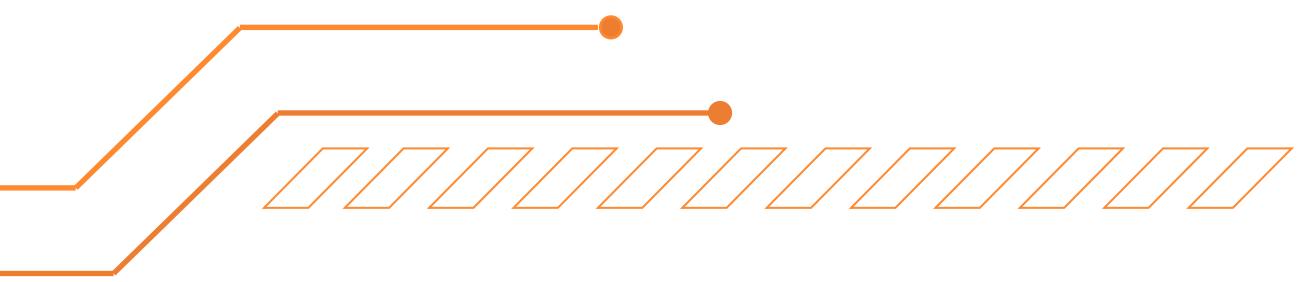




# *Implementación de un RCP (Rapid Control Prototyping) para la identificación de plantas y sintonización automática de controladores, utilizando el método del relé asimétrico.*

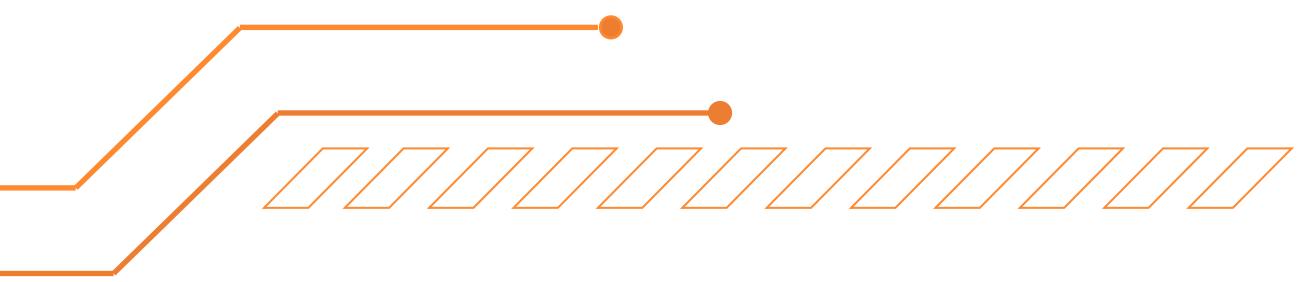
Autores: Ing. Marcelo Adrián Bruno - Dra. Ing. Flavia E. Felicioni



## ¿Cuáles temas desarrollaremos durante la presentación?

- 1 Tipos de simulaciones.
- 2 Estado del arte.
- 3 Estudio del Método del Relé Asimétrico.
- 4 Análisis del modelo FOTD.
- 5 Implementación de simulaciones offline para validación del método.
- 6 Realización del banco de ensayos para la ejecución de las simulaciones RCP.
- 7 Ejecución de las simulaciones RCP.
- 8 Conclusiones finales y recomendaciones futuras





## Tipos de Simulaciones

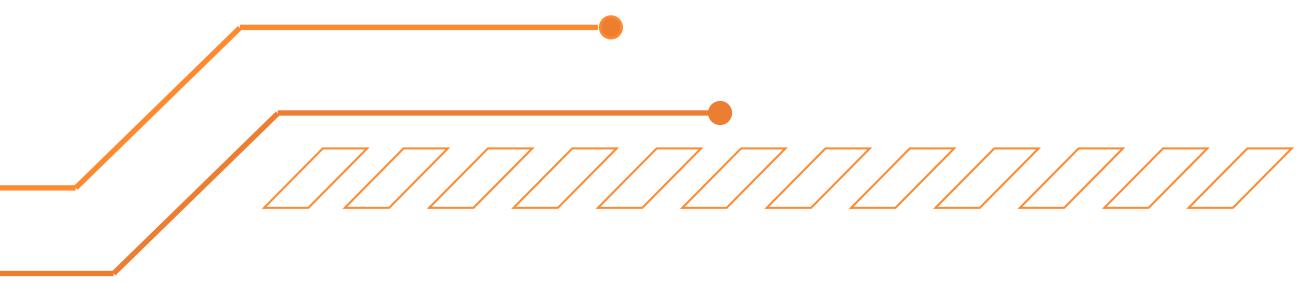
- **Simulación *offline***

El algoritmo de simulación resuelve de forma aproximada las ecuaciones diferenciales del modelo demorándose más o menos tiempo dependiendo de la complejidad de los cálculos a resolver y de la capacidad computacional del procesador donde se está ejecutando.

- **Simulación *online***

El algoritmo de simulación resuelve de forma aproximada las ecuaciones diferenciales del modelo en tiempo real.

- El sistema debe reaccionar ante eventos de una manera predecible bajo todas las condiciones operativas posibles y ser capaz de completar los cálculos dentro del tiempo de respuesta garantizado.
- Se procesan los datos a una velocidad adecuada tal que genere las respuestas requeridas para el correcto funcionamiento de la aplicación.



# Simulaciones en Tiempo Real

La Simulación en Tiempo Real (RTS) reproduce la complejidad del sistema real en tiempo real a la vez que conserva las ventajas de una simulación estándar: flexibilidad, rápida puesta en práctica, fácil depuración y amplia cobertura de las pruebas.

- **Simulación *Rapid Control Prototyping (RCP)***

Se conecta una planta física real a un controlador virtual, utilizando el simulador en tiempo real como controlador virtual.

- **Simulación *Hardware In the Loop (HIL)***

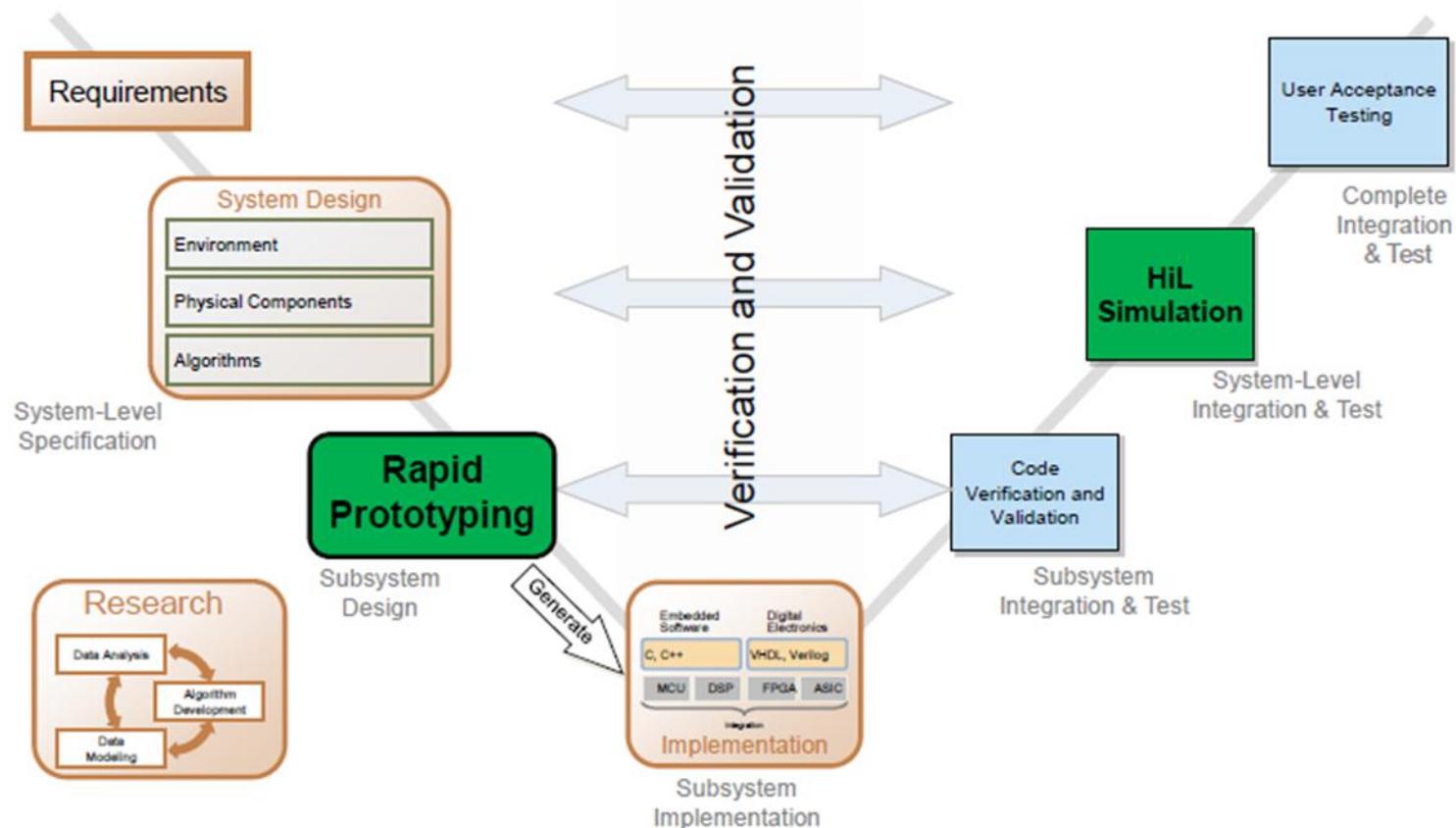
Se conecta un controlador físico real a una planta virtual. Este tipo de simulación además de las ventajas que se tienen en la simulación *RCP* permite la prueba del controlador sin la necesidad de disponer de la planta real.

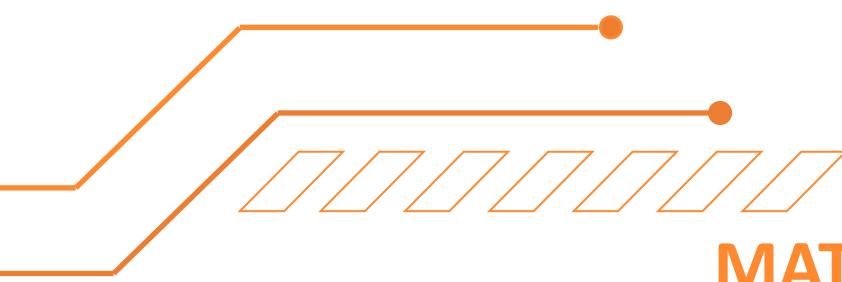
- **Simulación *Software In the Loop (SIL)***

Se trata de una combinación de las dos técnicas anteriores (*RCP* y *HIL*). Para ello es necesario utilizar un simulador potente como para poder simular en tiempo real, tanto la planta como el controlador.

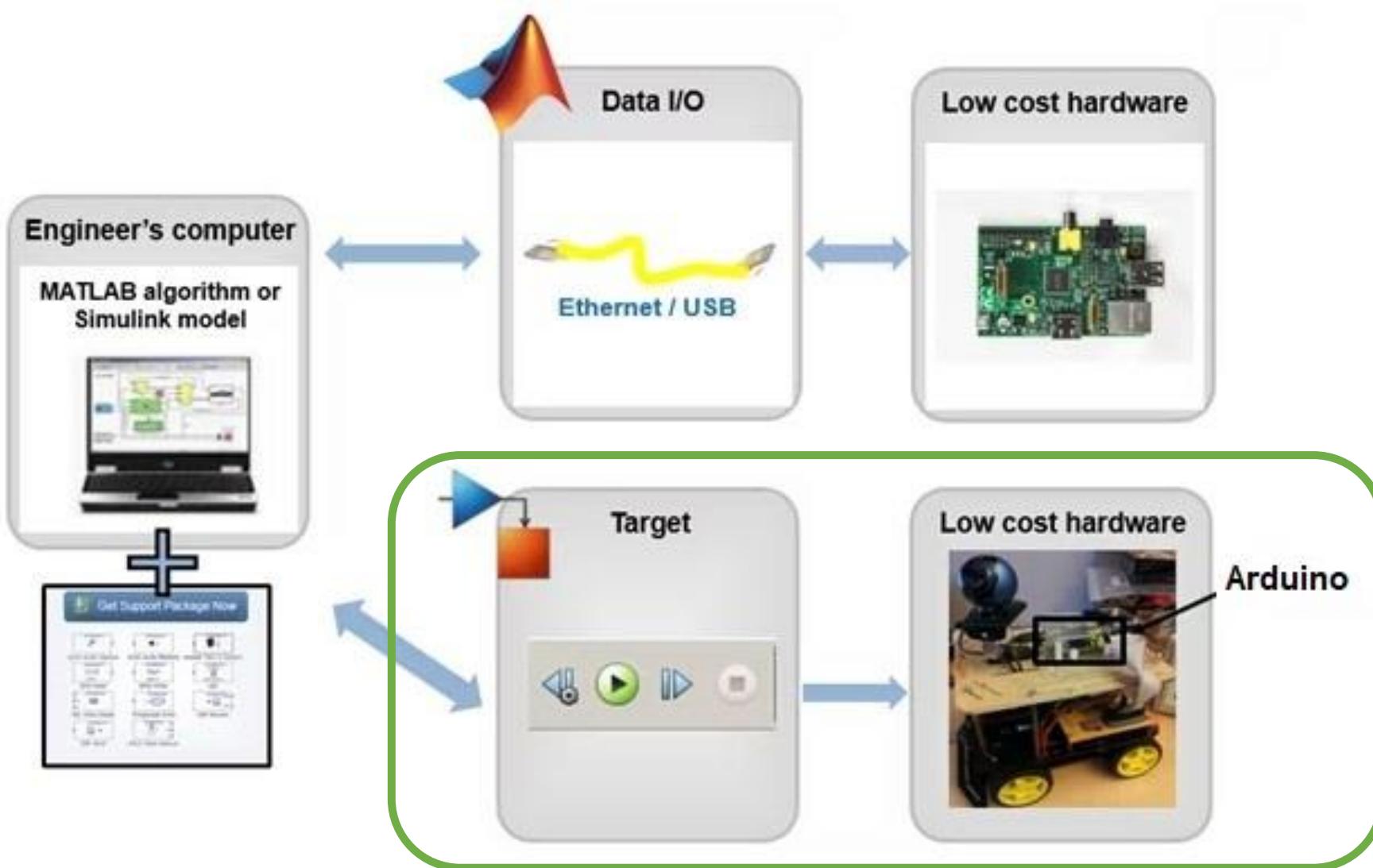
## Simulaciones en Tiempo Real

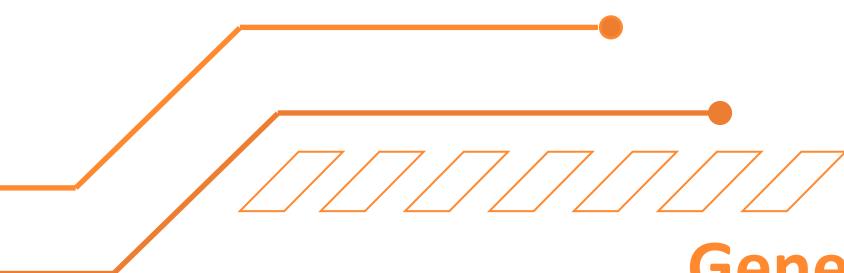
Diseño basado en modelos con verificación y validación continua



