



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

## CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN

HARDWARE-IN-THE-LOOP PARA EL CONTROL DE LOS PROCESOS PRESIÓN, CAUDAL Y NIVEL, MEDIANTE EL SISTEMA EMBEBIDO MYRIO A REALIZARSE EN EL LABORATORIO DE REDES INDUSTRIALES Y CONTROL DE PROCESOS

**Autores:**

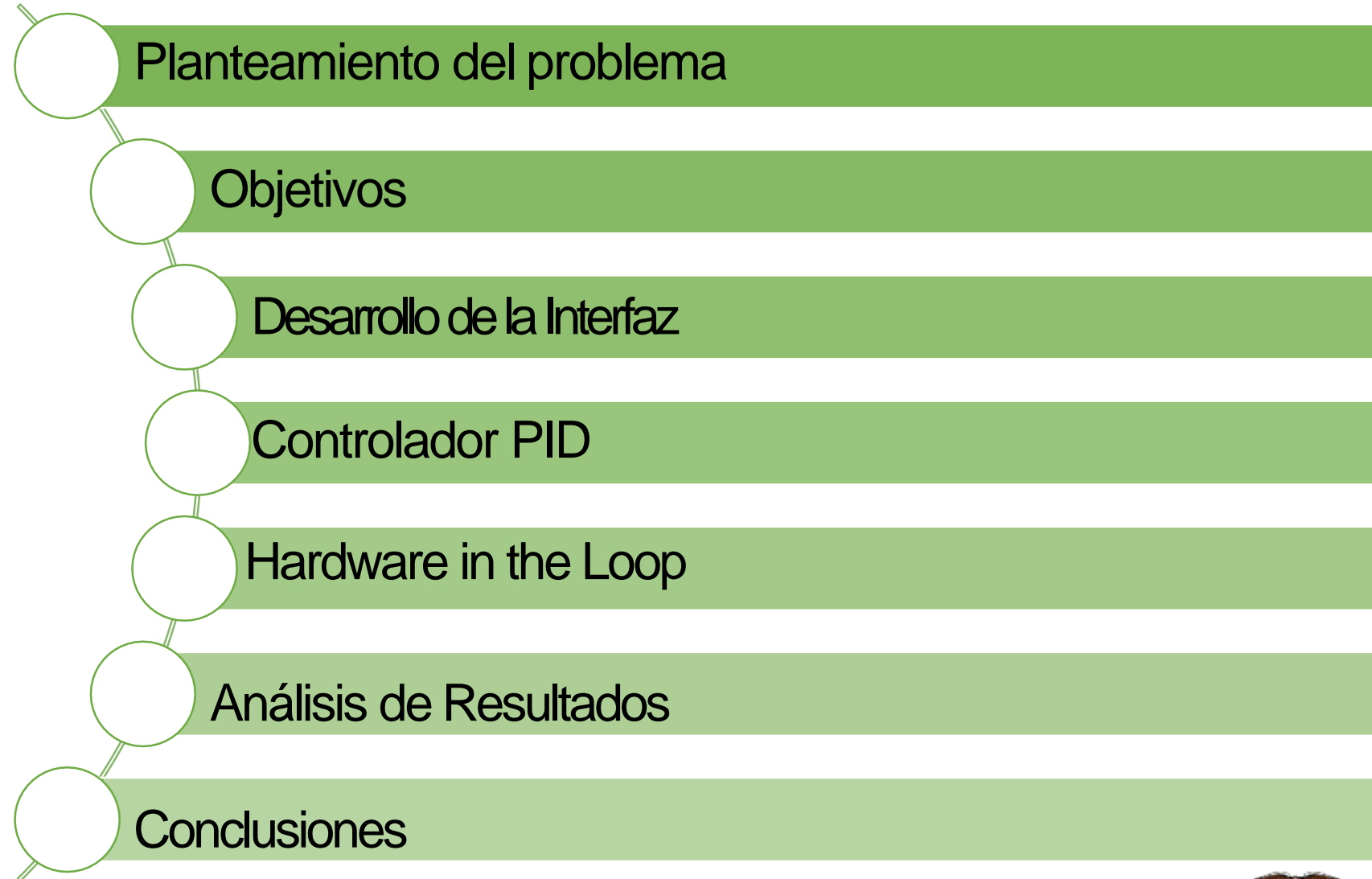
Juan Carlos Alulema Garzón  
Nicolás Sebastián Mora Núñez

**Director:**

ING. Edwin Pruna



# AGENDA



# PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

- La capacitación en Control de Procesos se ve afectada cuando los operadores no pueden someter al sistema a situaciones extremas sin correr riesgos.
- El enfoque de la seguridad industrial demanda que los profesionales cuenten con la mayor cantidad de conocimientos posibles para que se desenvuelvan en el ámbito laboral asegurando al personal, medio ambiente y equipos.
- El costo de desarrollo de los Sistemas de Procesos para capacitaciones llegan a ser elevados por los componentes utilizados.
- Los Sistemas de Procesos no prestan una completa disponibilidad por el mantenimiento que se realiza a los equipos a utilizarse.



# OBJETIVO GENERAL

**DESARROLLAR HIL (HARDWARE-IN-THE-LOOP) PARA EL CONTROL DE LOS PROCESOS DE PRESIÓN, CAUDAL Y NIVEL, MEDIANTE EL SISTEMA EMBEBIDO MYRIO A REALIZARSE EN EL LABORATORIO DE REDES INDUSTRIALES Y CONTROL DE PROCESOS**

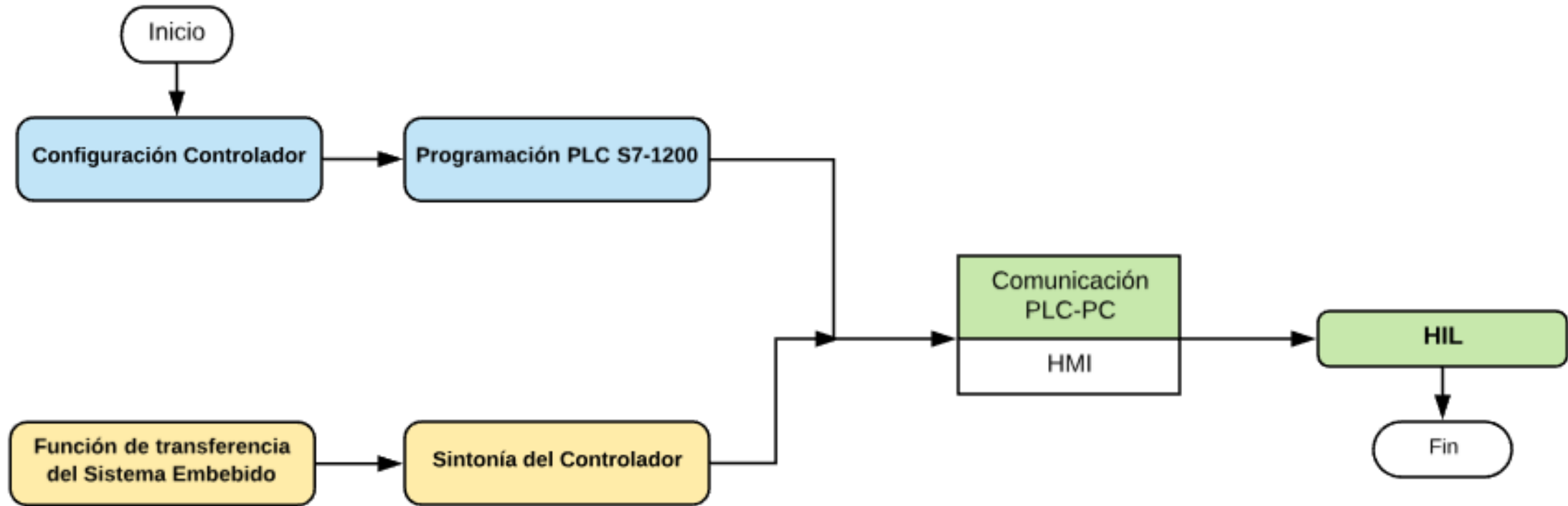


# OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar los diferentes métodos para obtener los modelos matemáticos que describen el comportamiento dinámico de los procesos.
- Obtener los modelos matemáticos que describen el comportamiento dinámico de los procesos presión, caudal y nivel.
- Programar la tarjeta NI myRIO para la creación de los procesos simulados presión, caudal y nivel.
- Desarrollar el entorno de simulación de los procesos presión, caudal y nivel para el control con el PLC en tiempo real.
- Verificar el correcto funcionamiento del sistema HIL mediante técnicas de control convencional.



# CONTROLADOR PID

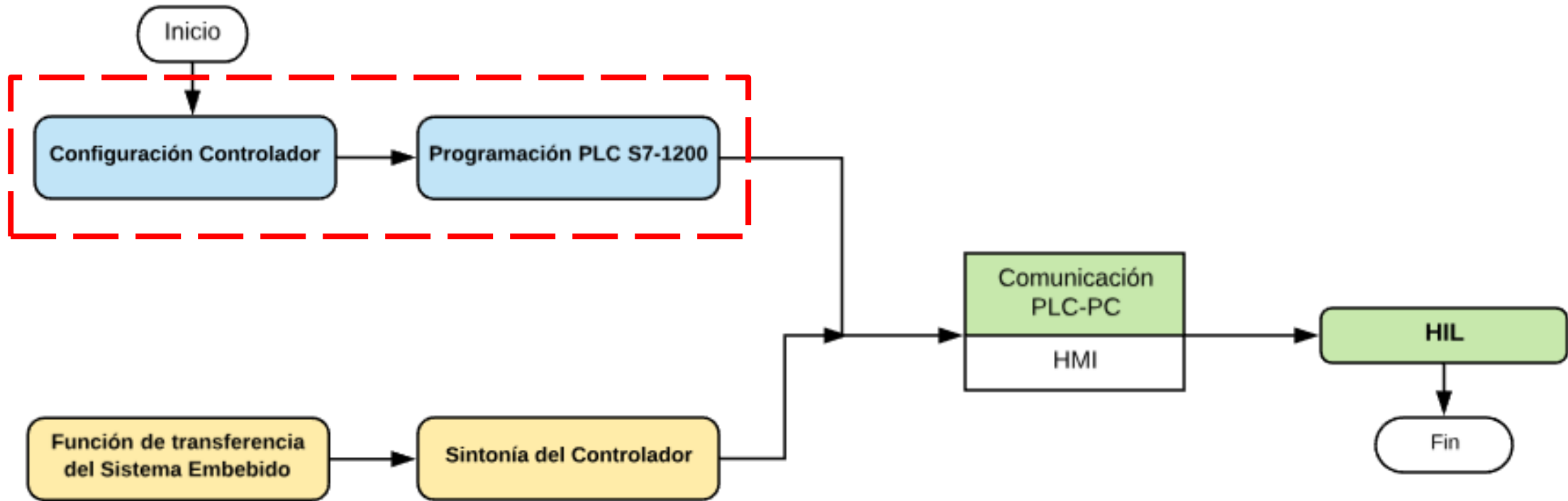


# CONTROLADOR PID

- Mecanismo de control por realimentación
- Es un controlador tradicional de tipo Lineal
- Combina las características del controlador PD y el controlador PI
- No tiene la necesidad de conocer el comportamiento del proceso
- Más del 95% de los lazos de control en las industrias utilizan el PID
- Utiliza la realimentación para rechazar las perturbaciones
- Elimina el error estacionario con la acción integral
- Puede anticipar el futuro con la acción derivativa