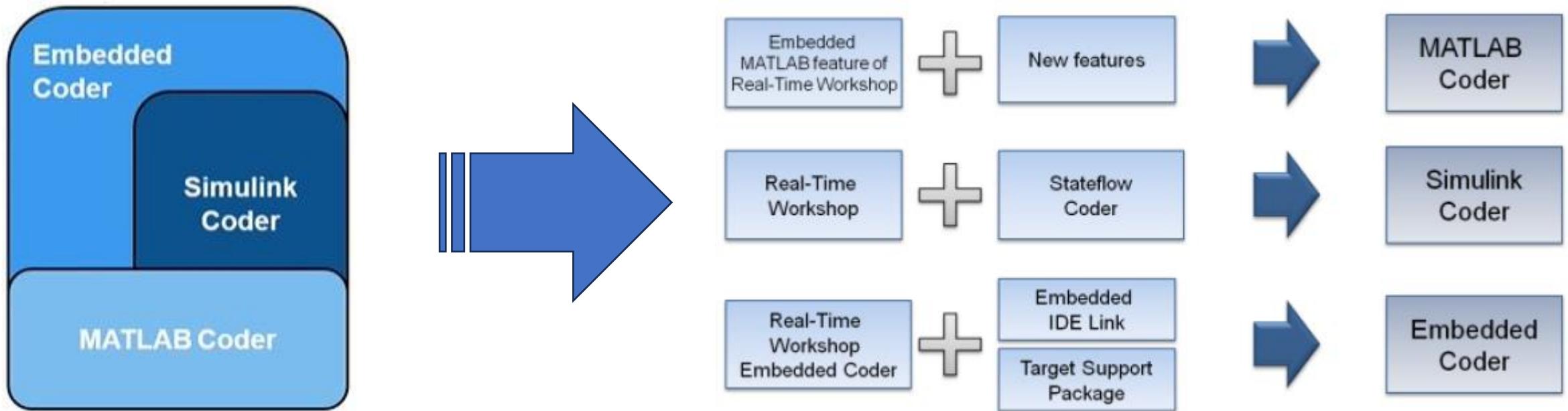


## MATLAB ejecutándose en Tiempo Real.

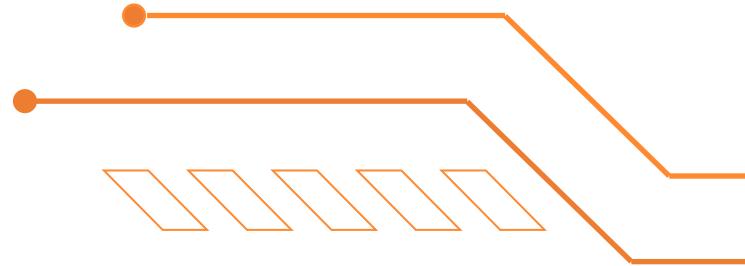




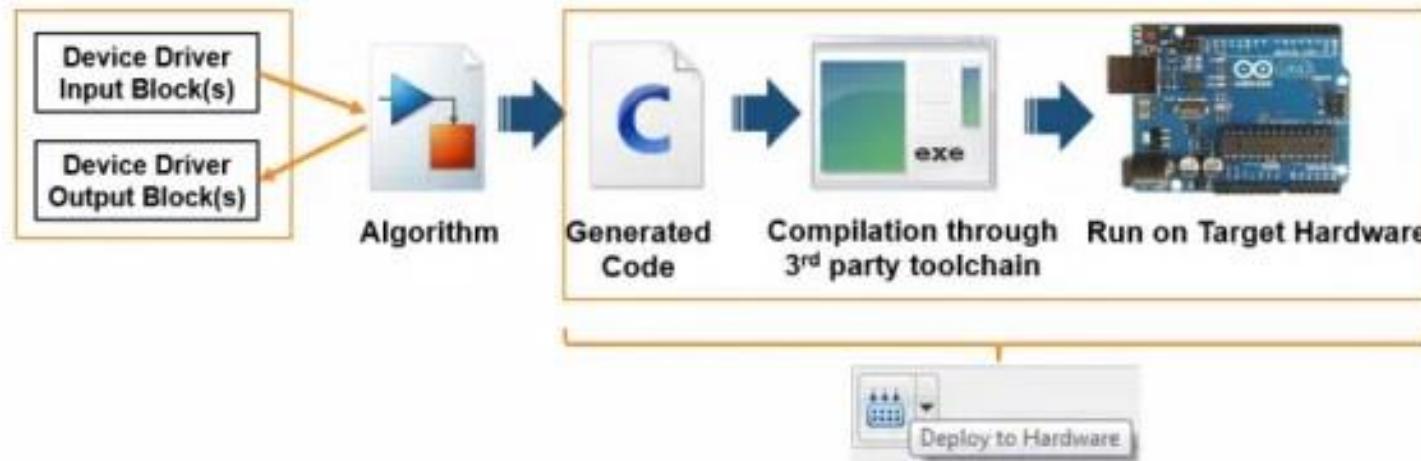
## Generación automática de código C/C++.



- **Matlab Coder:** genera código a partir de código de MATLAB para diversas plataformas de hardware.
- **Simulink Coder:** Anteriormente RTW, genera y ejecuta código a partir de modelos de Simulink, Stateflow y funciones de MATLAB. El código fuente generado puede utilizarse para aplicaciones en tiempo real y no real, incluida la aceleración de simulaciones, simulaciones RCP y HIL.
- **Embedded Coder:** genera código compacto y rápido para procesadores embebidos ampliando MATLAB Coder y Simulink Coder con optimizaciones avanzadas y creando un ejecutable para un sistema embebido o una placa de prototipado rápido.



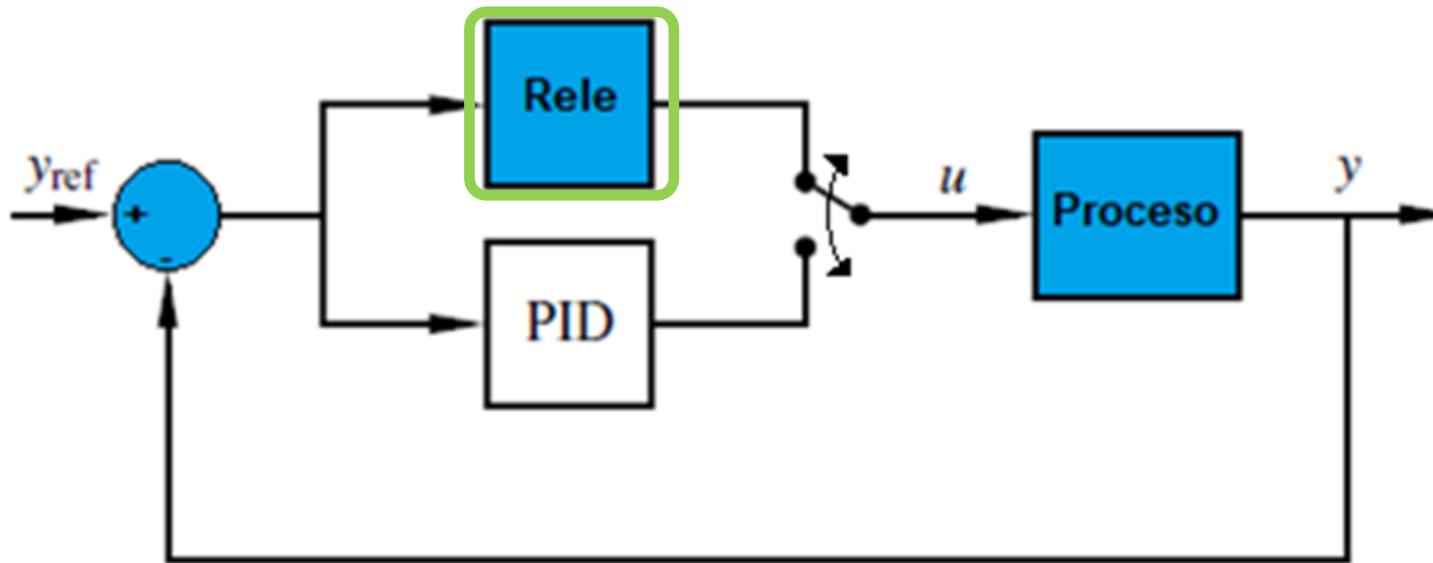
## MATLAB con Embedded Real Time.



- Utilizando el *Embedded Coder* se puede descargar el código generado en un target del tipo *Embedded Real Time*.
- Configurando al *Simulink* en *Modo Externo* se pueden monitorear las variables y ajustar los parámetros en tiempo real.



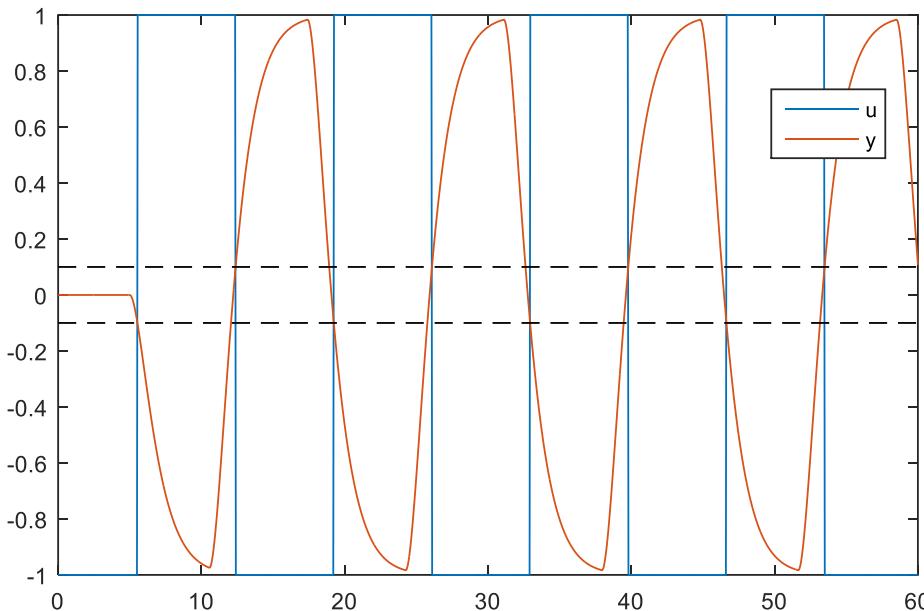
## Estado del arte: Método del relé simétrico



Aplicación del relé simétrico en el lazo de control.



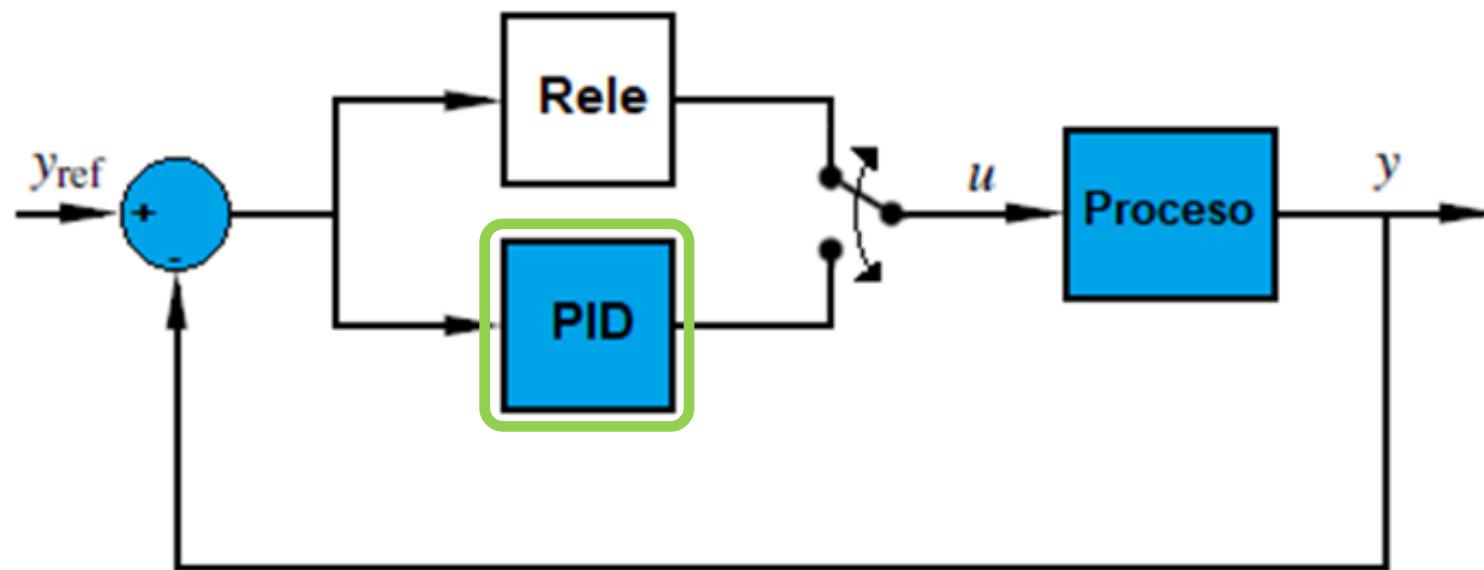
## Estado del arte: Método del relé simétrico



Experimento típico con relé simétrico.



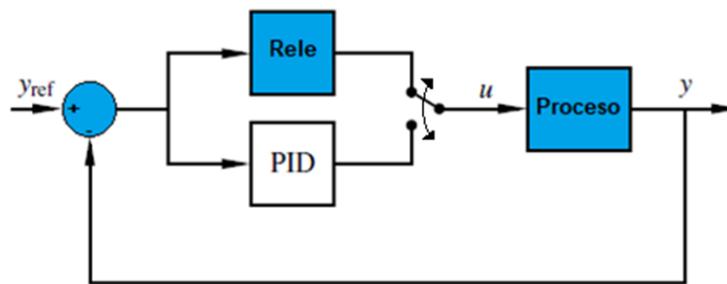
## Estado del arte: Método del relé simétrico



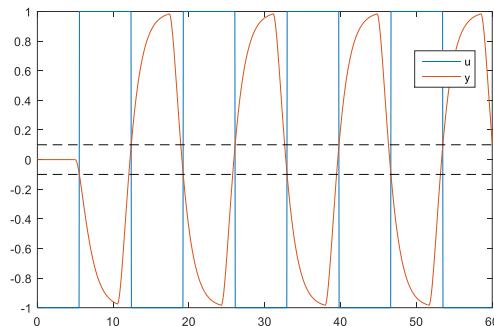
Aplicación PID-ZN en el lazo de control.



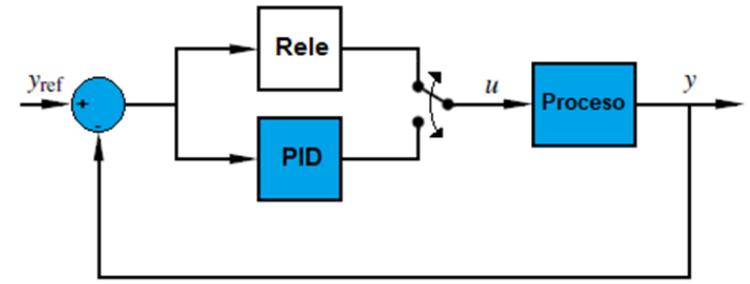
## Estado del arte: Método del relé simétrico



Aplicación del relé simétrico en el lazo de control.



Experimento típico con relé simétrico.



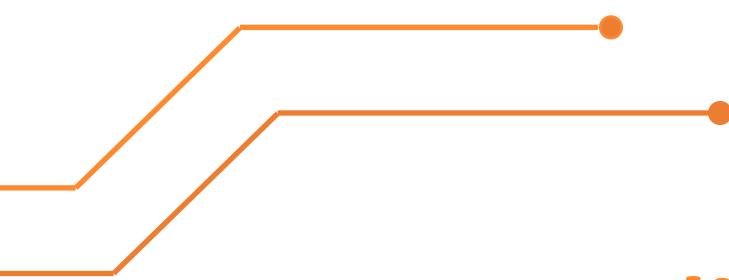
Aplicación PID-ZN en el lazo de control.

A

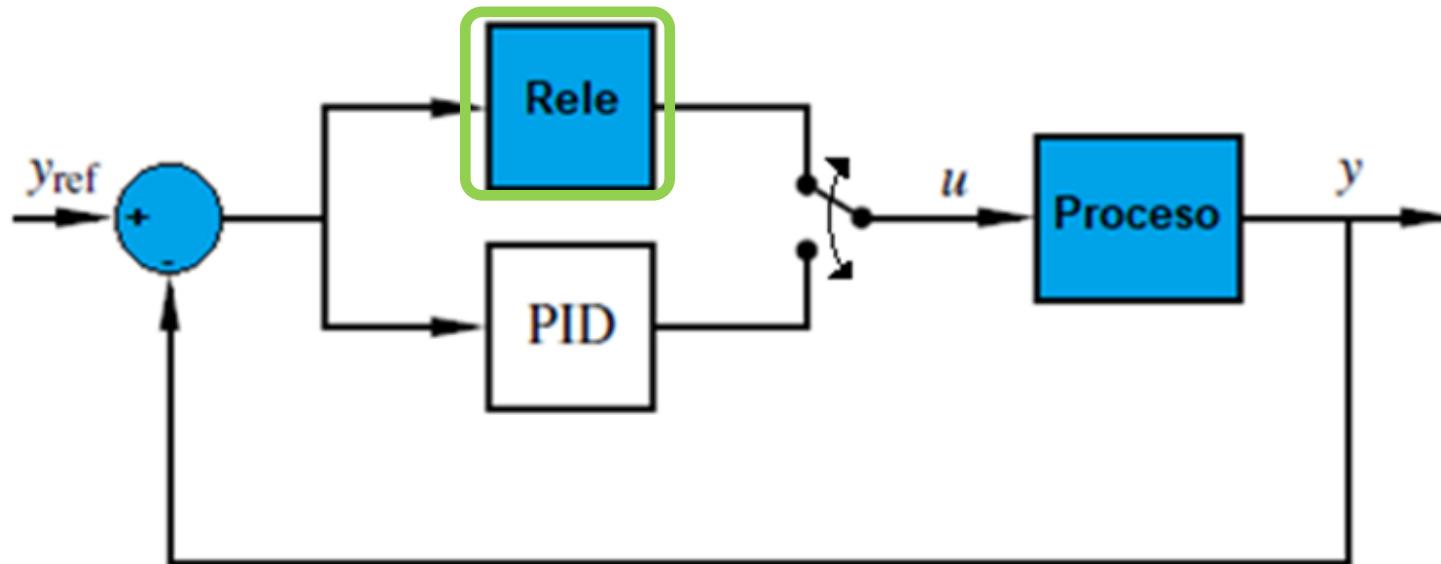
*El ajuste por ZN propone respuestas a lazo cerrado subamortiguadas y valores bajos de MF.*

B

*Solo permite obtener un punto de la respuesta en frecuencia, por lo que no tiene en cuenta las imprecisiones del modelo de la planta en otros valores de frecuencia que pueden llevar a la inestabilidad.*

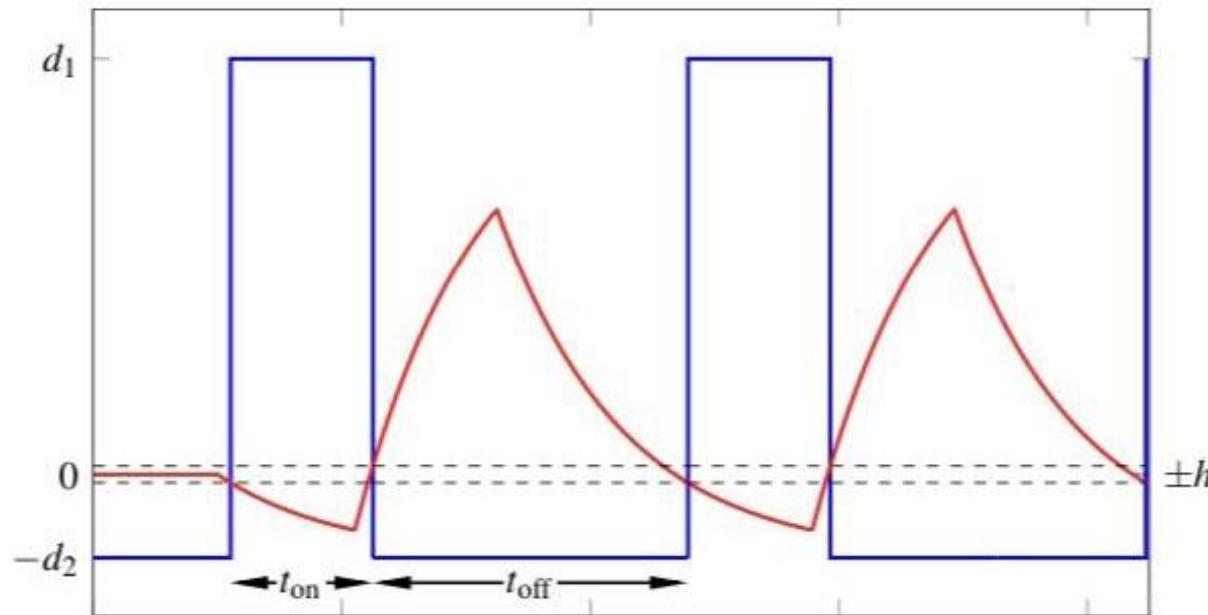


# Estudio del Método del Relé Asimétrico



Aplicación del relé asimétrico en el lazo de control.

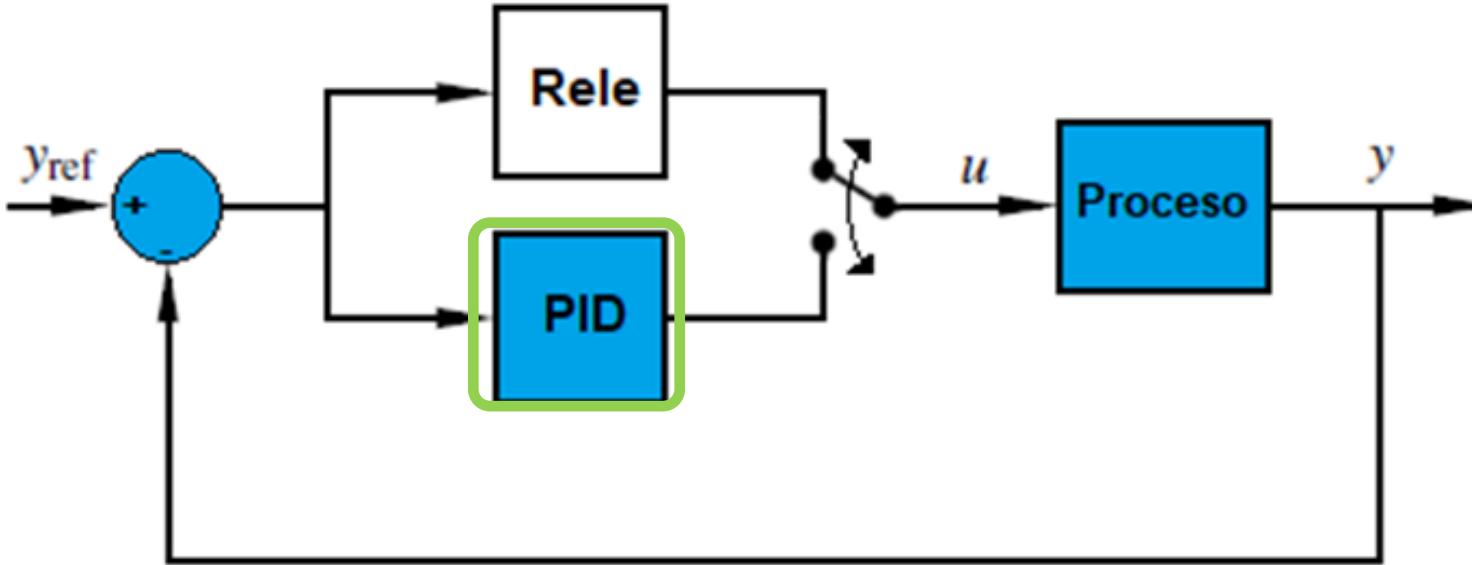
# Estudio del Método del Relé Asimétrico



Experimento típico con relé asimétrico.

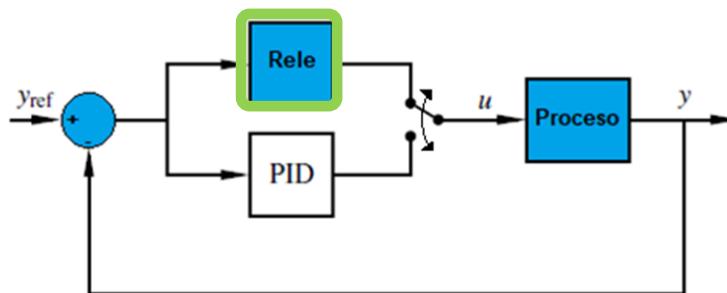


# Estudio del Método del Relé Asimétrico

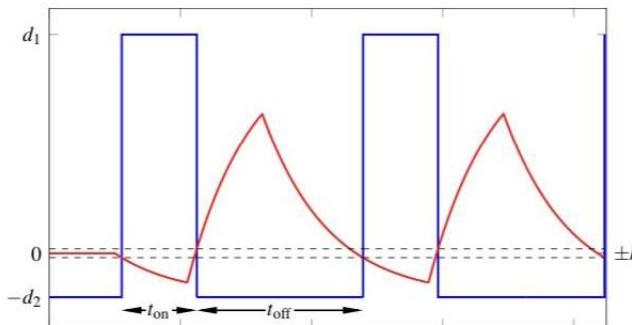


Aplicación PID-IMC en el lazo de control.

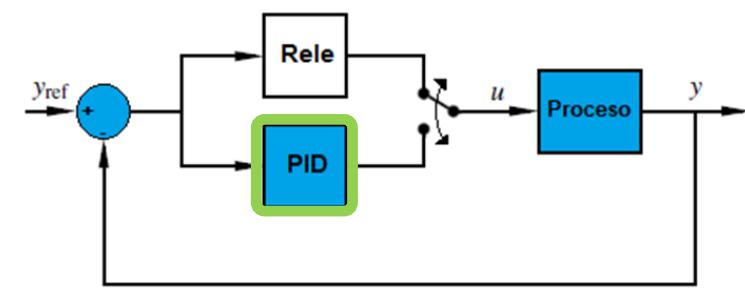
# Estudio del Método del Relé Asimétrico



Aplicación del relé asimétrico en el lazo de control.



Experimento típico con relé asimétrico.



Aplicación PID-IMC en el lazo de control.

A

Referencias en el tema: Berner – Åström -Hägglund

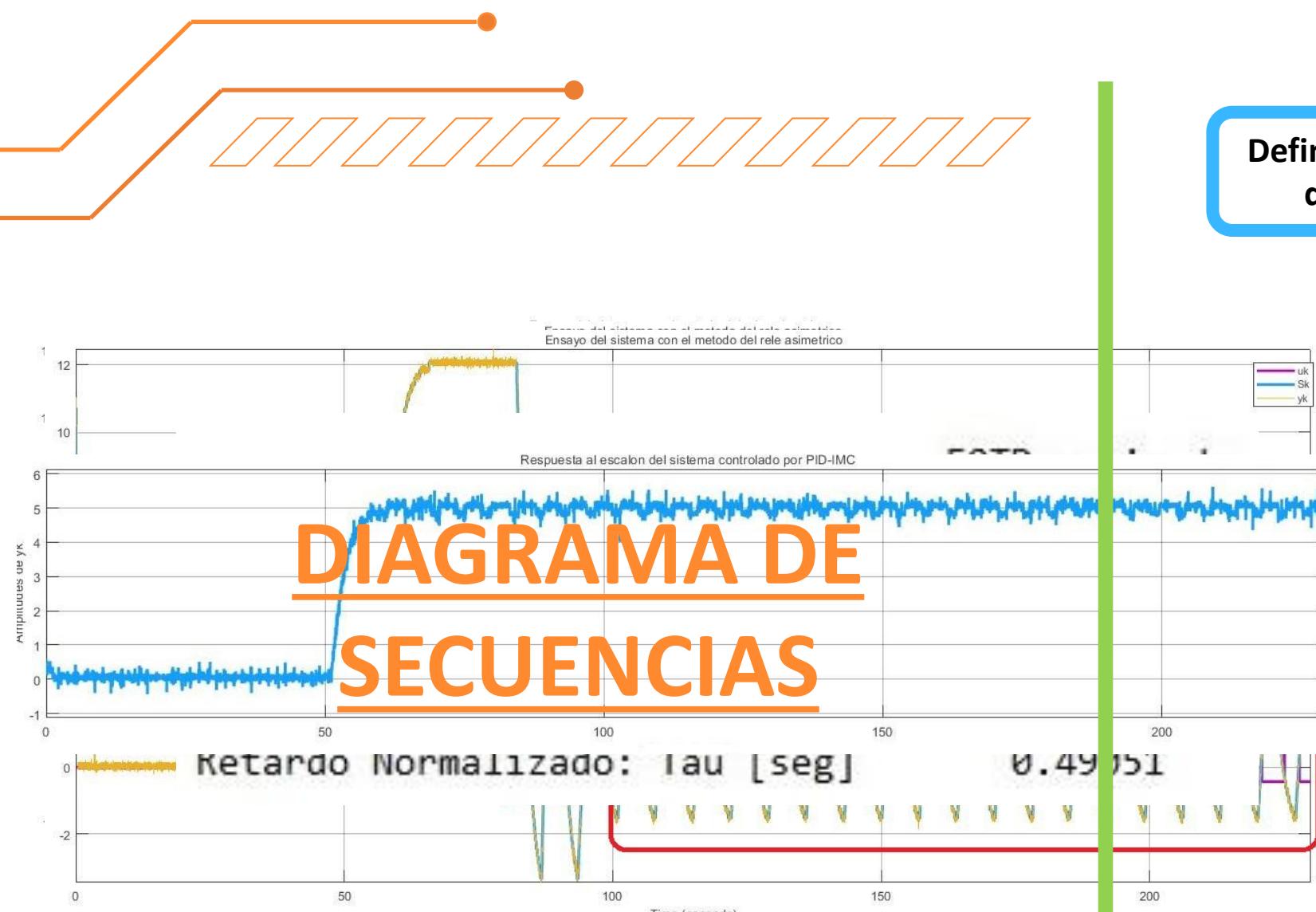
B

Posibles modelos: ITD, IFOTD, FOTD, SOTD. En este trabajo: FOTD

C

Possible ajustes PID: MIGO, AMIGO, IMC. En este trabajo: IMC

INICIO



Defino Asimetría y la máxima/mínima excusión de salida del proceso durante el ensayo.