# CONTROLADOR PID





# CONTROLADOR PID

- HARDWARE

Componentes utilizados en el controlador de los Sistemas de Procesos

SIMATIC S7-1200



SM 1234 AI/AQ

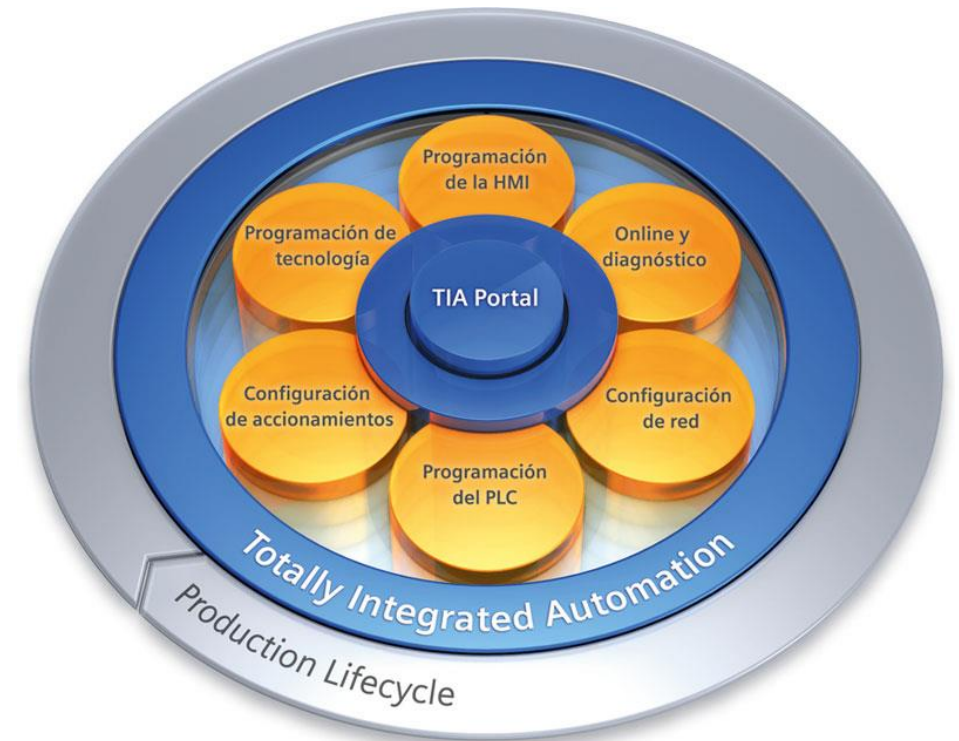
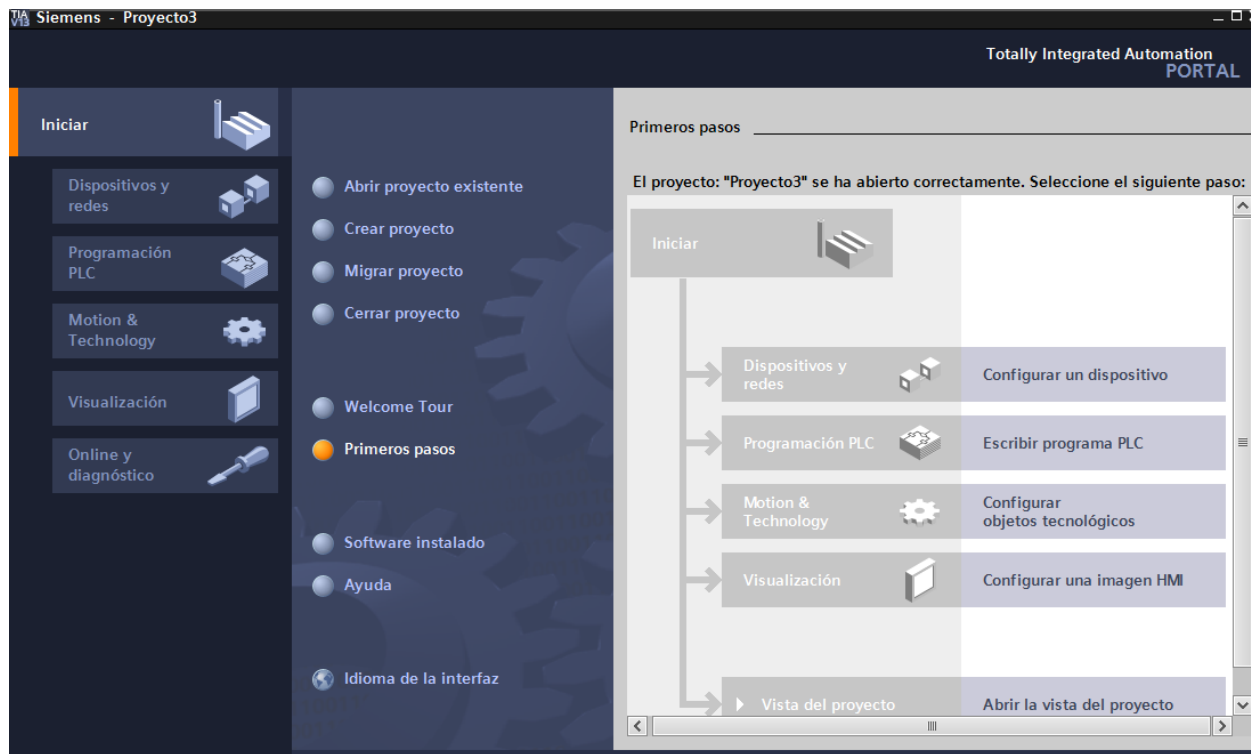


# CONTROLADOR PID

- SOFTWARE

- TIA PORTAL

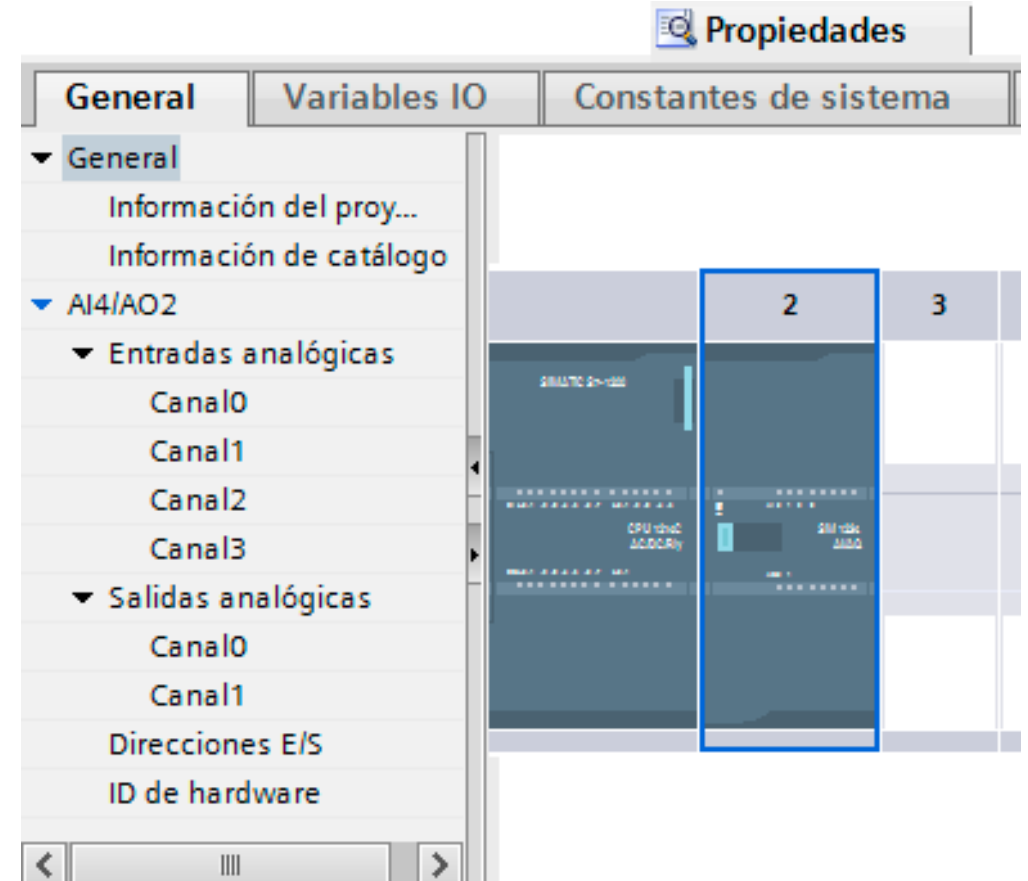
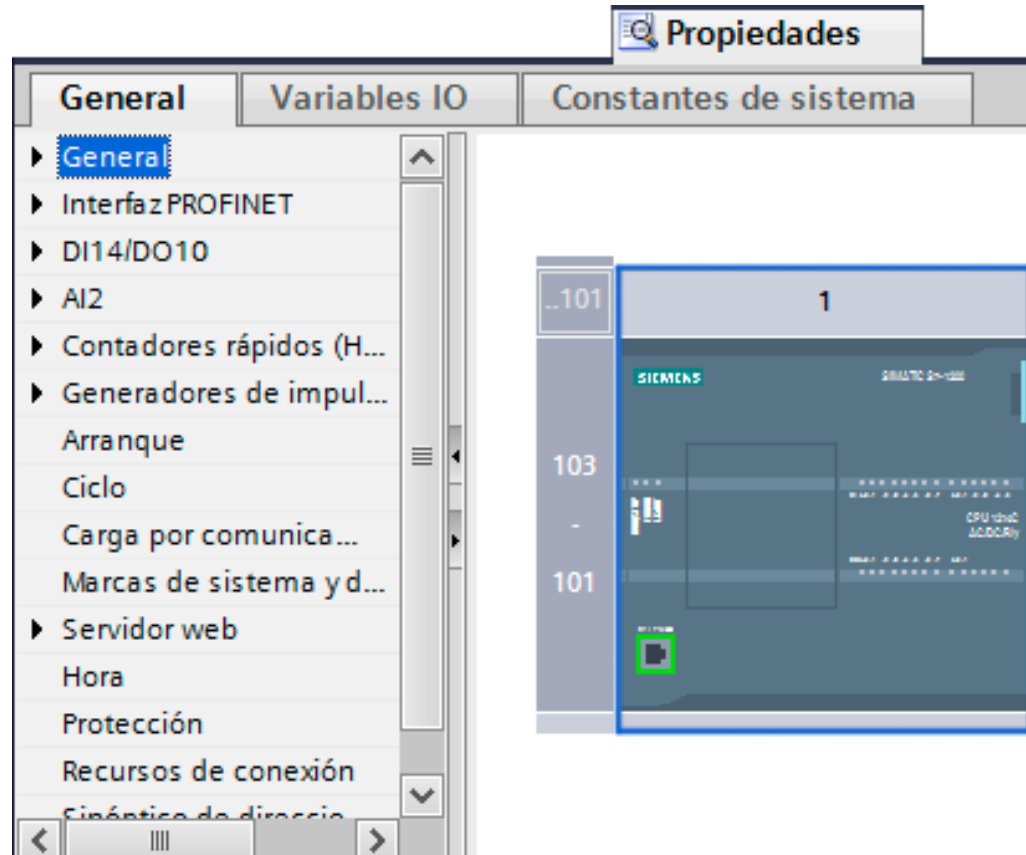
Es un software que permite configurar de forma intuitiva y eficiente todos los procesos de planificación y producción, además de ofrecer un entorno de ingeniería unificado para todas las tareas de control, visualización y accionamiento.



# CONTROLADOR PID

- SOFTWARE

Configuración de la CPU y módulo de entradas y salidas



# CONTROLADOR PID

▼ General

- Información del proy...
- Información de catálogo

▼ AI4/AO2

- ▼ Entradas analógicas
  - Canal0**
  - Canal1
  - Canal2
  - Canal3

> Canal0

Dirección de canal: IW96

Tipo de medición: Tensión

Rango de tensión: +/- 10 V

Filtrado: Débil (4 ciclos)

Canal0

Canal1

Canal2

Canal3

▼ Salidas analógicas

- Canal0**
- Canal1

Direcciones E/S

ID de hardware

> Canal0

Dirección de canal: QW96

Tipo de salida analógica: Tensión

Rango de tensión: +/- 10 V

Valor sustitutivo para canal en caso de transición de RUN a S... 0.000 V



# CONTROLADOR PID

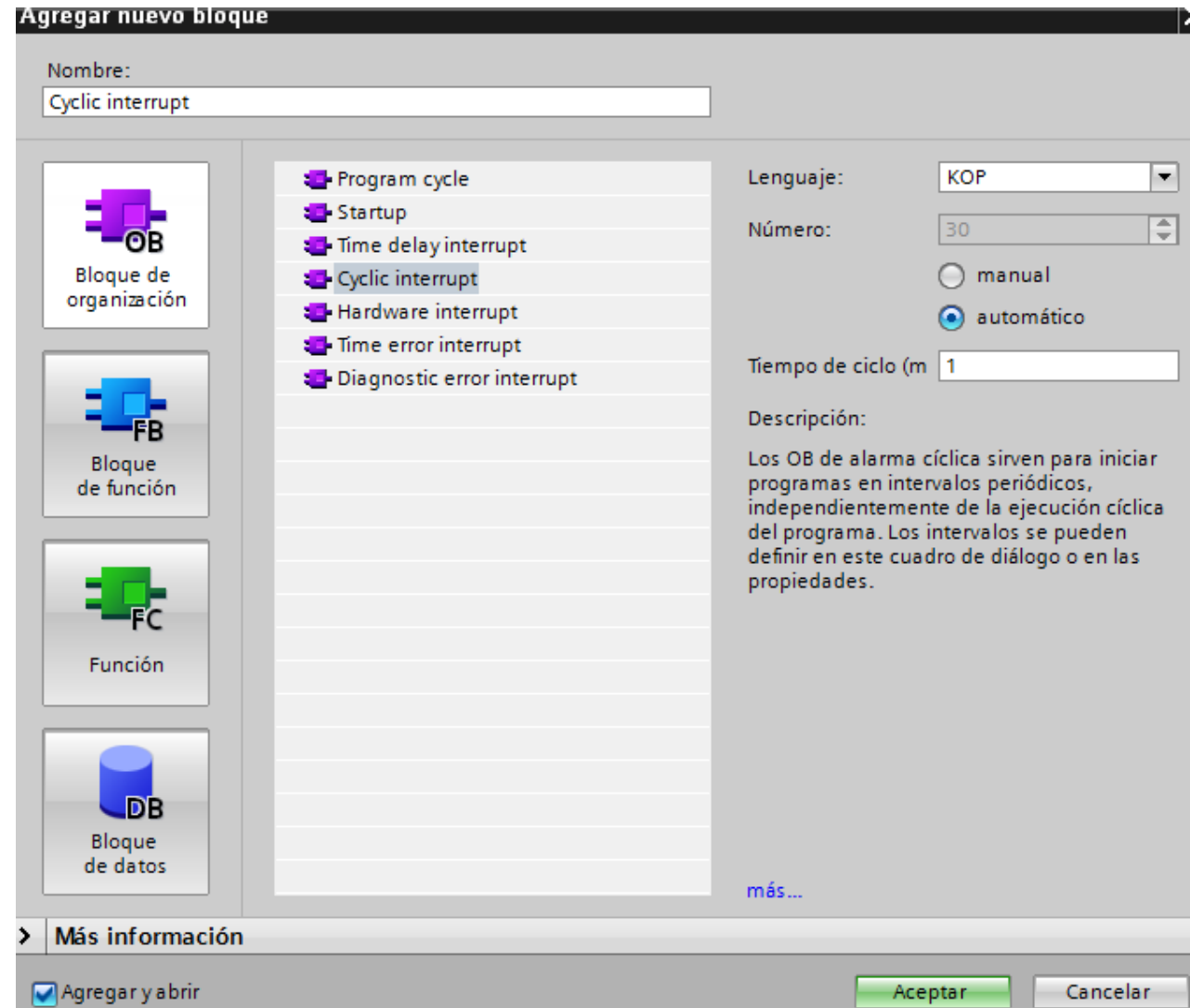
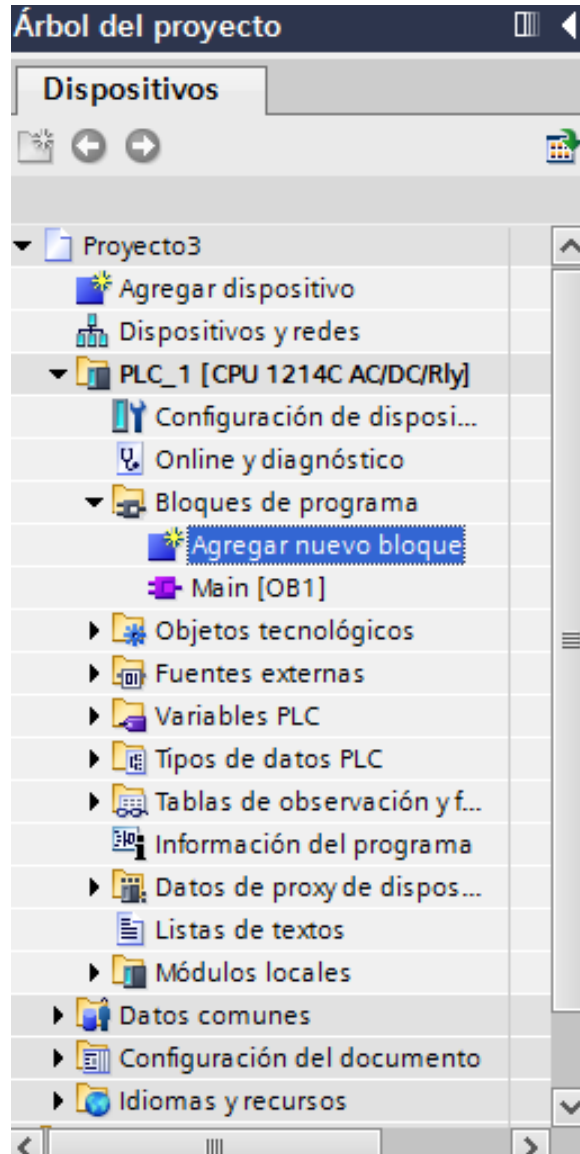
- PROGRAMACIÓN PID

El programa de control PID debe realizar las siguientes operaciones:

- Leer de la entrada analógica el valor de la señal que se desea controlar (en este caso, la velocidad de giro del eje del motor).
- Comparar esta medida con la referencia (velocidad deseada) y obtener el error como resta de los dos valores.
- Aplicar el algoritmo de control PID al error, calculando los efectos proporcional, diferencial (derivada del error) e integral (integral del error).
- Escribir en la salida analógica el resultado calculado.

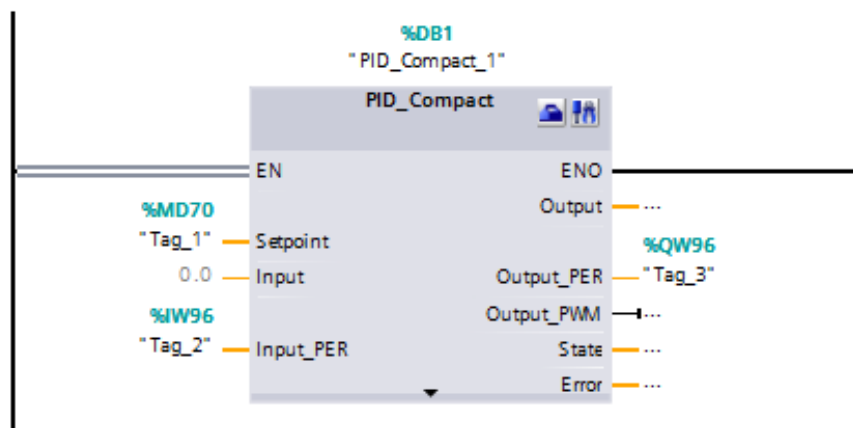
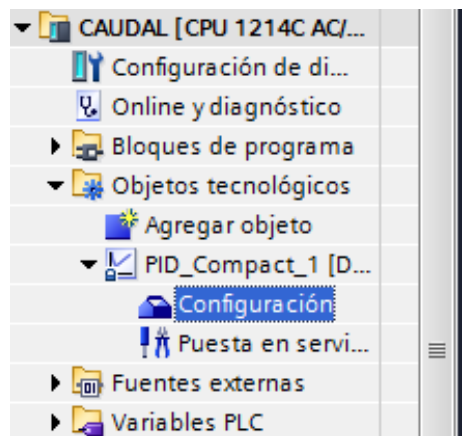


# CONTROLADOR PID



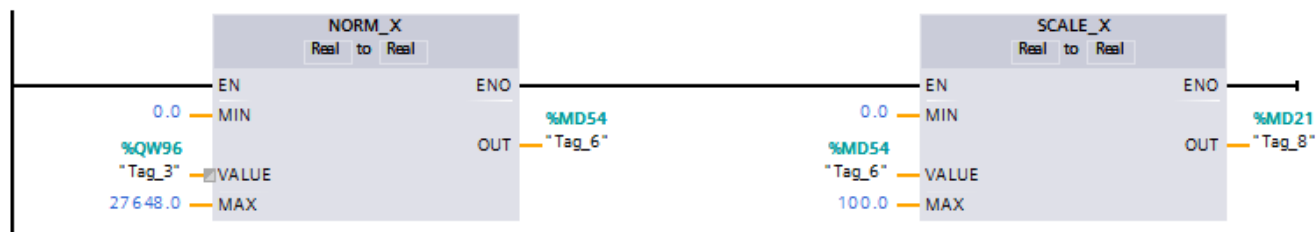


# CONTROLADOR PID



Segmento 3: .....

Comentario



# CONTROLADOR PID

Vista funcional | Vista de parámetros

**Ajustes básicos**

- Tipo de regulación
- Parámetros de entrada...
- Ajustes del valor real
  - Límites del valor real
  - Escala del valor real
- Ajustes avanzados
  - Monitorización del valo...
  - Limitaciones PWM
  - Límites del valor de sa...
  - Parámetros PID

**Ajustes básicos**

Tipo de regulación \_\_\_\_\_

General %

Inversión sentido de regulación

Activar último modo de operación tras rearranque de la CPU.

Parámetros de entrada/salida \_\_\_\_\_

Setpoint: [ ]

Input: Input\_PER (analógica) [ ]

Output: Output\_PER (analógica) [ ]

Medición | Modo de ajuste

Tiempo de muestreo: 0.3 s [ Start ]

Optimización inicial [ Start ]

PID\_Compact\_1 (Esperando a los datos)

Setpoint: 100,0

ScaledInput: 0,0

Output: 0,0

Estado de la optimización

Progreso: [ ]

Error: [ ]

Parámetros PID

Cargar parámetros PID

Ir a parámetros PID

Estado online del regulador

Setpoint: ???

Input: ???