Medición de ruido y ajuste de  $h$ .

Ajuste de niveles  $d_1$  y  $d_2$  del rele

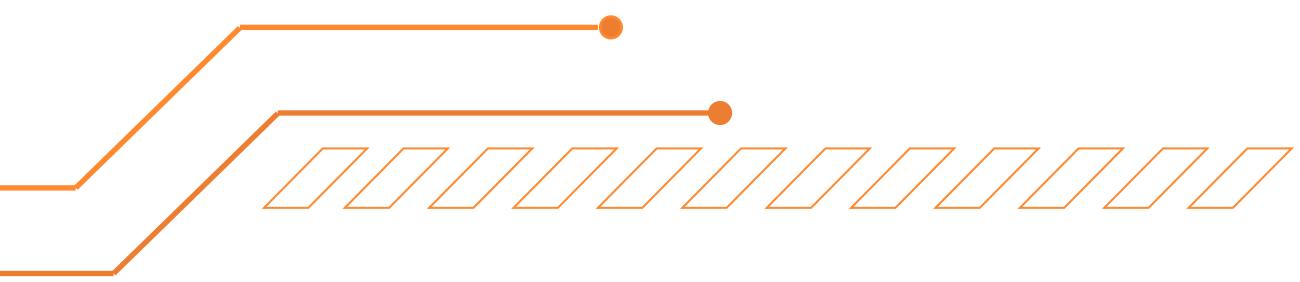
Ensayos con Relé

Estimación Modelo FOTD

Ajuste PID - IMC

Control usando PID

FIN



## Análisis del Modelo FOTD

$$G_{(s)} = \frac{K}{1 + sT} e^{-sL}$$

*T* : constante de tiempo del modelo FOTD.

*L* : retardo de tiempo del modelo FOTD.

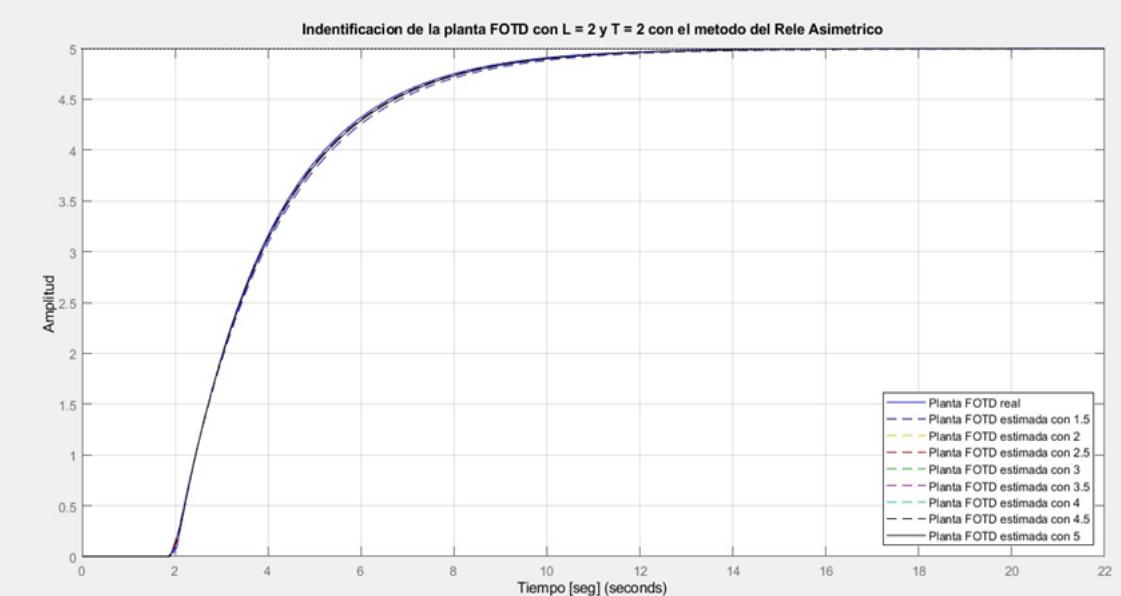
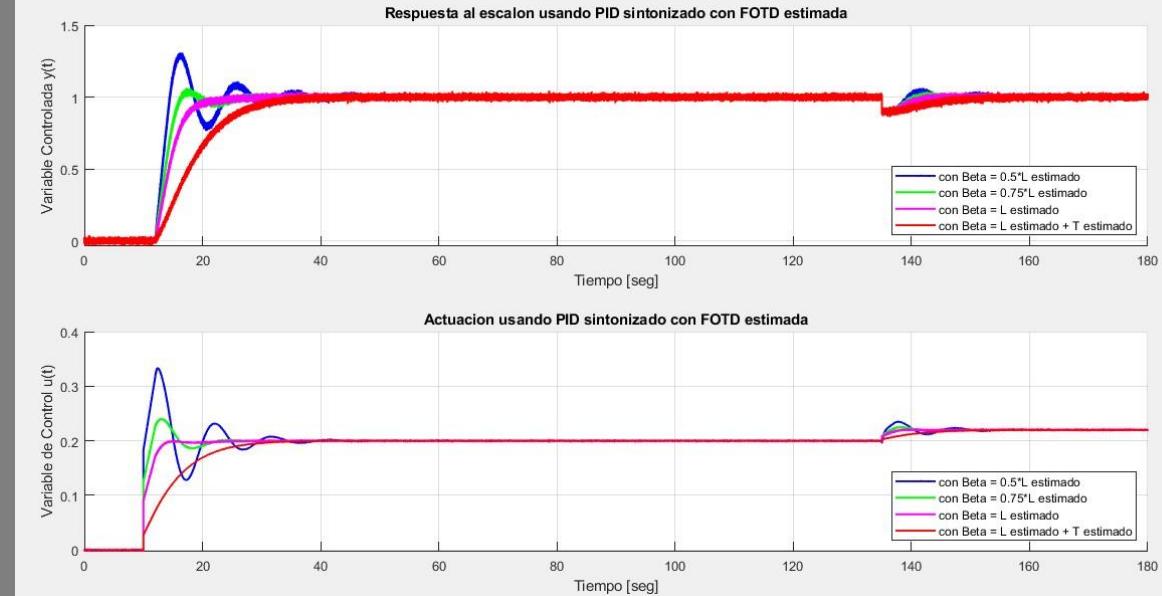
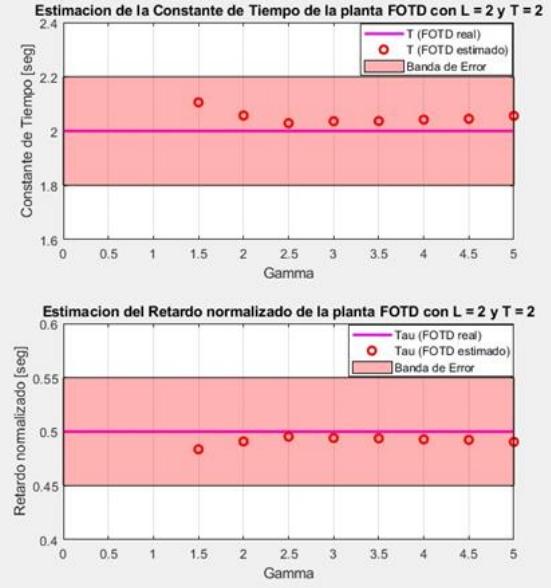
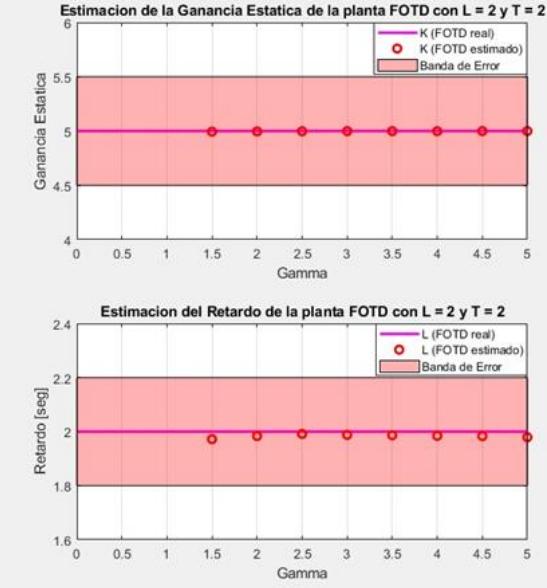
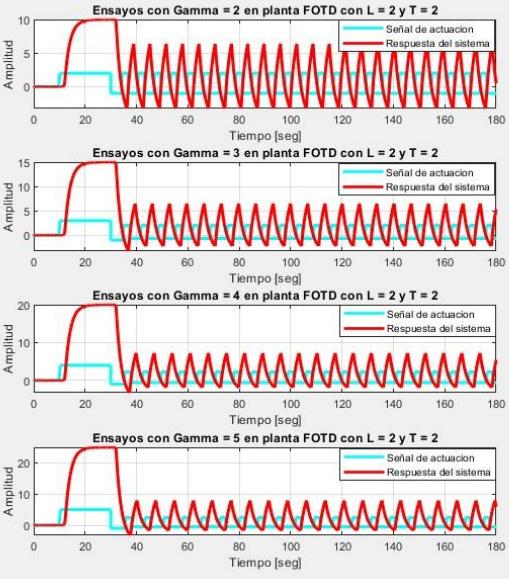
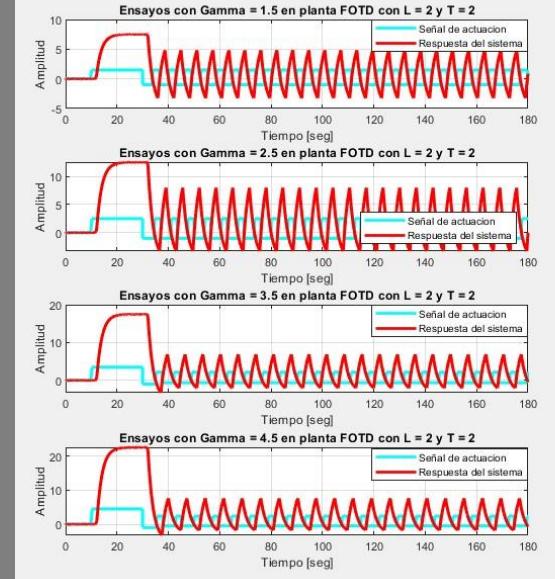
*K* : ganancia estática del modelo FOTD.

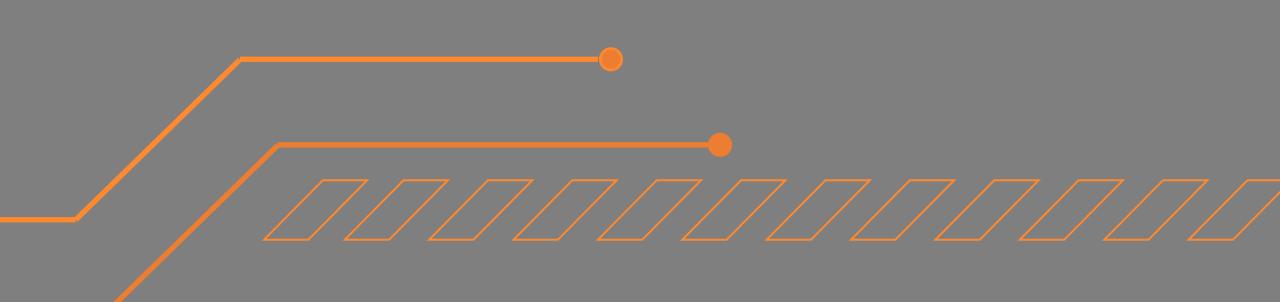
Retardo de tiempo normalizado.

$$\tau = \frac{L}{L+T} \quad 0 \leq \tau \leq 1$$

- *FOTD con dinámica de constante de tiempo dominante (lag dominated)*:  $\tau \rightarrow 0$
- *FOTD con dinámica de retardo dominante (delay dominated)*:  $\tau \rightarrow 1$
- *FOTD con dinámica de balanceada (balanced)*:  $\tau \cong 0.5$

# Implementación de Simulaciones *Offline* para la Validación del Método





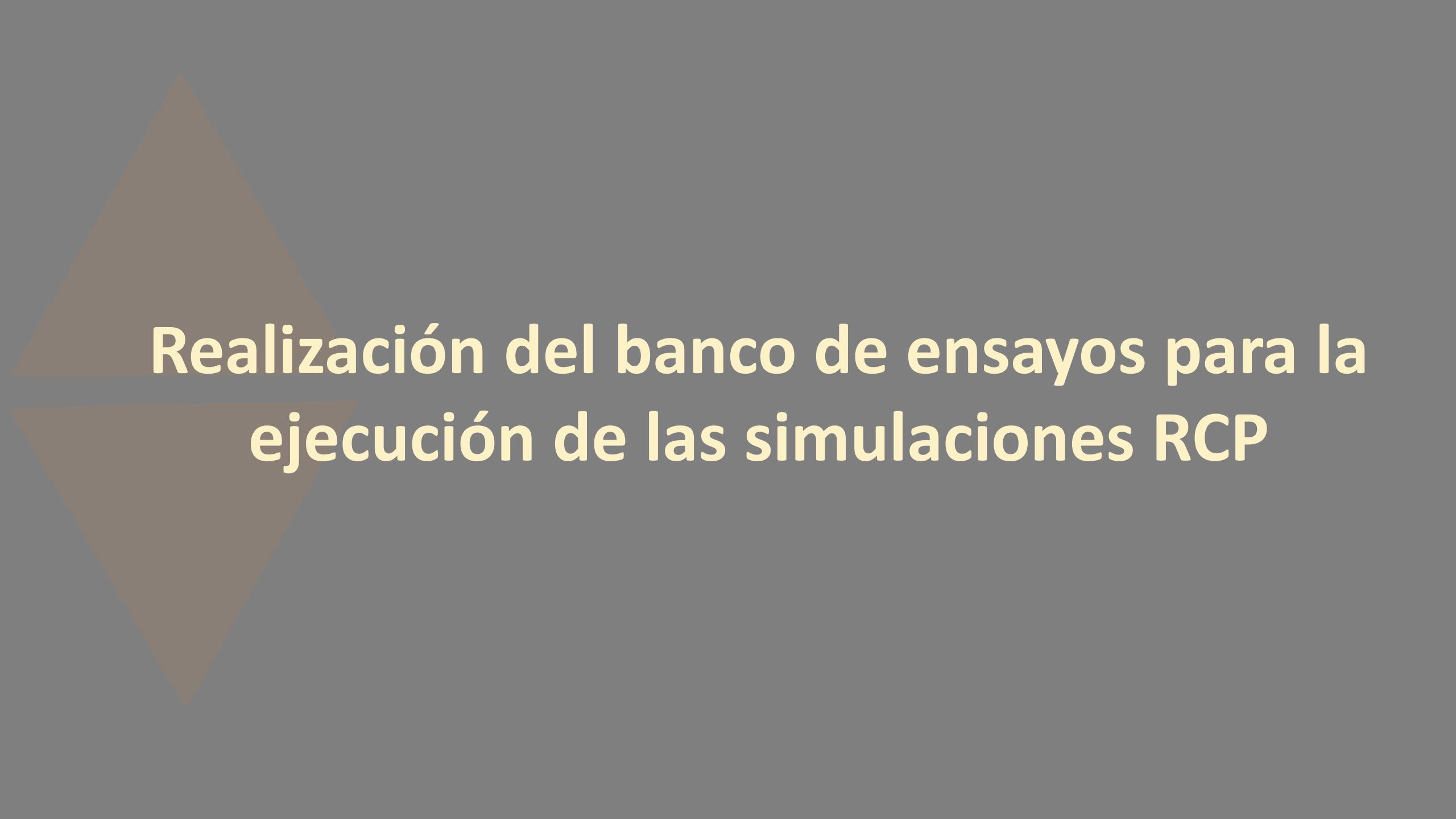
## RESULTADOS OBTENIDOS (Ejemplo para un sistema FOTD balanceado)