Output: ??? %

Modo manual

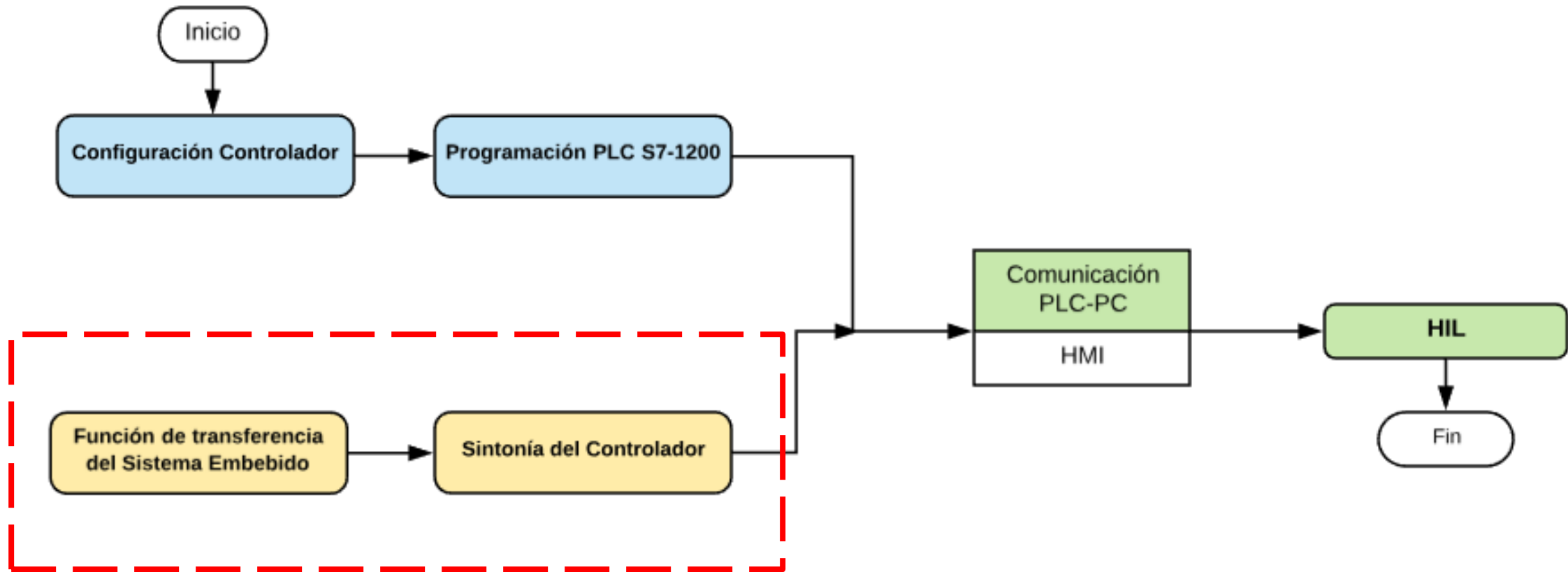
Estado del regulador: [ ]

[ Start PID\_Compact ]





# CONTROLADOR PID



# SINTONÍA PID

- SISTEMA DE CONTROL DE CAUDAL

Es de tipo autorregulado y su función de transferencia es:

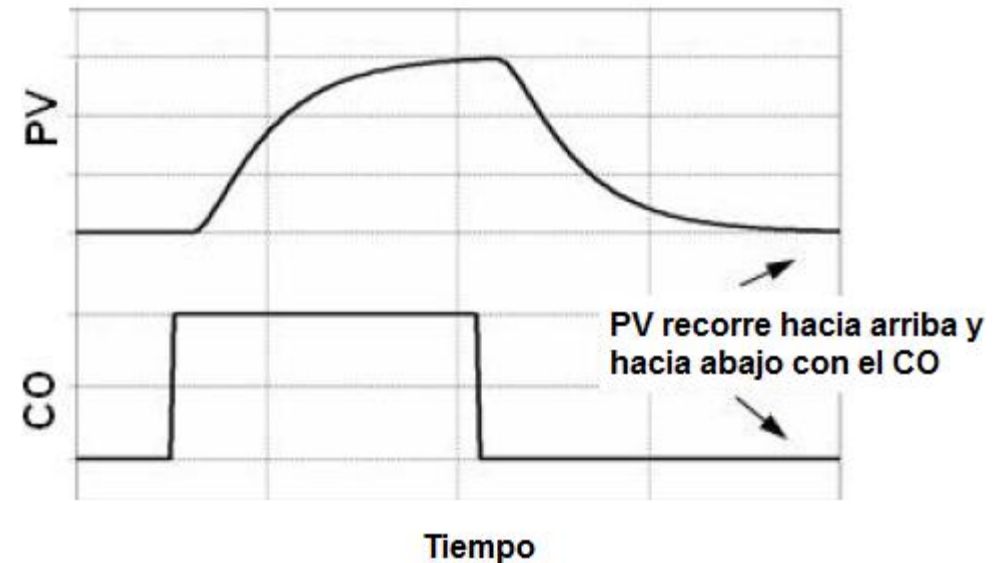
$$G(s) = \frac{1.9211}{1.2202s+1} e^{-1.4102}$$

Donde:

$K_s = 1.9211$  y es la ganancia propia del sistema

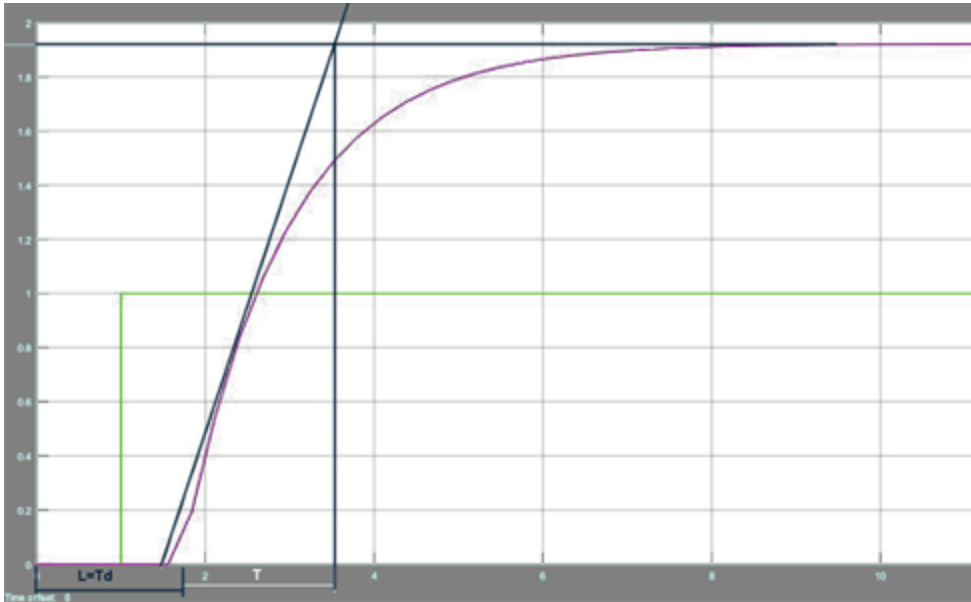
$T = 1.2202$  es la constante de tiempo

$L = 1.4102$  es el tiempo muerto



# SINTONÍA PID

- MÉTODO DE ZIEGLER-NICHOLS EN LAZO ABIERTO



Donde:

$$T = 1.94$$

$$L = 1.8$$

Tipo de Controlador	Kp	Ki	Kd
P	$\frac{T}{L}$	0	0
PI	$0.9 * \frac{T}{L}$	$\frac{0.3}{L}$	0
PID	$1.2 * \frac{T}{L}$	$\frac{1}{2L}$	$0.5 L$

Tabla para el Cálculo de Parámetros del PID mediante Ziegler-Nichols en lazo abierto

*Relaciones entre Ganancias y tiempos*

$$Ti = \frac{Kp}{Ki}$$

$$Td = \frac{Kp}{Kd}$$

$$Kp = 0.82597$$

$$Ti = 4.1346$$

$$Td = 0$$



# SINTONÍA PID

- MÉTODO LAMBDA

$$K_s = 1.9211$$

$$T = 1.94$$

$$L = 1.8$$

Tipo de Controlador	Kp	Ti	Td
PID	$\frac{1}{k} \left( \frac{L/2 + T}{L/2 + 3T} \right)$	$T + \frac{L}{2}$	$\frac{T * L}{L + 2T}$

Tabla para el Cálculo de Parámetros del PID mediante el método Lambda

$$Kp = 0.2199$$

$$Ti = 2.84$$

$$Td = 0.6147$$

- MÉTODO DE COHEN-COON

$$a = \frac{KL}{T} \quad a = 1.7824$$

$$\tau = \frac{L}{L+T} \quad \tau = 0.4812$$

Tipo de Controlador	aKp	Ki	Kd
P	$1 + \frac{0.35 \tau}{1 - \tau}$	$\infty$	0
PI	$0.9 * \left( 1 + \frac{0.092\tau}{1 - \tau} \right)$	$\frac{3.3 - 3\tau}{1 + 1.2\tau}$	0
PID	$1.35 * \left( 1 + \frac{0.18\tau}{1 - \tau} \right)$	$\frac{2.5 - 2\tau}{1 - 0.39\tau}$	$\frac{0.37 - 0.37\tau}{1 - 0.81\tau}$

Tabla para el Cálculo de Parámetros del PID mediante el método de Cohen-Coon

$$Kp = 0.5479$$

$$Ti = 1.1768$$

$$Td = 0$$



# SINTONÍA PID

- SISTEMA DE CONTROL DE NIVEL

Es de tipo integrante y su función de transferencia es:

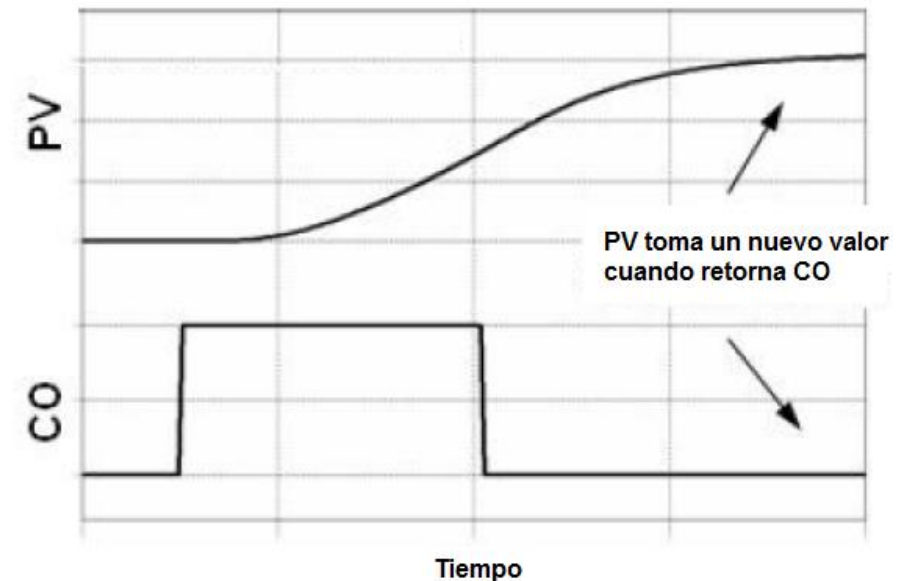
$$G(s) = \frac{0.07}{s} e^{-3.6}$$

Donde:

$K_s = 0.07$  y es la ganancia propia del sistema

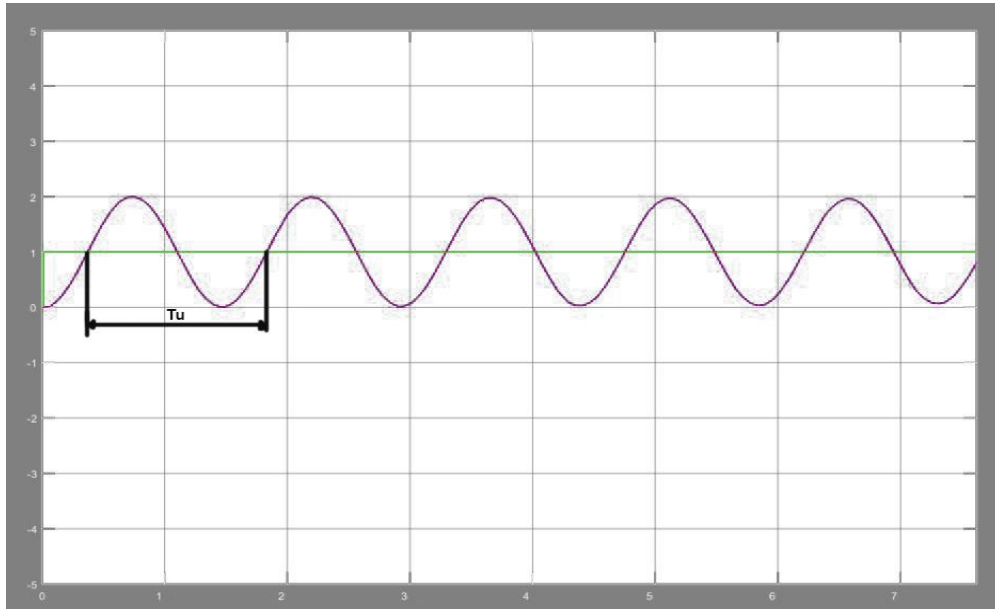
$T = 1$  es la constante de tiempo

$L = 3.6$  es el tiempo muerto



# SINTONÍA PID

- MÉTODO DE ZIEGLER-NICHOLS EN LAZO CERRADO



Donde:

$$K_u = 0.0158$$

$$T = 1.45$$

Tipo de Controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0.50 \cdot K_c$	0	0
PI	$0.45 \cdot K_c$	$\frac{1.2}{T_u}$	0
PID	$0.6 \cdot K_c$	$\frac{2}{T_u}$	$0.125 \cdot T_u$

Tabla para el Cálculo de Parámetros del PID mediante Ziegler-Nichols en lazo cerrado

$$K_p = 7.0519$$

$$T_d = 3.554 T_i = 9.4$$



# SINTONÍA PID

- MÉTODO CHIEN, HRONES Y RESWICK

Tipo de Controlador	Sin Sobreoscilación			20% Sobreoscilación		
	Kp	Ki	Kd	Kp	Ki	Kd
P	$\frac{0.3}{T * L}$	$\infty$	0	$\frac{0.7}{T * L}$	$\infty$	0
PI	$\frac{0.6}{T * L}$	$4 * L$	0	$\frac{0.7}{T * L}$	$2.3 * L$	0
PID	$\frac{0.95}{T * L}$	$2.4 * L$	$0.42 * L$	$\frac{1.2}{T * L}$	$2 * L$	$0.42 * L$

Tabla para el Cálculo de Parámetros del PID mediante el método Chien, Hrones y Reswick

$$Kp = 0.2638$$

$$Ti = 8.64$$

$$Td = 1.512$$

- MÉTODO DE COHEN-COON

$$Ks = 0.07$$

$$T = 1$$

$$L = 3.6$$

$$a = \frac{KL}{T} \quad a = 0.20958$$

$$\tau = \frac{L}{L+T} \quad \tau = 0.80769$$

Tipo de Controlador	aKp	Ki	Kd
P	$1 + \frac{0.35 \tau}{1 - \tau}$	$\infty$	0
PI	$0.9 * \left(1 + \frac{0.092\tau}{1 - \tau}\right)$	$\frac{3.3 - 3\tau}{1 + 1.2\tau}$	0
PID	$1.35 * \left(1 + \frac{0.18\tau}{1 - \tau}\right)$	$\frac{2.5 - 2\tau}{1 - 0.39\tau}$	$\frac{0.37 - 0.37\tau}{1 - 0.81\tau}$

Tabla para el Cálculo de Parámetros del PID mediante el método de Cohen-Coon

$$Td = 0$$

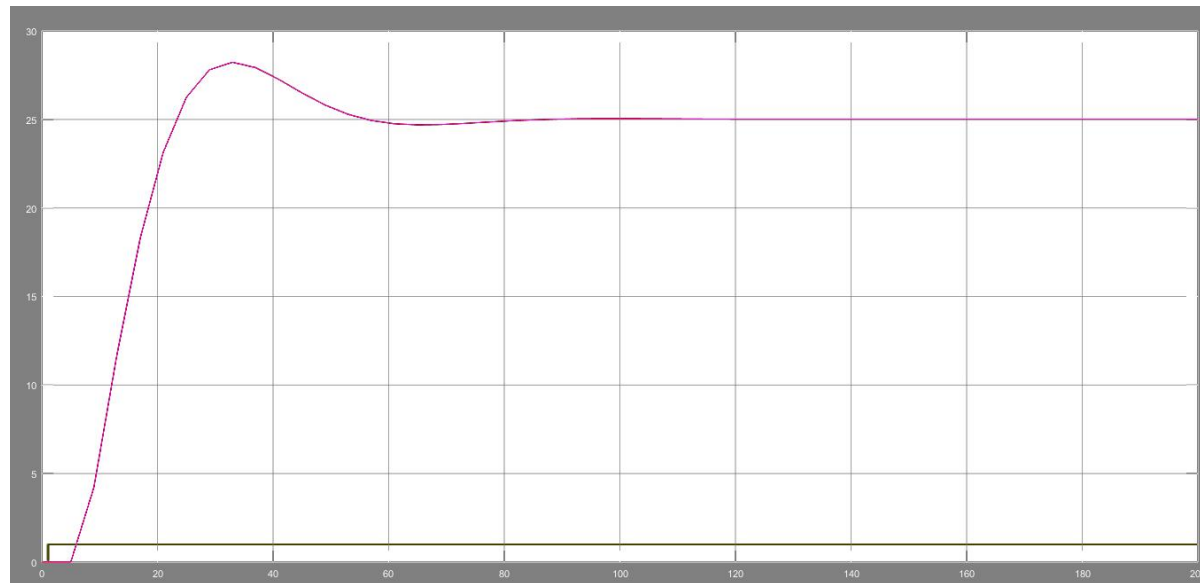


# SINTONÍA PID

- SISTEMA DE CONTROL DE PRESIÓN

Es de tipo autorregulado de segundo orden y su función de transferencia es:

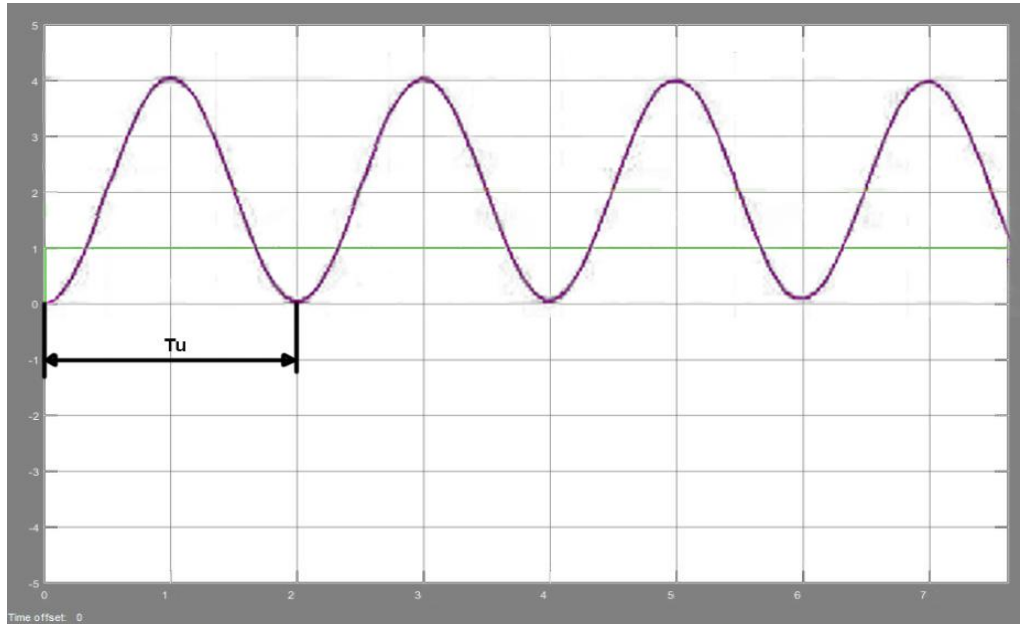
$$G(s) = \frac{25.102}{(70.8452s^2 + 8.96069s + 1)} e^{-1.02}$$





# SINTONÍA PID

- MÉTODO DE ZIEGLER-NICHOLS EN LAZO CERRADO



Donde:

$$K_u = 120$$

$$T_u = 2.094$$

Tipo de Controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0.50 \cdot K_c$	0	0
PI	$0.45 \cdot K_c$	$\frac{1.2}{T_u}$	0
PID	$0.6 \cdot K_c$	$\frac{2}{T_u}$	$0.125 \cdot T_u$

Tabla para el Cálculo de Parámetros del PID mediante Ziegler-Nichols en lazo cerrado