Parametros_Fijos							
Potencia de Ruido: no	1e-07	PID_FOTD_REAL	PID_FOTD_ESTIMADO				
Beta		4	4.0351				
Ganancia Proporcional: Kp		0.02716	0.02756				
Ganancia Integral: Ki		0.81818	0.8011				
Ganancia Derivativa: Kd		0	0				
3.5	0.22647	2.1475	-0.61358	2.3876	4.4977	0.073836	1.8837
4	0.22647	2.2611	-0.56528	2.3463	4.6985	0.080149	2.0025
4.5	0.22647	2.3746	-0.52769	2.3139	4.8812	0.085849	2.1095
5	0.22647	2.4881	-0.49761	2.2868	5.0498	0.091032	2.2082

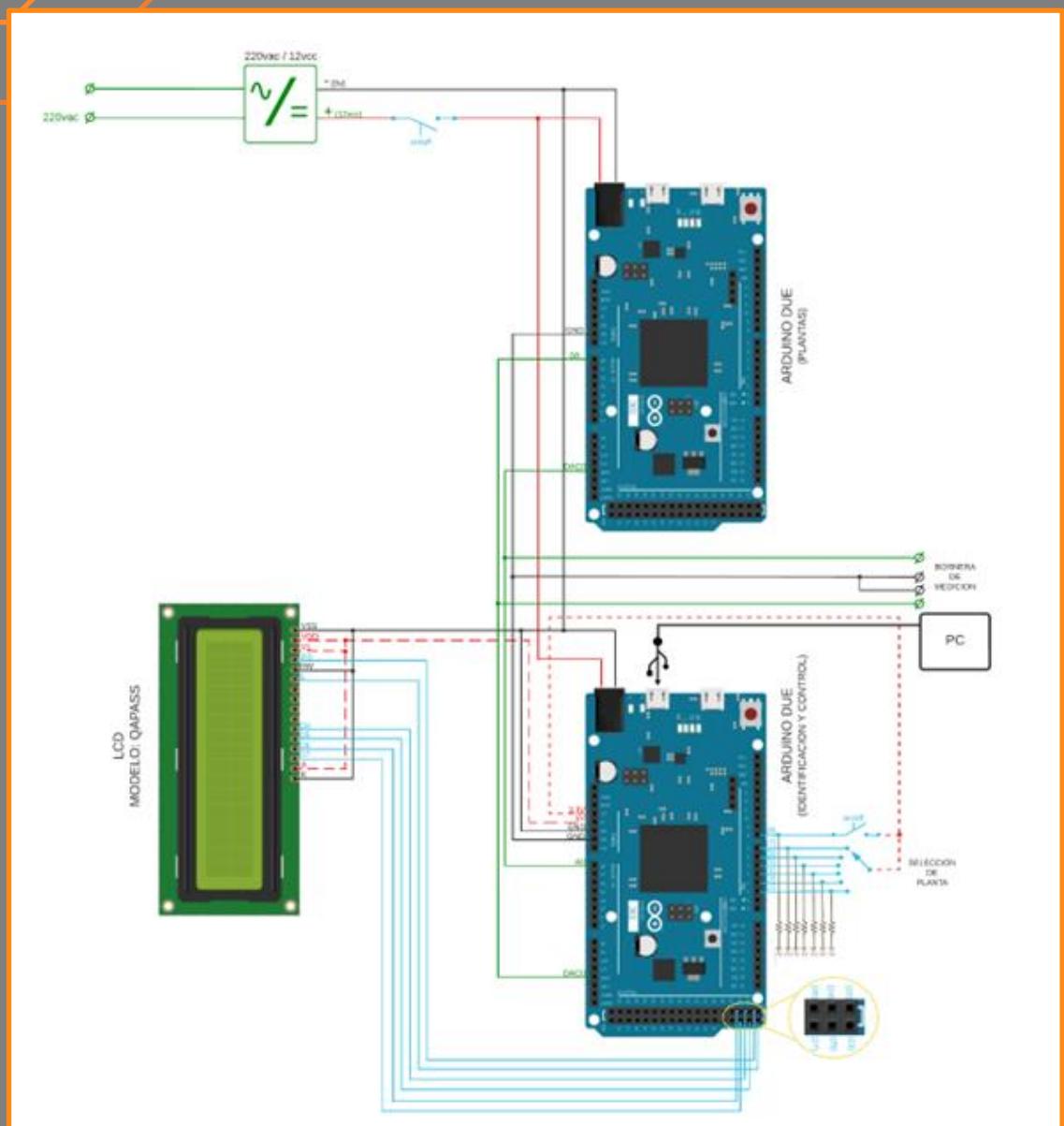
... Si el modelo a ensayar no es FOTD puro, se compara el valor obtenido de la estimación contra los modelos correspondientes para la CURVA DE RESPUESTA y contra el modelo aproximado por la regla de primera mitad de Skogetad.

**Y si la planta a ensayar no es FOTD pura ?**

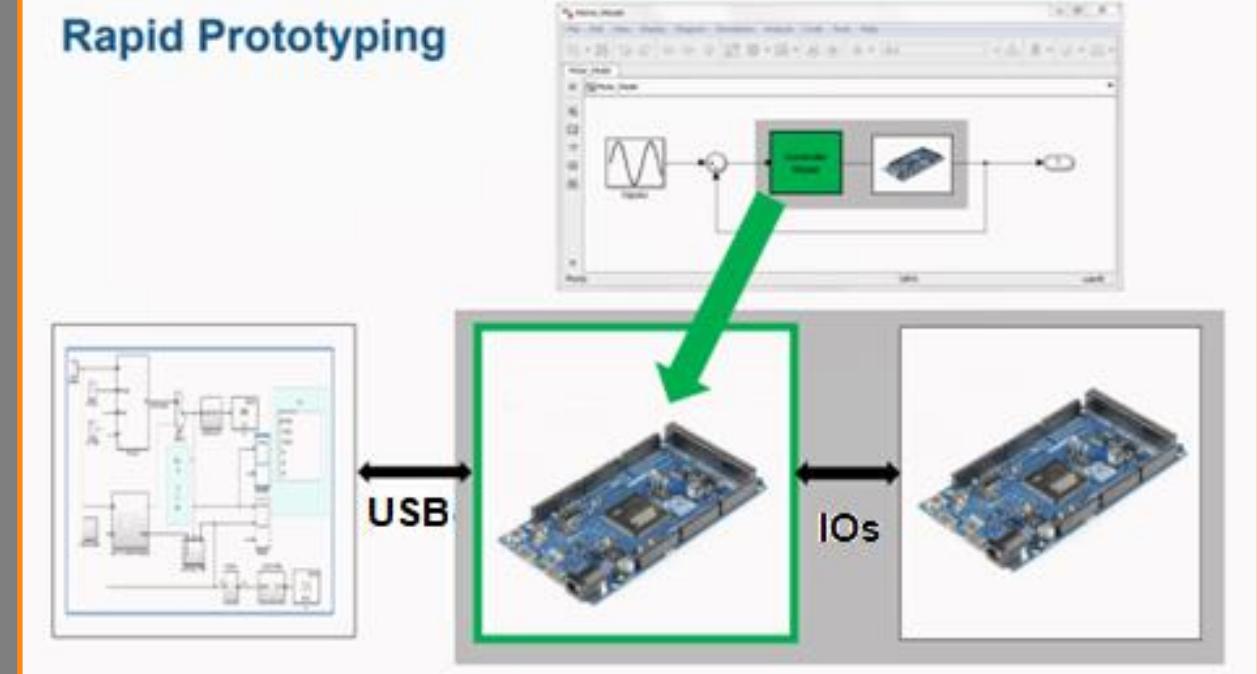
	FOTD_aproxSK	FOTD_aprox	FOTD_estimado
Ganancia Estatica: K	1	1	0.99994
Constante de Tiempo: T [seg]	1.5	2.9	2.7647
Retardo: L [seg]	2.501	1.4	1.5223
T+L [seg]	4.001	4.3	4.287
Retardo Normalizado: Tau [seg]	0.62509	0.32558	0.35509

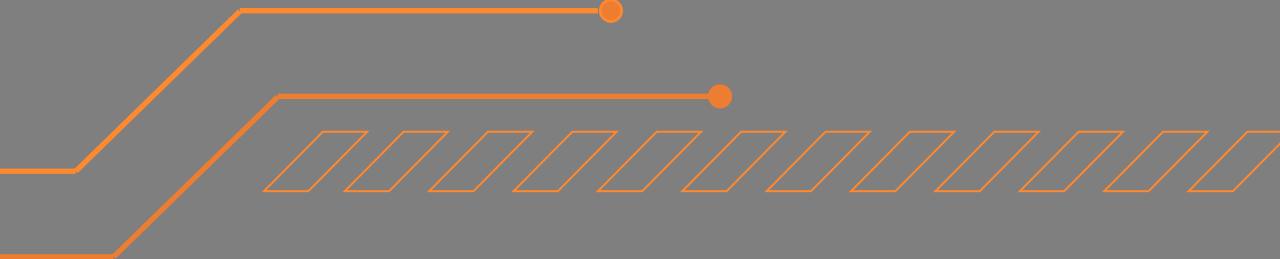


# Realización del banco de ensayos para la ejecución de las simulaciones RCP



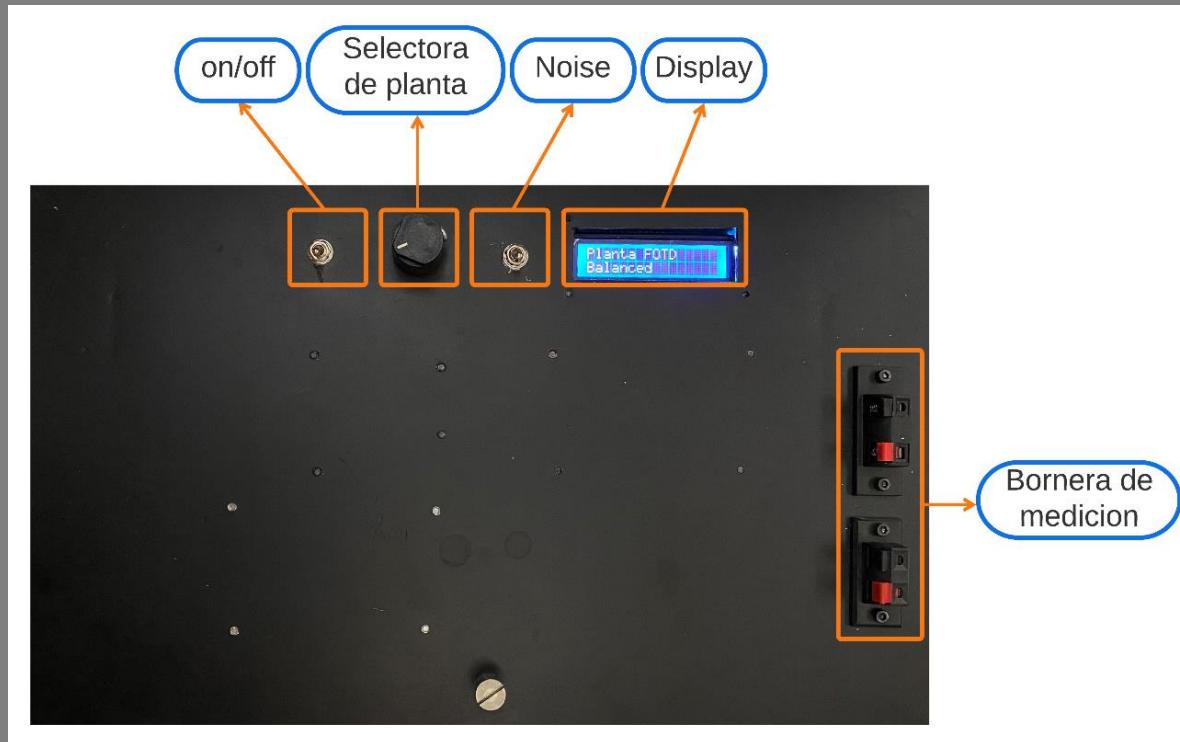
## Esquema eléctrico de la implementación del banco de ensayos.





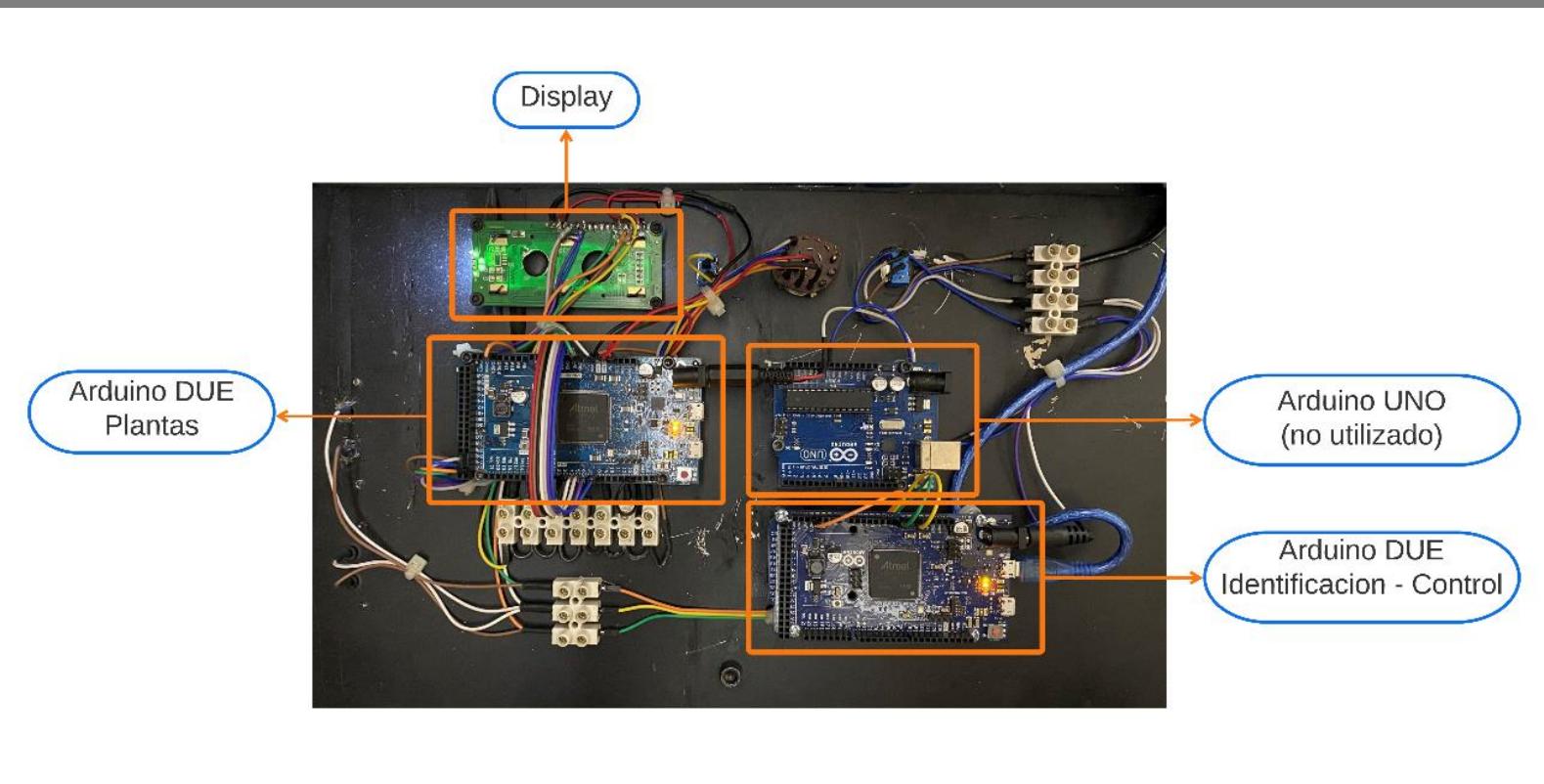
# Descripción del banco construido

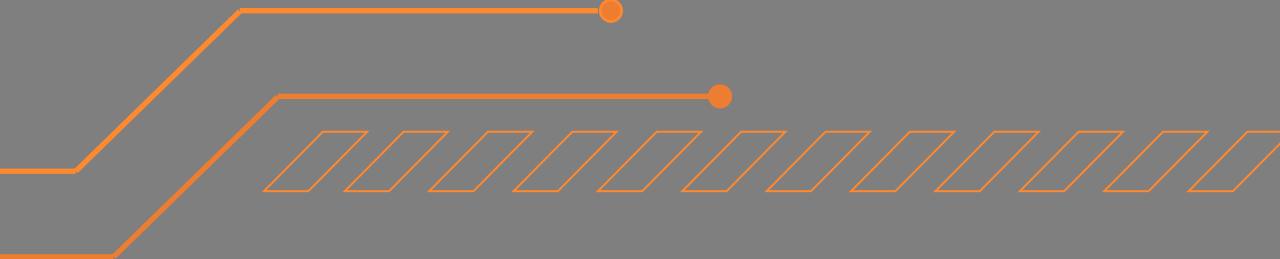
## Vista Superior



# Descripción del banco construido

## Vista Interior





# Descripción del banco construido

Vista Frontal

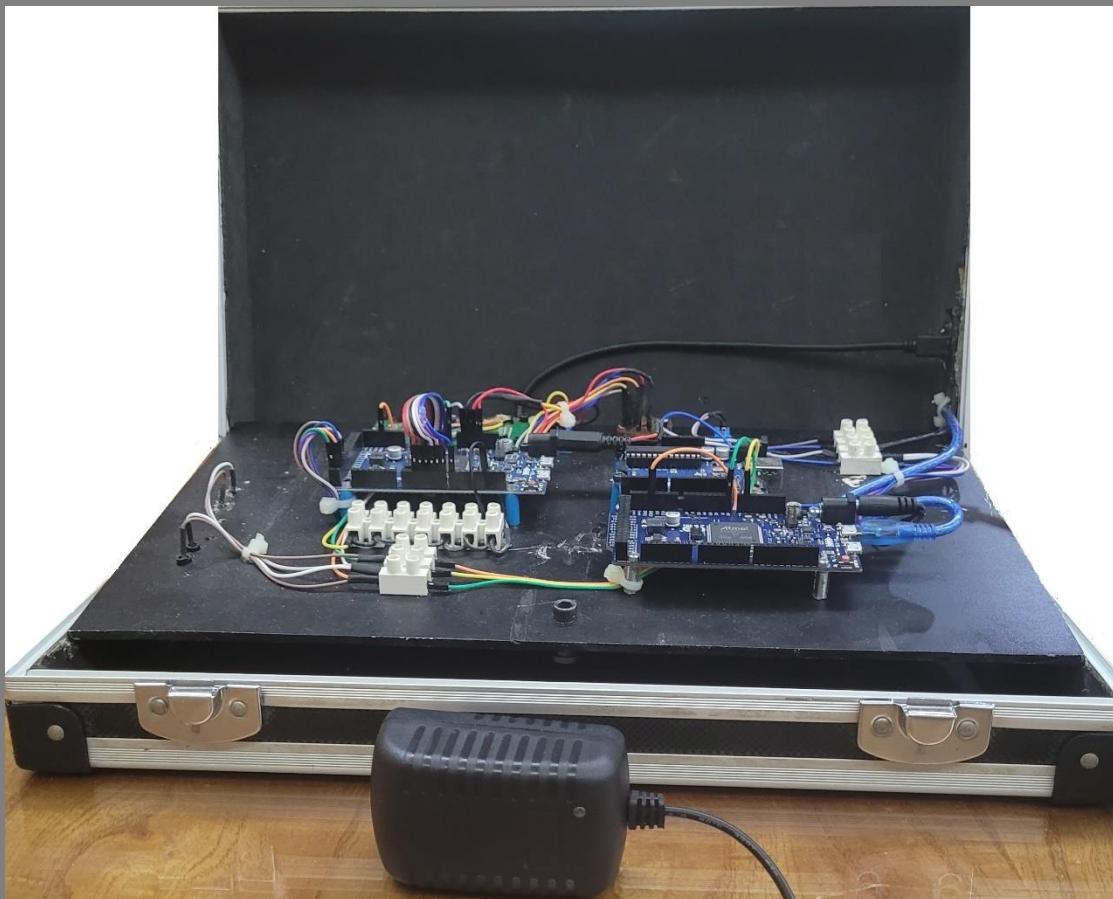
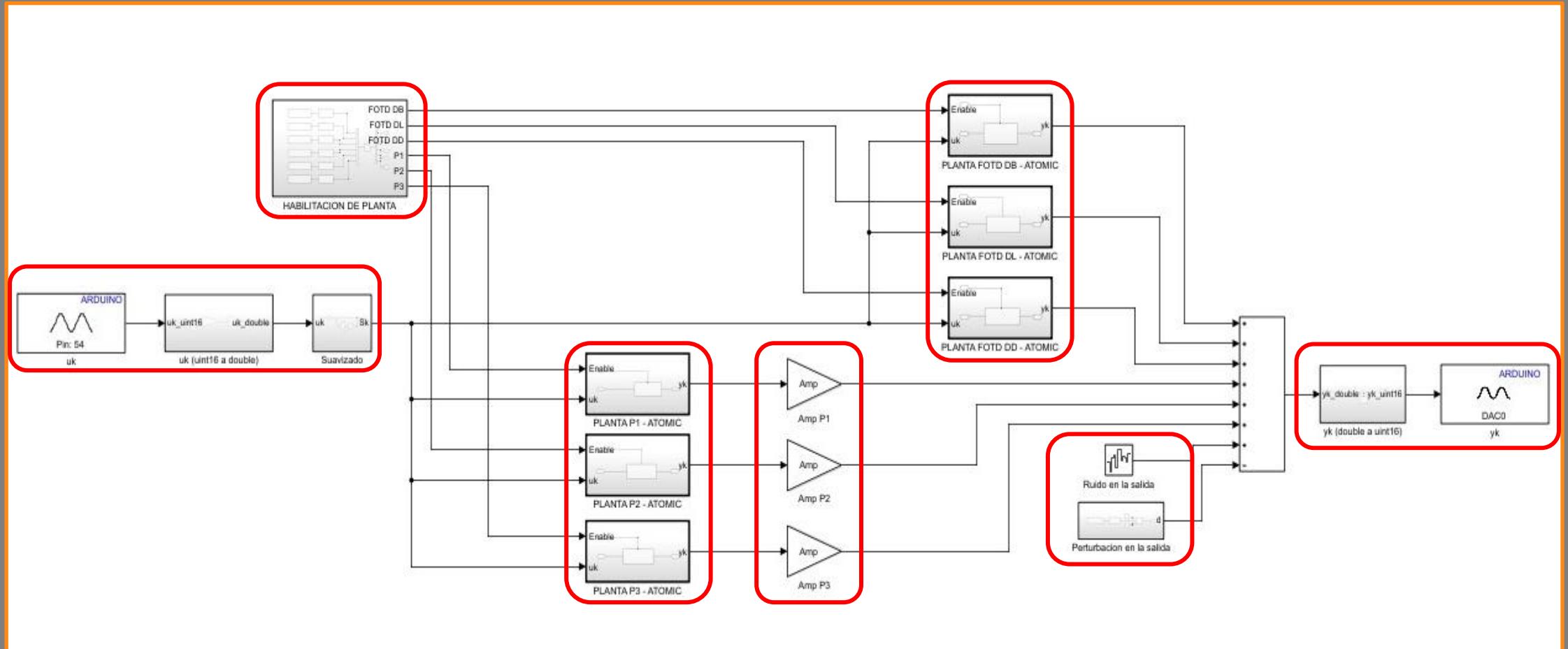
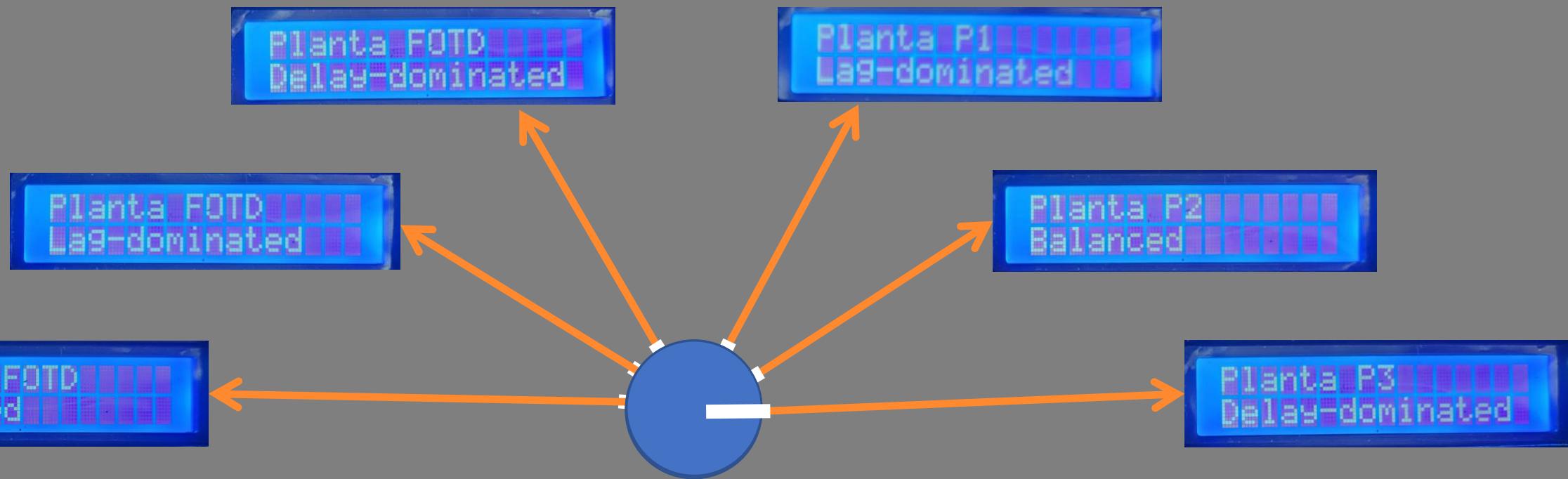


Diagrama en bloques que implementa a los procesos embebidos en el Arduino Planta, para ser ensayados.

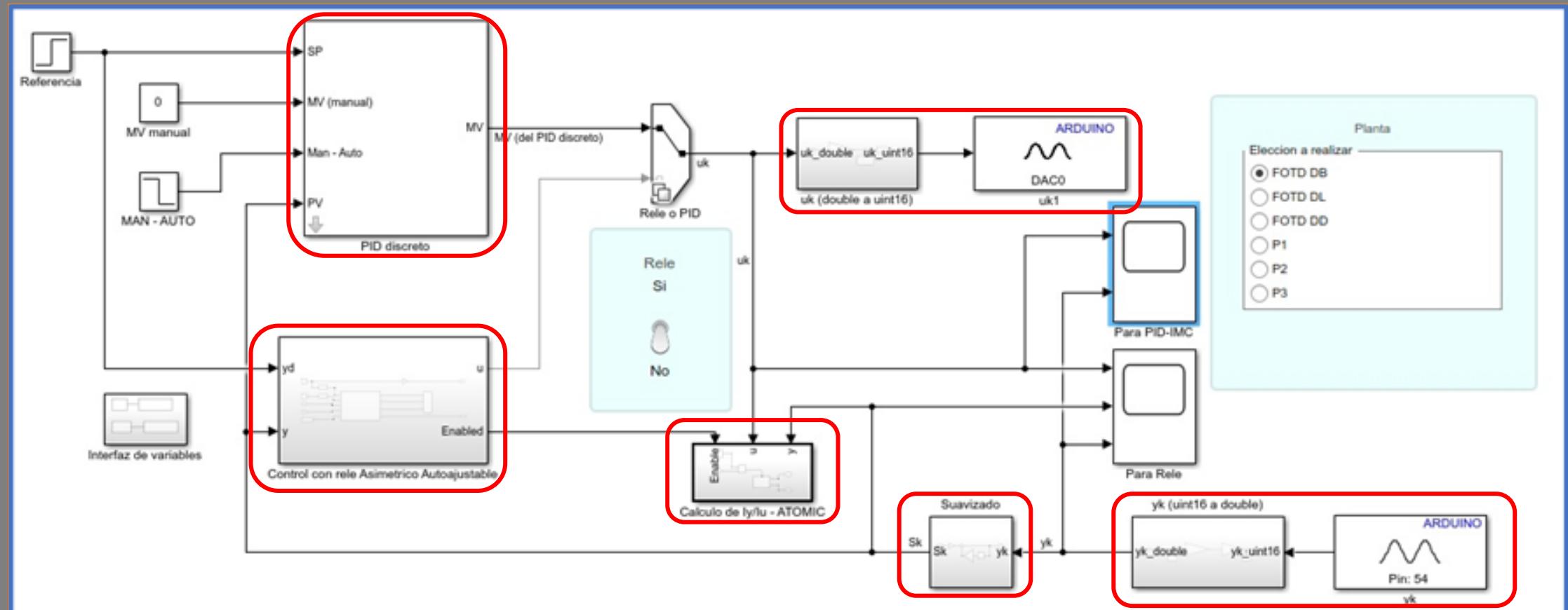


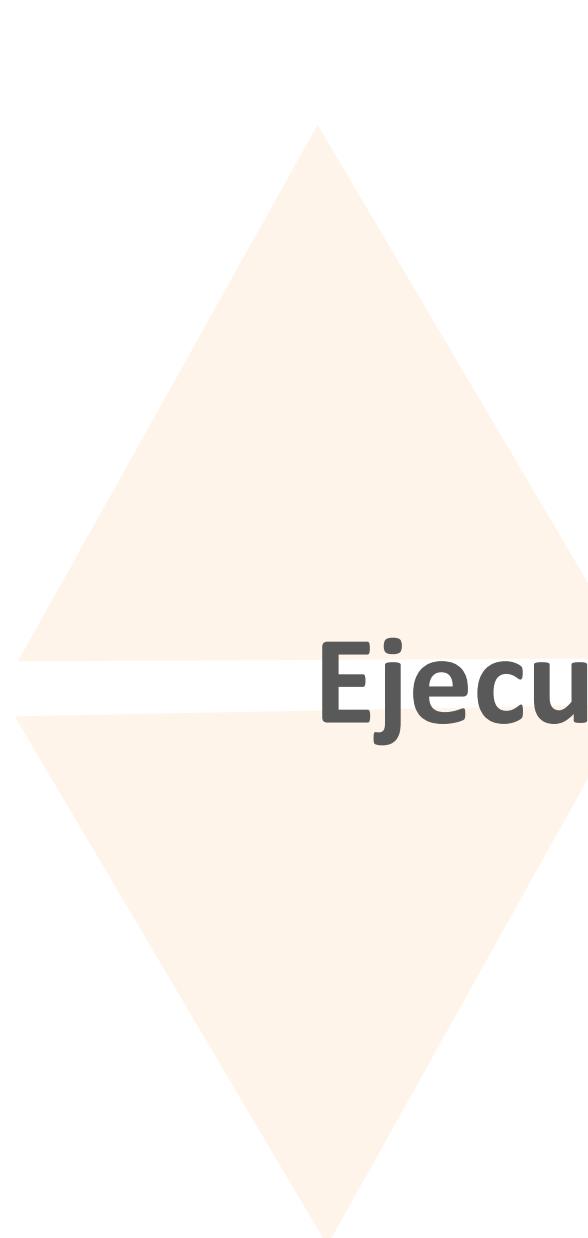
Selección del proceso a ensayar en el banco de pruebas para la simulación RCP.