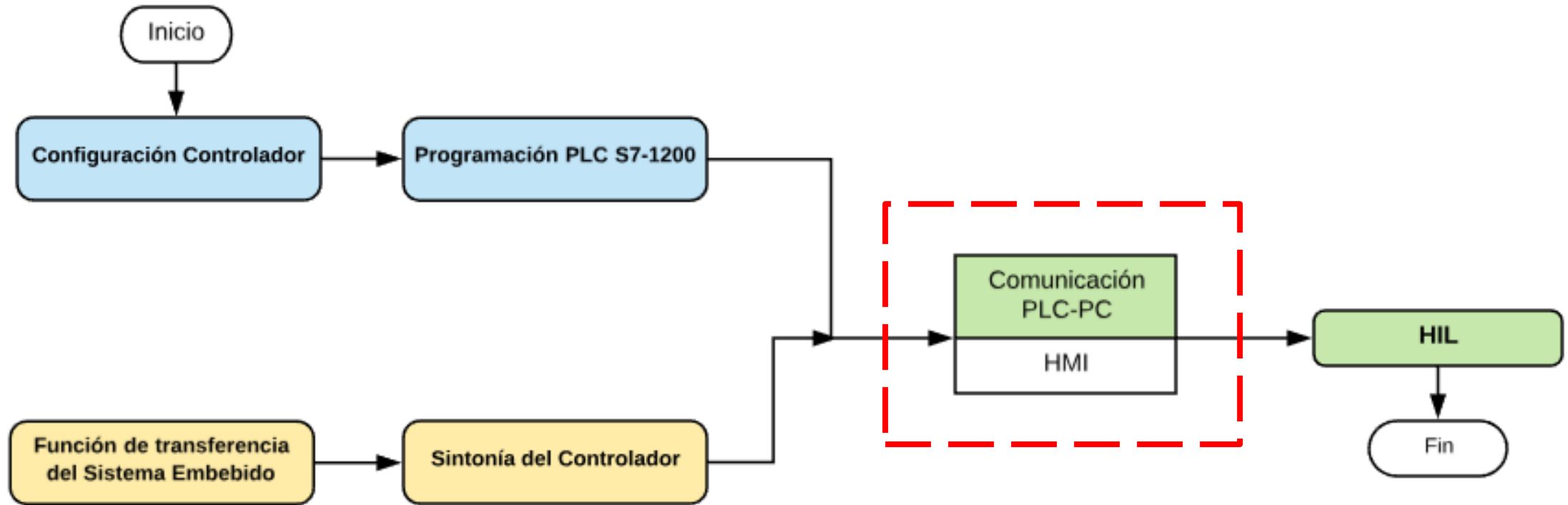
$$K_p = 0.45$$

$$T_i = 11.014$$

$$T_d = 0$$



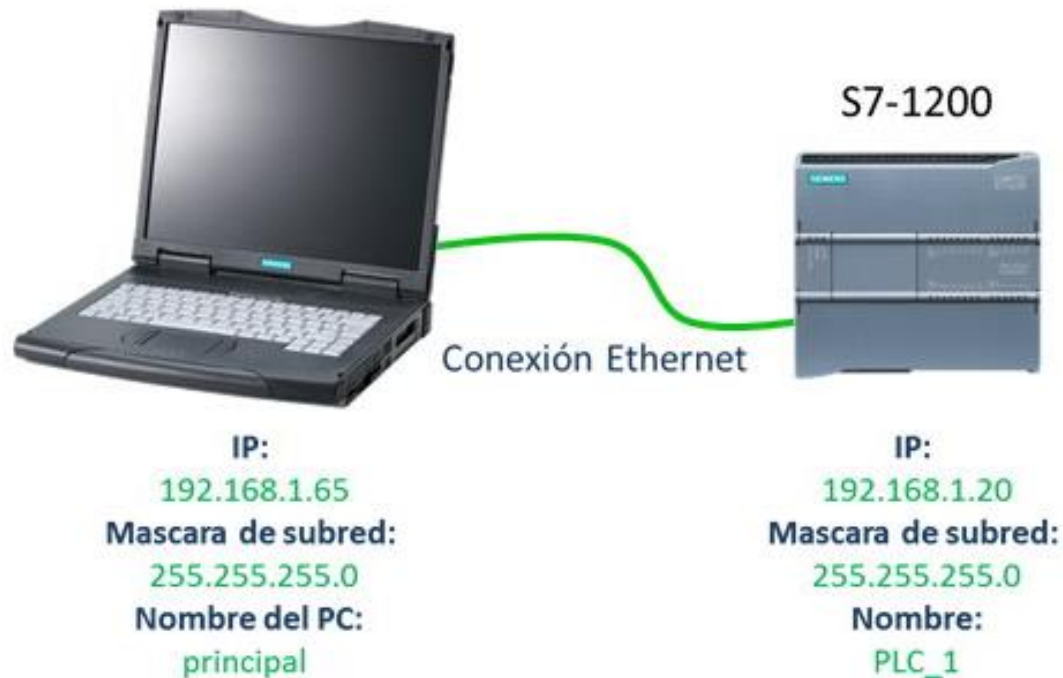
# CONTROLADOR PID



# COMUNICACIÓN PLC-PC

- PROTOCOLO ETHERNET

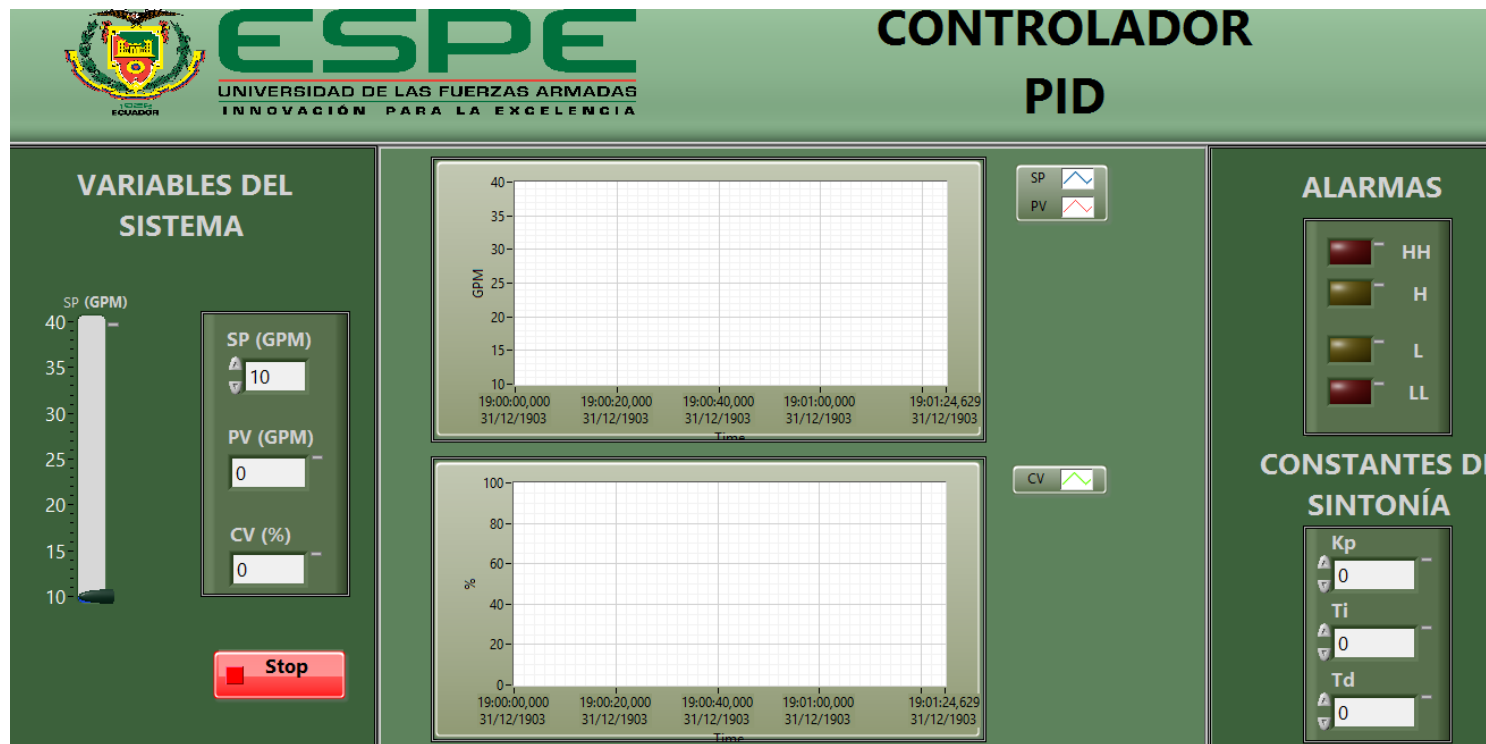
Ethernet es un estándar de redes de computadores de área local con una velocidad de transmisión de 10Mbps. La interpretación de los datos manejados dentro del protocolo Ethernet se debe llevar a un lenguaje entendible por las personas.



# COMUNICACIÓN PLC-PC

- INTERFAZ HUMANO MÁQUINA

Proporciona la información y el control necesarios para que el operador, en ciertas circunstancias, vaya más allá del manejo de la máquina y observe el estado del equipo interviniendo en el proceso.



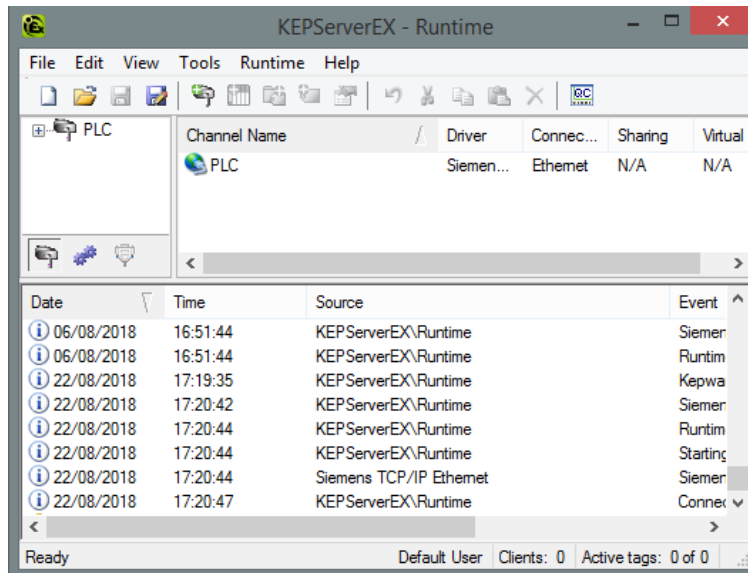
Los Tags son elementos de enlace entre la base de datos de TIA Portal y los objetos del HMI.