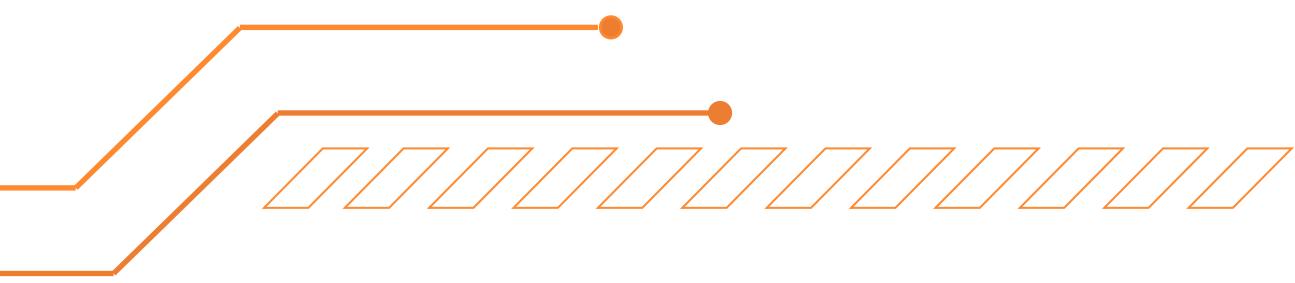
$$P_1(s) = \frac{PGPS(s)}{(s + 1)(0.1s + (1)(\frac{0.25}{0.25+1})^2)(0.001s + 1)}$$

## Diagrama en bloques del algoritmo de estimación de parámetros FOTD, sintonización y control del lazo.

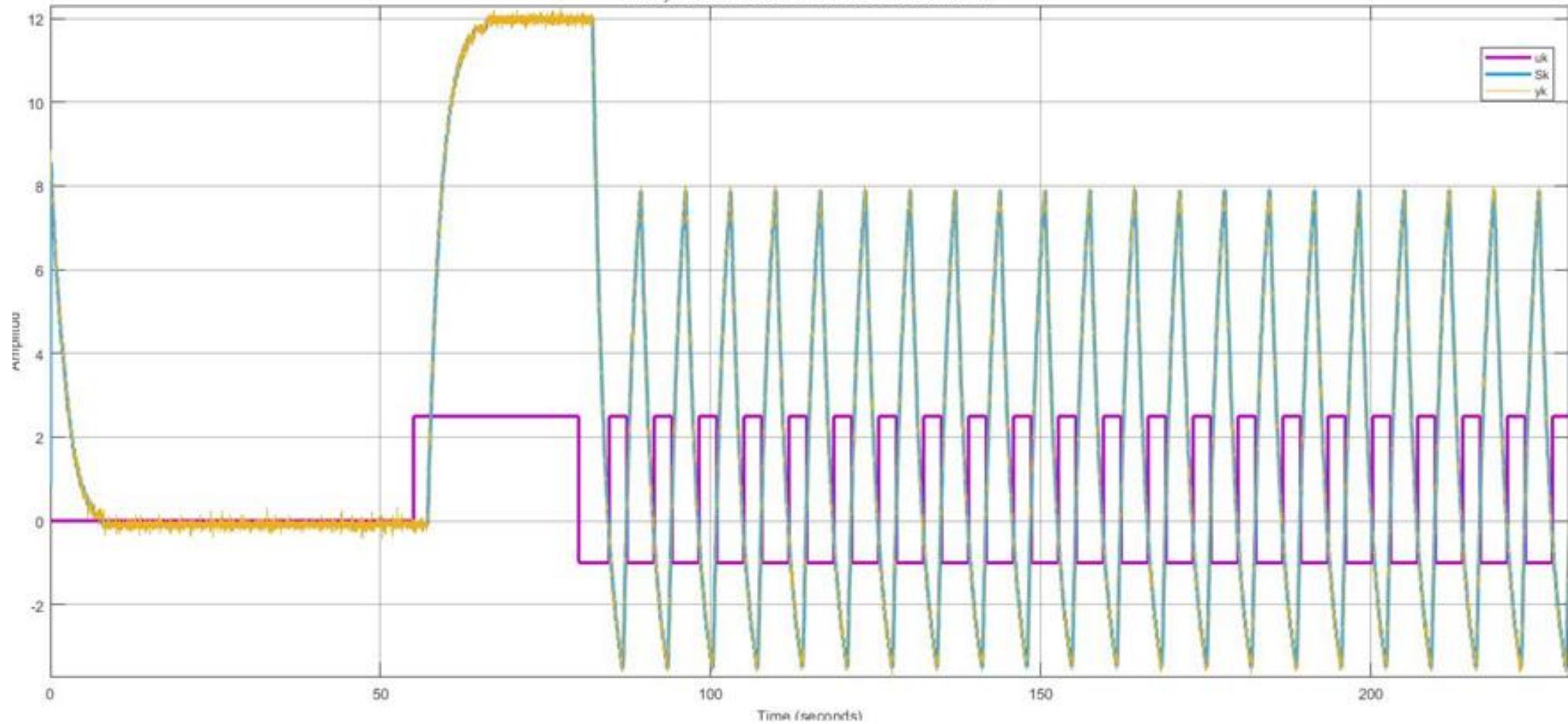




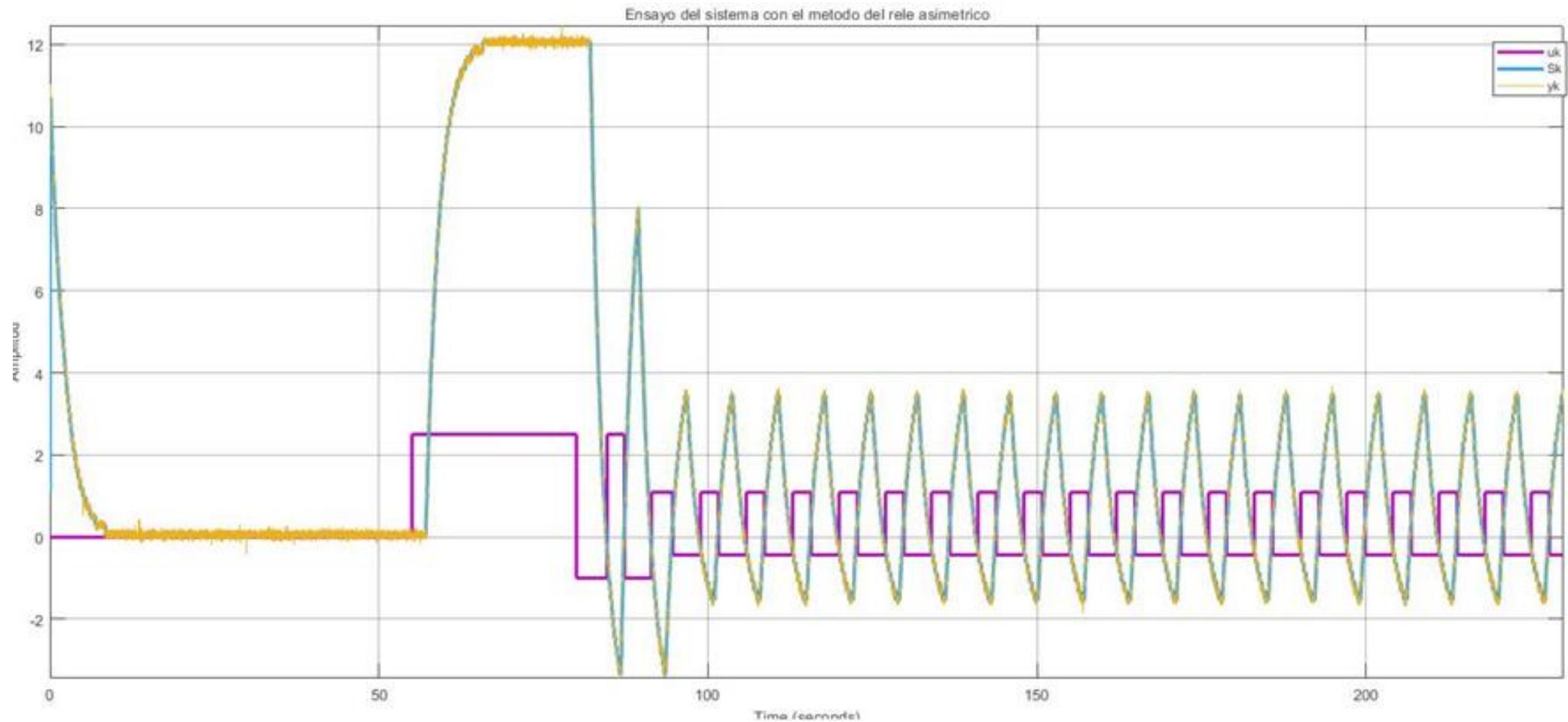
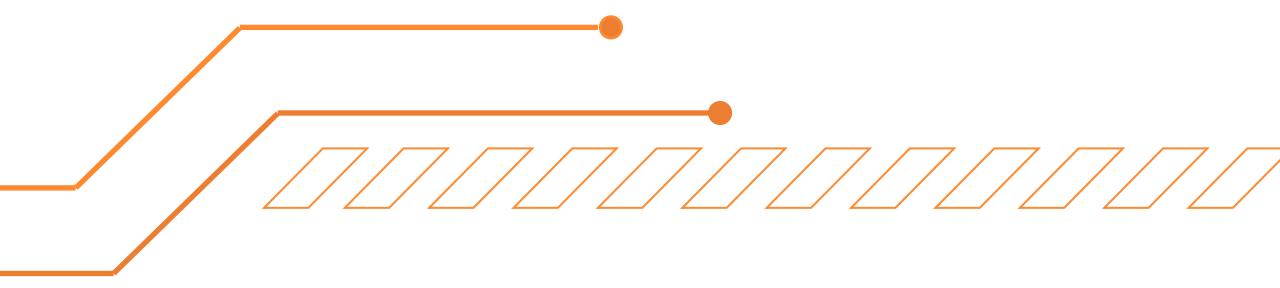
# Ejecución de las simulaciones RCP



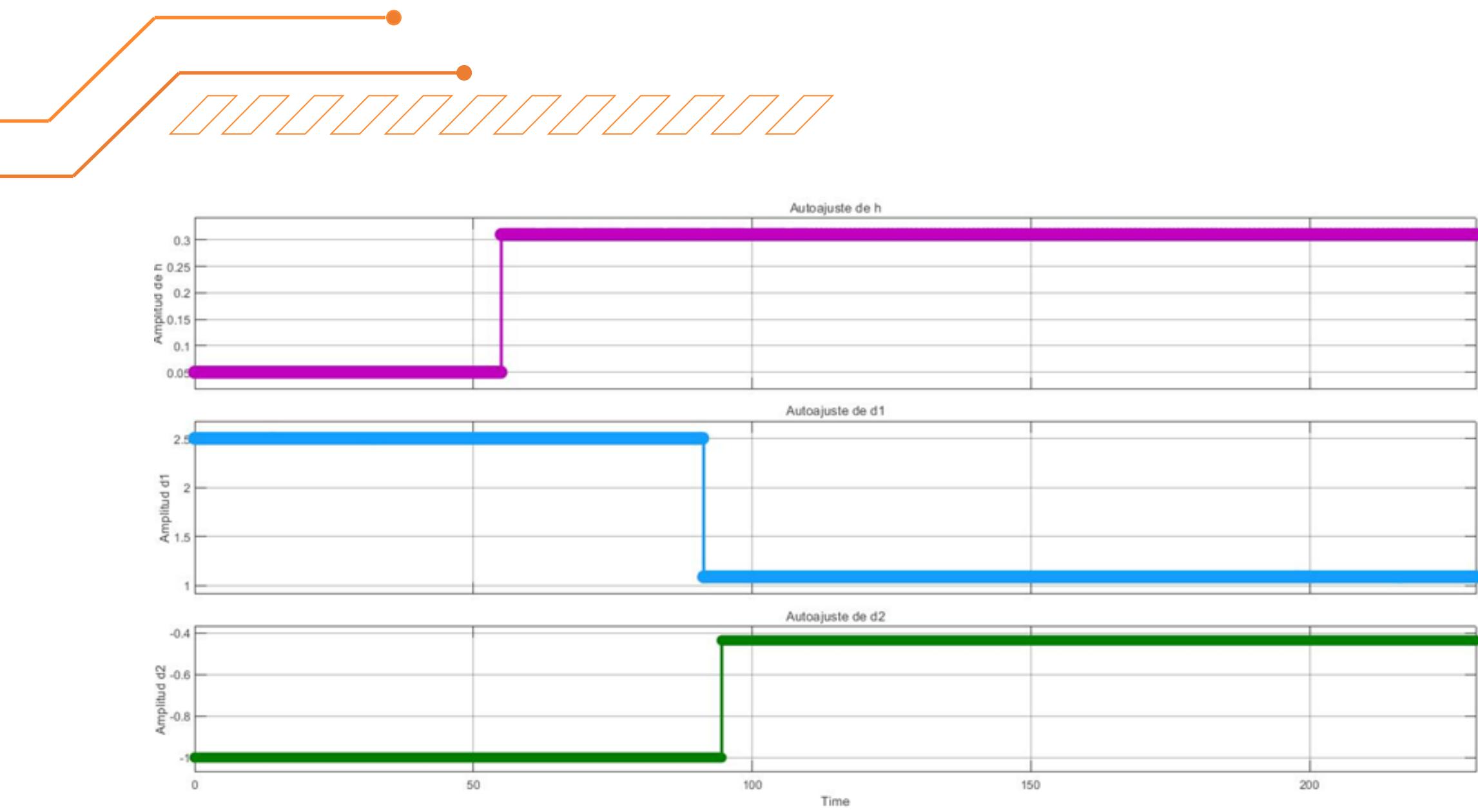
Ensayo del sistema con el metodo del relé asimetrico



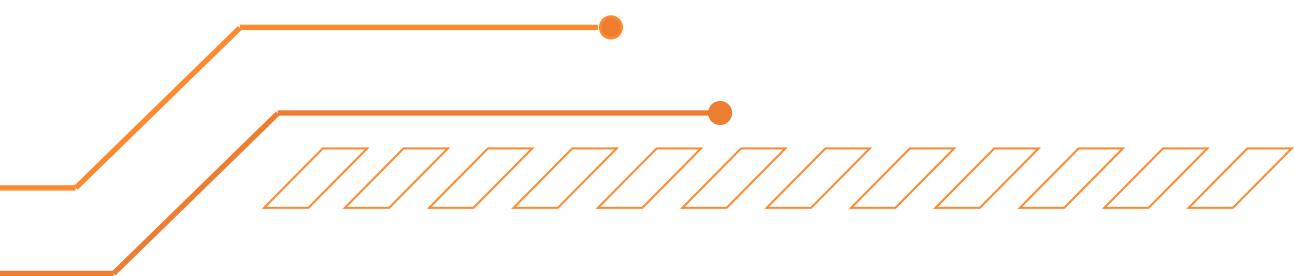
**Ensayo a un proceso FOTD balanceado que NO requiere autoajuste de niveles del relé asimétrico.**



Ensayo a un proceso FOTD balanceado que requiere autoajuste de niveles del relé asimétrico.