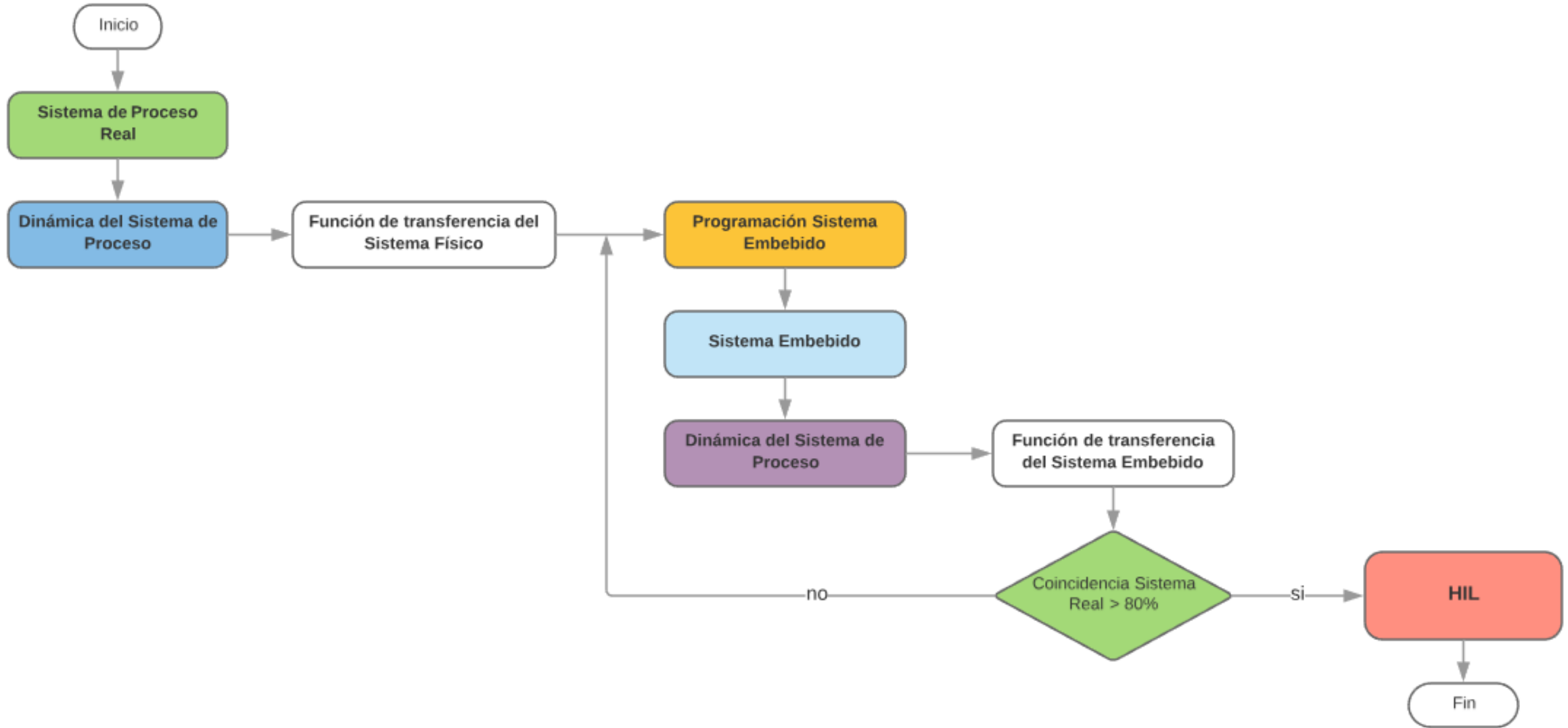
# COMUNICACIÓN PLC-PC

- OPC

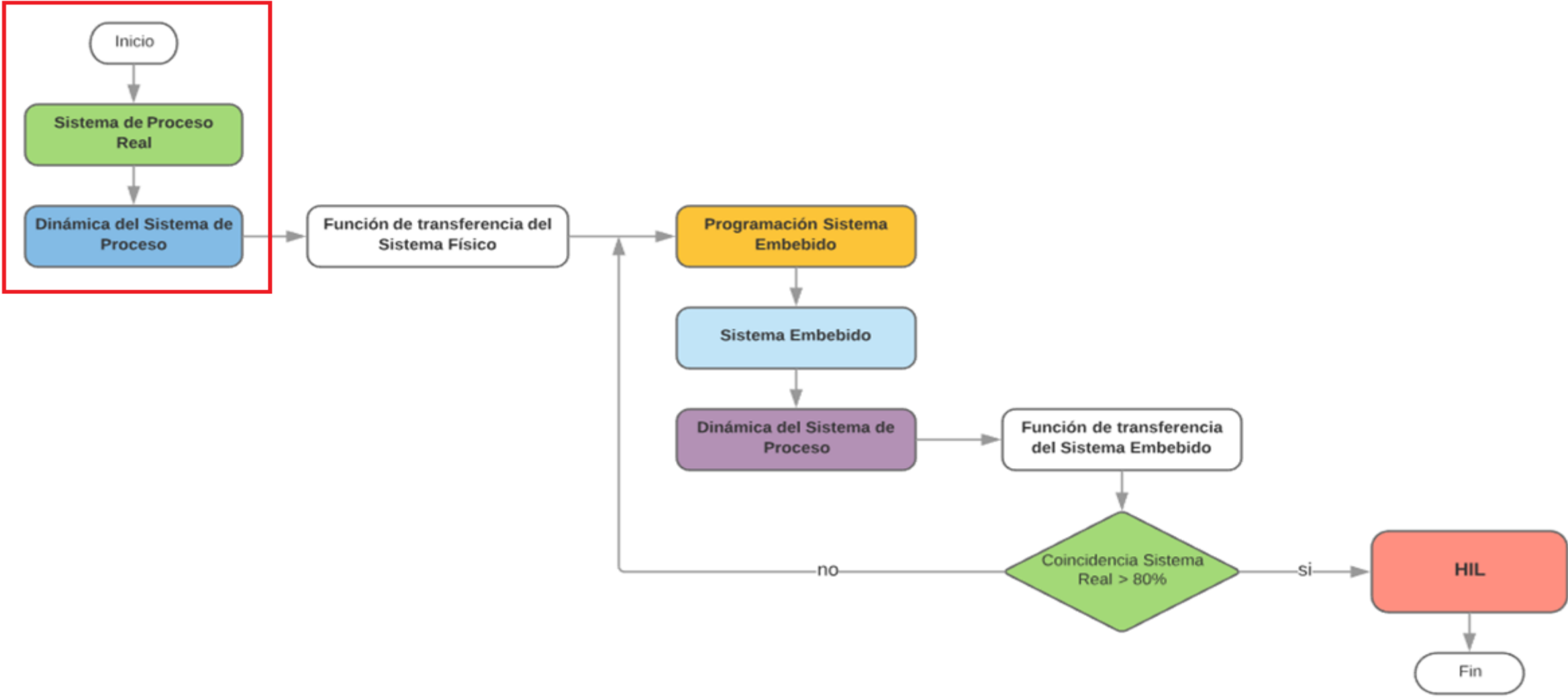
OPC es un "protocolo" de comunicaciones abierto que permite la comunicación entre aplicaciones informáticas y que permite la interoperabilidad entre diferentes fabricantes de software y hardware.



# DINÁMICA DE LAS ESTACIONES DE CONTROL

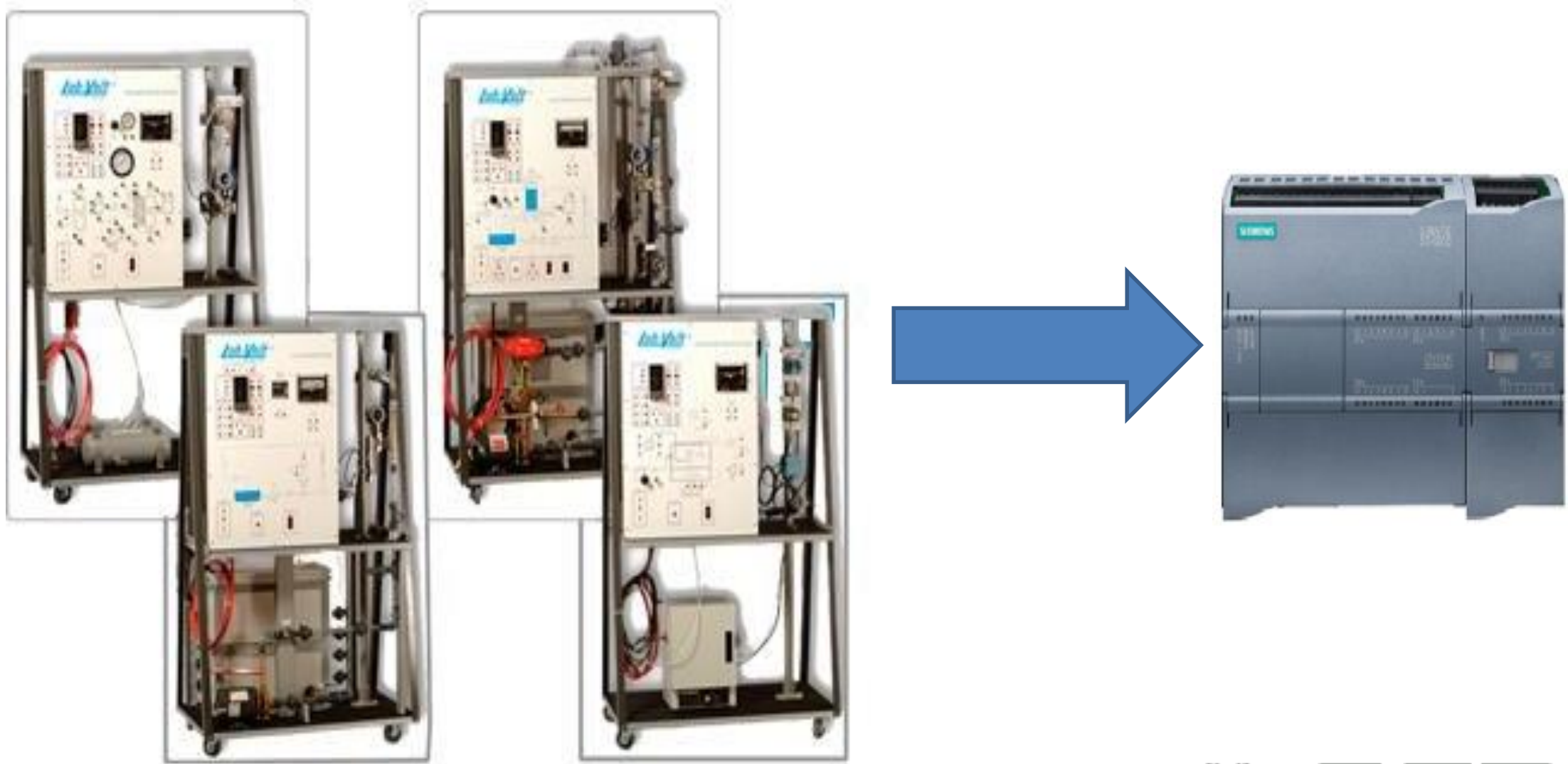


# DINÁMICA DE LAS ESTACIONES DE CONTROL



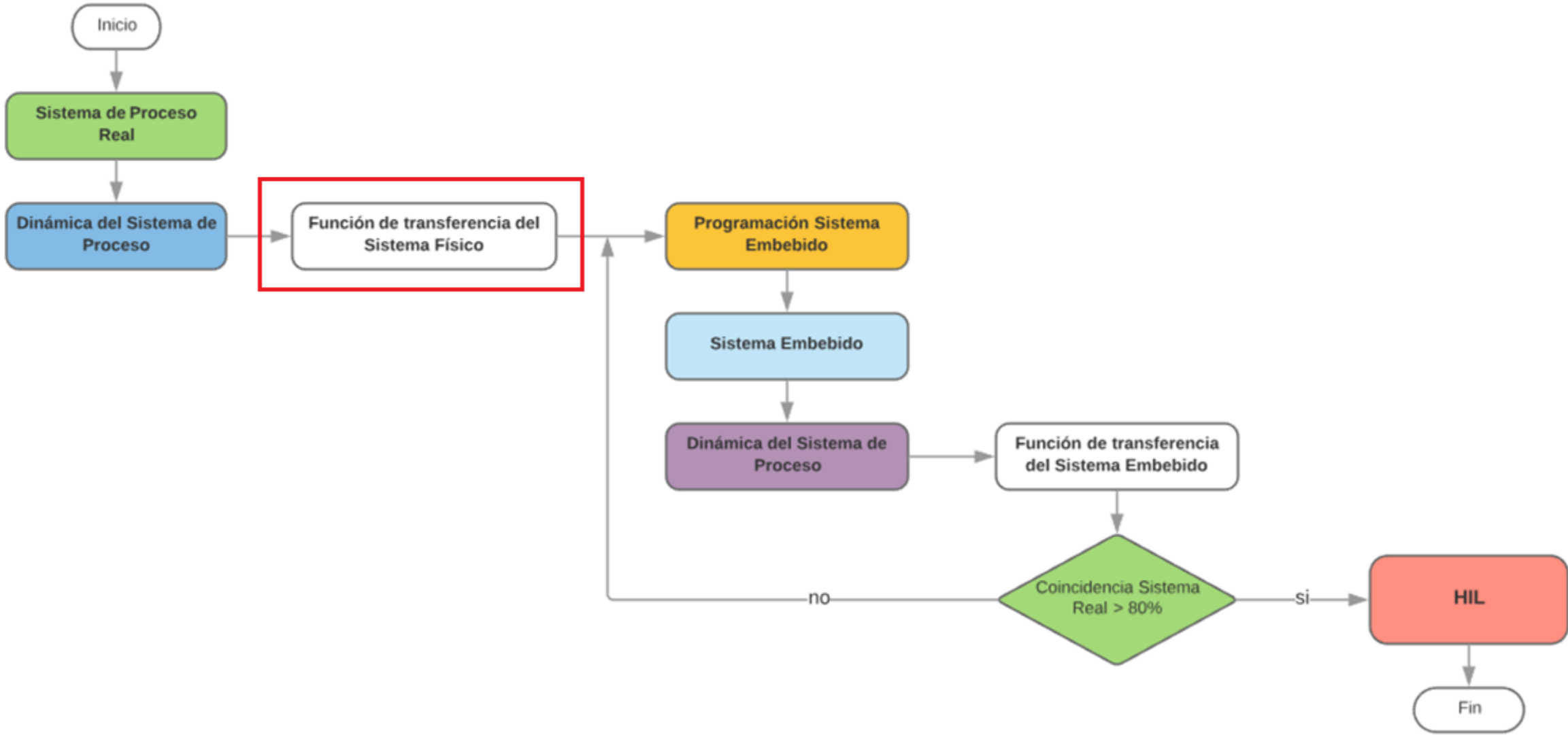


# DINÁMICA DE LAS ESTACIONES DE CONTROL





# DINÁMICA DE LAS ESTACIONES DE CONTROL



# DINÁMICA DE LAS ESTACIONES DE CONTROL

Process Models

Transfer Function

$$\frac{K \exp(-T_d s)}{(1 + T_p1 s)}$$

Poles

1 All real

Zero  
 Delay  
 Integrator

Par	Known	Value	Initial Guess	Bounds
K	<input type="checkbox"/>	1.9218	Auto	[-Inf Inf]
Tp1	<input type="checkbox"/>	0.00091611	0.00091611	[0 10000]
Tp2	<input type="checkbox"/>	0	0	[0 Inf]
Tp3	<input type="checkbox"/>	0	0	[0 Inf]
Tz	<input type="checkbox"/>	0	0	[-Inf Inf]
Td	<input type="checkbox"/>	0.00872	Auto	[0 0.03]

Initial Guess

Auto-selected  
 From existing model:   
 User-defined

Value-->Initial Guess

Disturbance Model: Order 1 Initial condition: Zero Regularization...