Ajuste de parámetros del relé asimétrico en el ensayo del proceso FOTD balanceado.



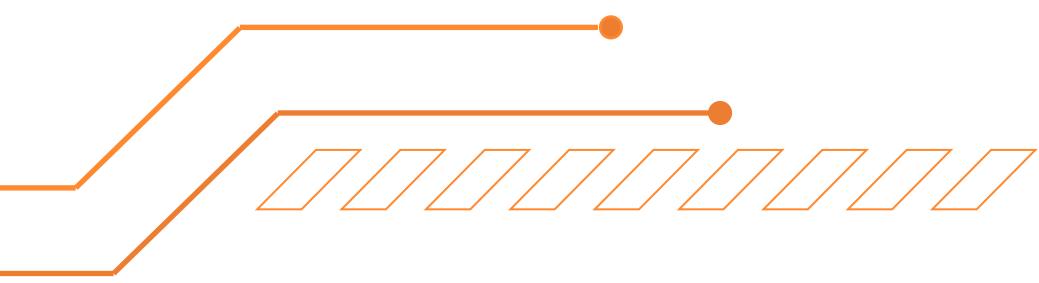
## ***RESULTADOS OBTENIDOS***

### ***(Ejemplo para un sistema FOTD balanceado)***

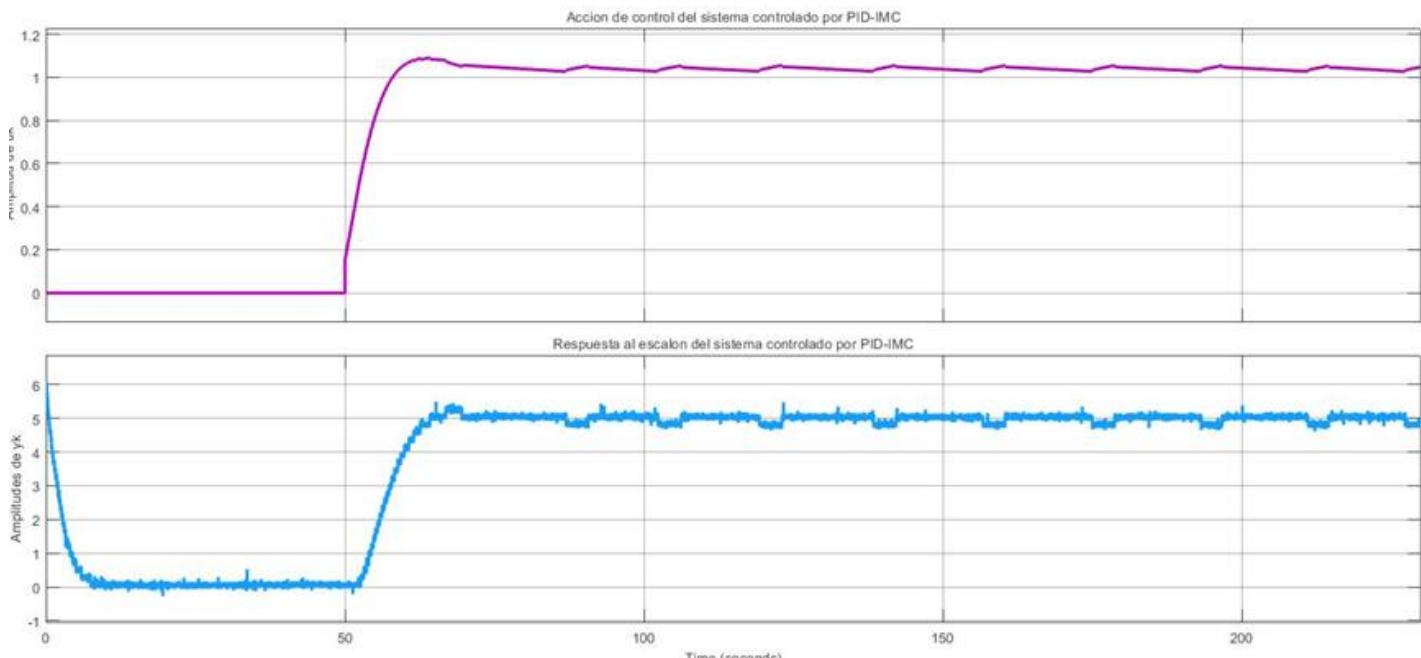
	FOTD	FOTD_estimado	Error_Relativo_Porcentual
Ganancia Estatica: K	5	4.065	18.701
Constante de Tiempo: T [seg]	2	1.7183	14.086
Retardo: L [seg]	2	2.1631	8.1527
T+L [seg]	4	3.8813	2.9664
Retardo Normalizado: Tau [seg]	0.5	0.5573	11.459

#### **PID\_FOTD\_ESTIMADO**

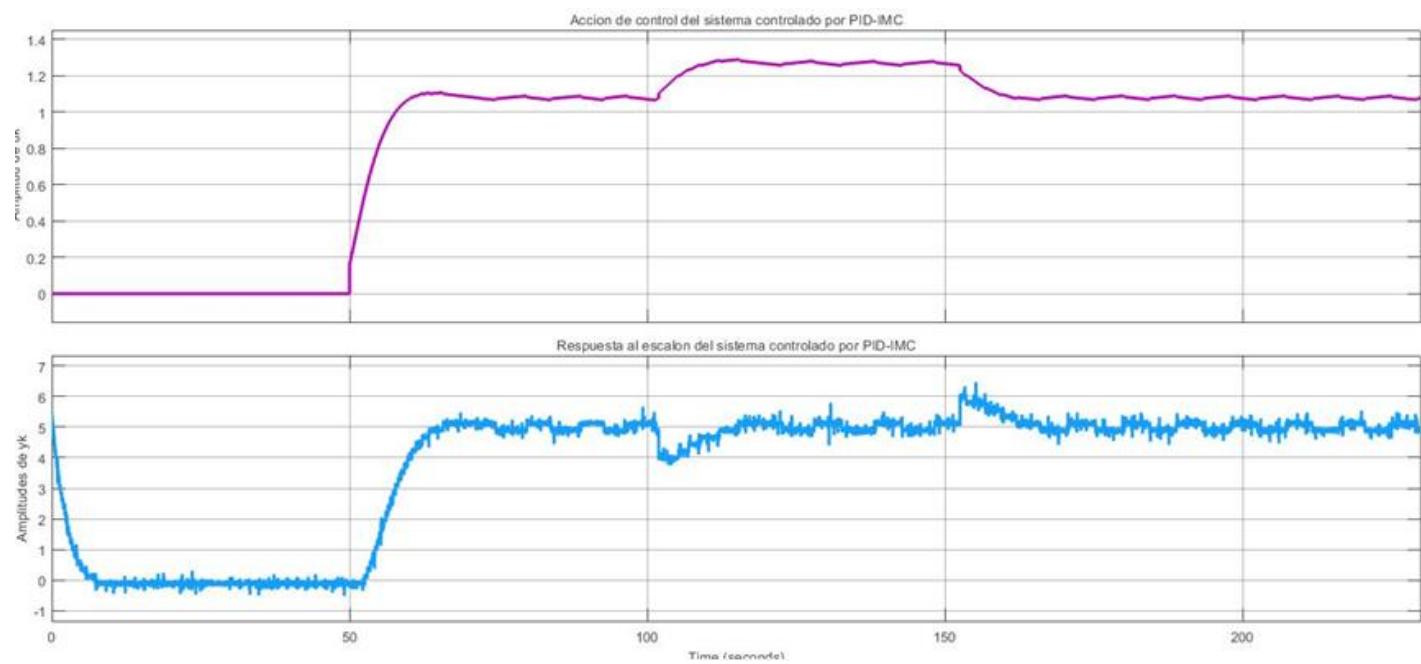
Beta	3.8813
Ganancia Proporcional: Kp	0.030498
Ganancia Integral: Ki	1.0047
Ganancia Derivativa: Kd	0

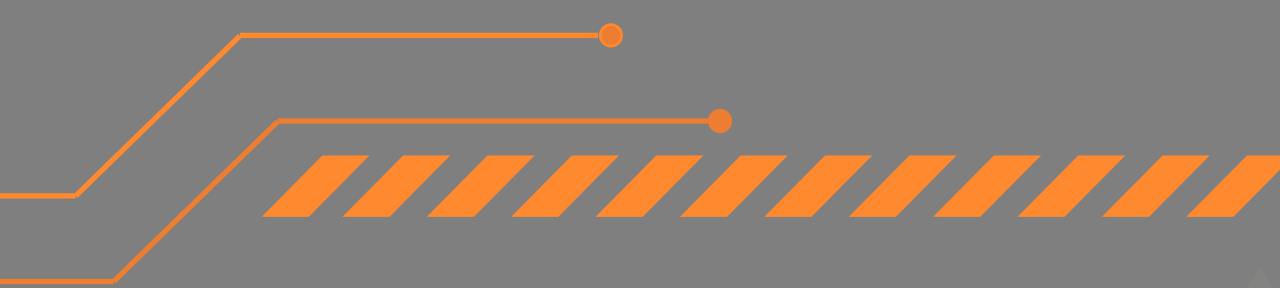


Respuesta al escalón SP=5 del lazo controlado, utilizando PID-IMC ajustado a partir de la estimación de un modelo FOTD balanceado.



Respuesta al escalón SP=5 del lazo controlado, utilizando PID-IMC ajustado a partir de la estimación de un modelo FOTD balanceado. Comportamiento ante la aplicación de una perturbación.

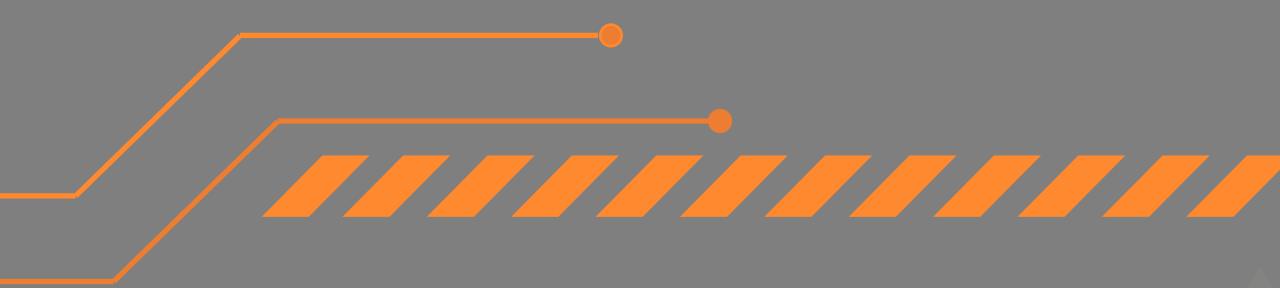




# Conclusiones

- La gran mayoría de los procesos industriales pueden ser controlados mediante un controlador **PID**. Sin embargo, muchos lazos podrían estar operando deficientemente debido al desconocimiento del correcto ajuste del mismo y estar impactando en pérdidas económicas, por lo que la existe una creciente tendencia para utilizar sintonizaciones automáticas. Si se combina esta creciente tendencia, con las múltiples ventajas que presenta la incorporación de simulaciones **HIL** y **RCP** para el desarrollo de prototipos de controladores, se logra unificar las ventajas de ambos y ofrecer un ambiente de prueba, investigación y capacitación entre otros. Esto resulta beneficioso para las industrias, ya que con un pequeño banco de entrenamiento, sería posible atacar este problema generándole confianza y conocimiento a los técnicos que realicen los nuevos ajustes.
- Es bien conocido que el equipamiento necesario para la construcción de un banco de pruebas para simulaciones en tiempo real, en muchos casos resulta ser muy costoso. Para algunas universidades incluso podría estar fuera del alcance de su presupuesto y para la industria habría que realizar un estudio de costo beneficio, para evaluar si tiene sentido realizar tanta inversión en equipamiento tan avanzado, sólo para implementar controladores PID y procesos simples como los son el ITD, FOTD, IFOTD, SOTD. Este trabajo busca aportar una solución de bajo costo de hardware que permita hacer diversos ensayos en universidades o ambientes industriales de distintos algoritmos. Respecto al software, los costos varían según los toolboxes a adquirir y los tipos de licencias.

- Otro beneficio que presenta la implementación realizada en este trabajo, es la utilización del método del relé asimétrico para la ejecución de los ensayos a los procesos para a posteriori generar el modelo **FOTD estimado**. Este método resulta ser una mejora del experimento del relé clásico que tanta aceptación tuvo en la industria, dada su simplicidad. Se ha verificado que, al igual que su predecesor, el método del relé asimétrico es simple de utilizar ya que el usuario sólo debe definir previamente las máximas y mínimas excursiones de señal permitidas y el nivel de asimetría que se desea, sin ningún conocimiento previo ni del proceso a controlar ni de la teoría de control automático.
- Los resultados obtenidos en este trabajo, tanto para las simulaciones **offline** como para las simulaciones **RCP**, son muy satisfactorias y cumplen con los objetivos propuestos al inicio. Cabe aclarar que se obtienen estimaciones más precisas con las simulaciones **offline** que las logradas con las simulaciones **RCP**. En las primeras, los parámetros calculados poseen errores relativos porcentuales menores al 5% respecto a los valores teóricos, mientras que en las segundas se han alcanzado errores de hasta un 20% según el modelo ensayado. Sin embargo, en ambos casos las estimaciones de modelos son aceptables y se obtuvo un buen desempeño del control de lazo con los ajustes **PID** que proporciona el algoritmo.



## Recomendaciones Futuras

- Optimizar el algoritmo embebido que modela los seis procesos sometidos a ensayos en este trabajo.
- Mejorar la calidad de las señales analógicas enviadas y recibidas.
- Adaptar este mismo banco de ensayos para la ejecución de simulaciones HIL.
- Extender el método de autoajuste a otros modelos de planta.

### *Links a videos:*

[Estimación de parámetros FOTD y sintonización automática de PID por IMC](#)  
[Control a lazo cerrado del proceso FOTD \(DB\) usando PID-IMC parametrizado](#)





**MUCHAS GRACIAS!**