Focus: Simulation Covariance: Estimate Options...

Display progress Stop Iterations

Name: PID Estimate Close Help

System Identification - Untitled

File Options Window Help

Import data Import models

Operations

Preprocess

function function

Working Data

Estimate -->

To Workspace To LTI Viewer

Trash

Data Views

Time plot  
 Data spectra  
 Frequency function

Model Views

Model output  
 Model resid  
 Noise spectrum

Transient resp  
 Frequency resp  
 Zeros and poles

Nonlinear ARX  
 Hamm-Wiener

P1D

Validation Data

function



# DINÁMICA DE LAS ESTACIONES DE CONTROL

Data/model Info: P1D

Model name: P1D

Color: [1,0,9,0]

Process model with transfer function:

$$G(s) = \frac{K_p}{1+T_{p1}s} * \exp(-T_d*s)$$

Kp = 1.9218  
Tp1 = 0.00091611  
Td = 0.00872

Diary and Notes

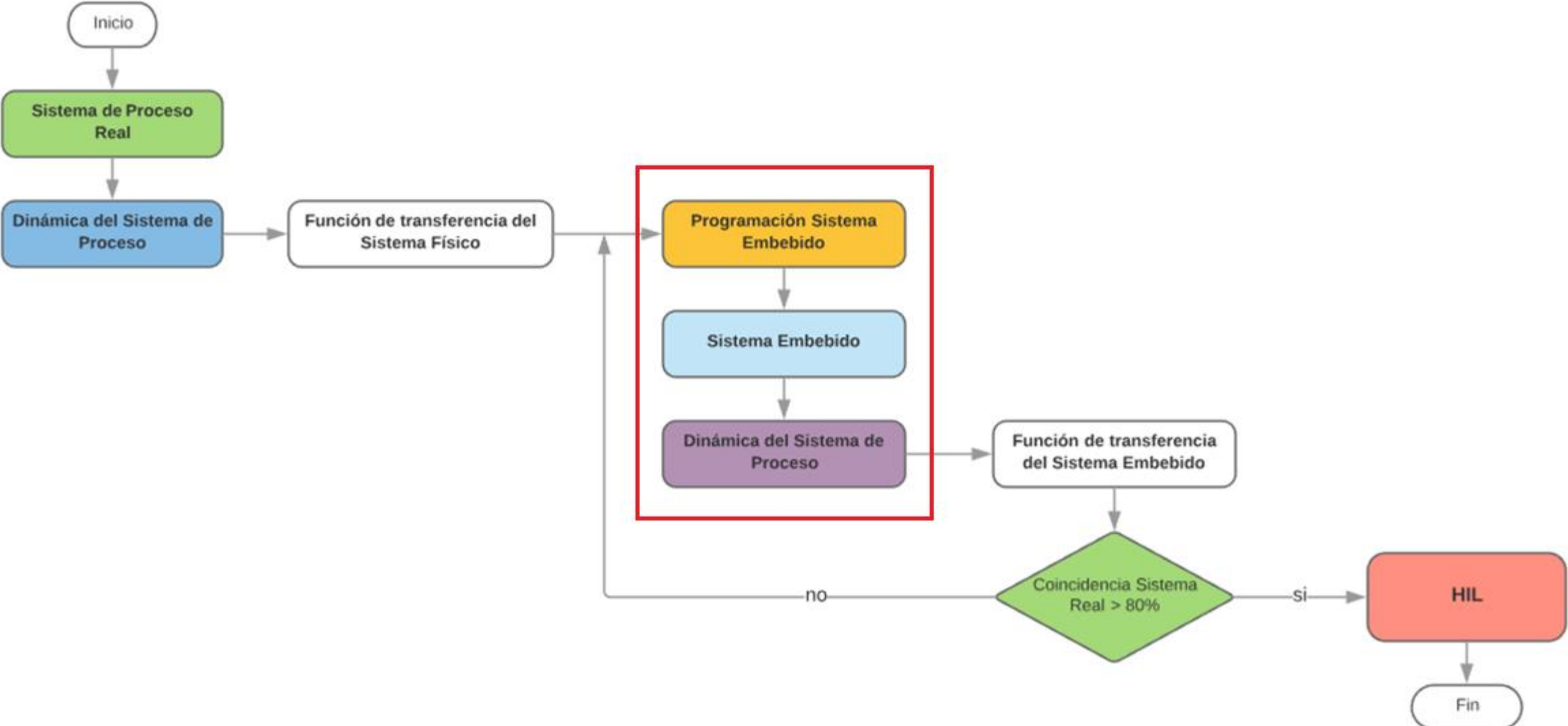
```
% Import funcion  
  
Opt = procestOptions;  
Opt.InitialCondition = 'zero';  
Opt.DisturbanceModel = 'ARMA1';  
Opt.Focus = 'simulation';  
P1D = procest(funcion,'P1D', Opt);
```

Show in LTI Viewer

Present Export Close Help

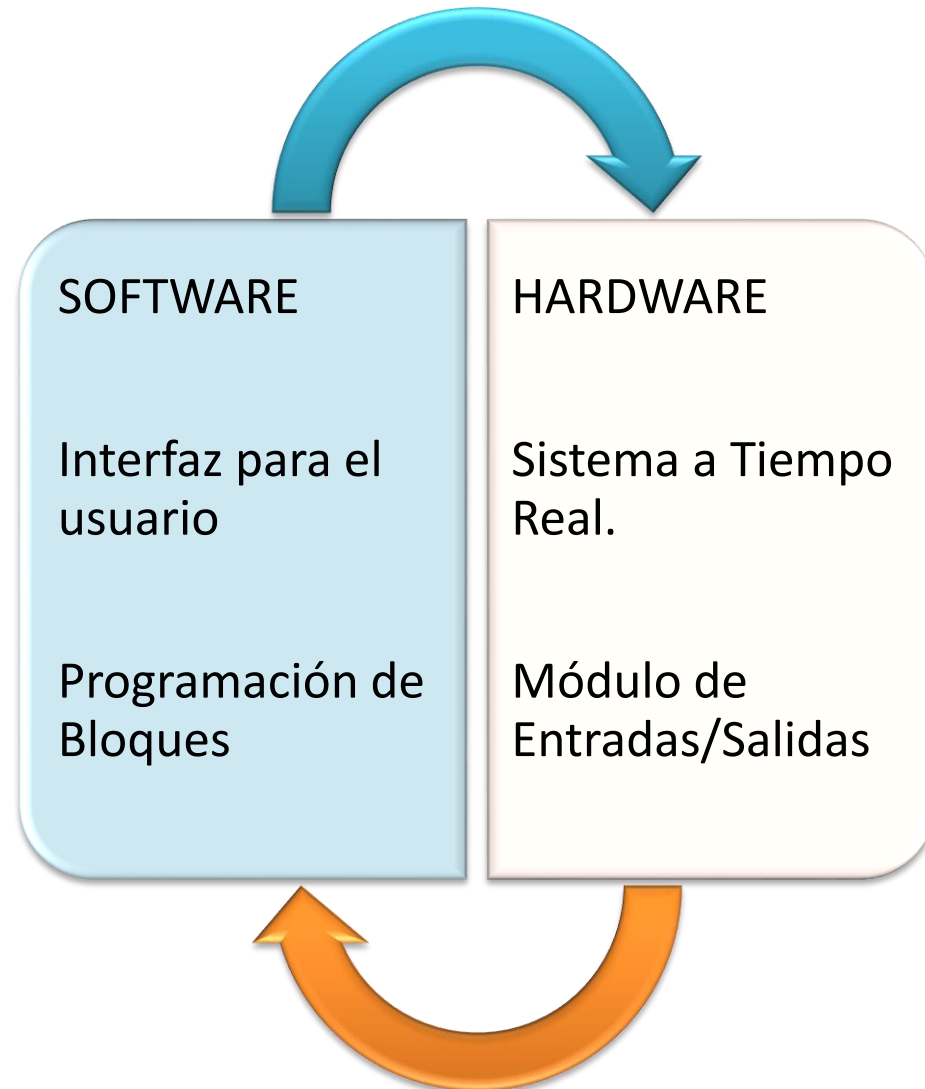


# DESARROLLO DEL SISTEMA EMBEBIDO

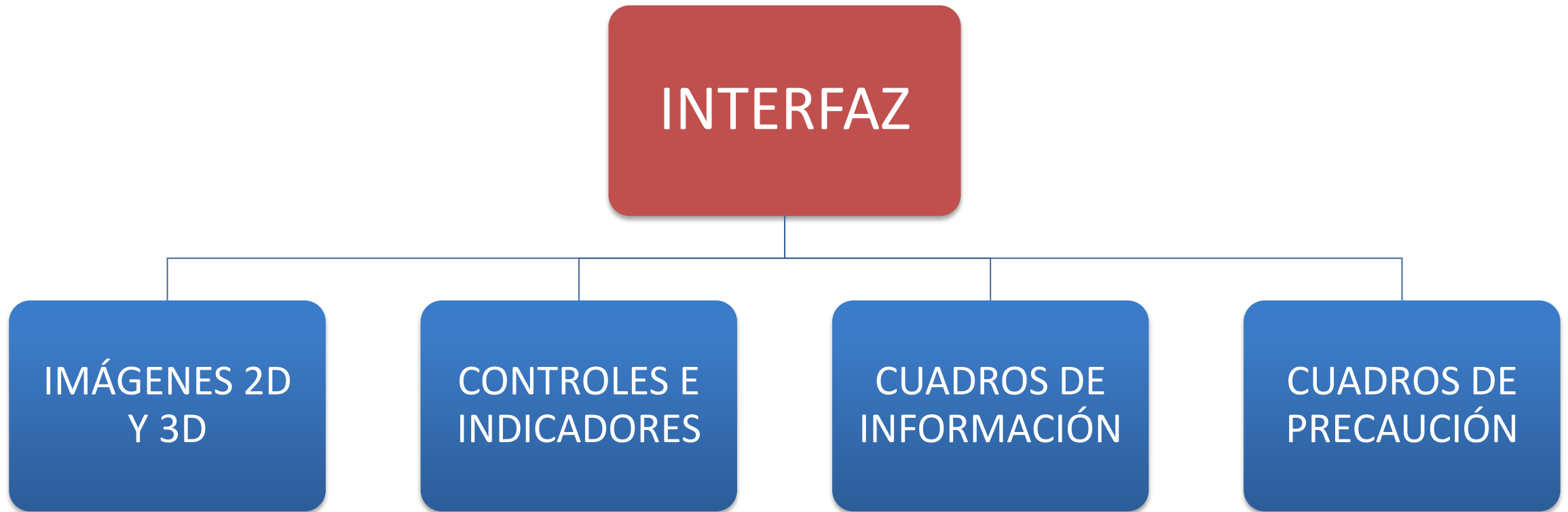


# DESARROLLO DEL SISTEMA EMBEBIDO

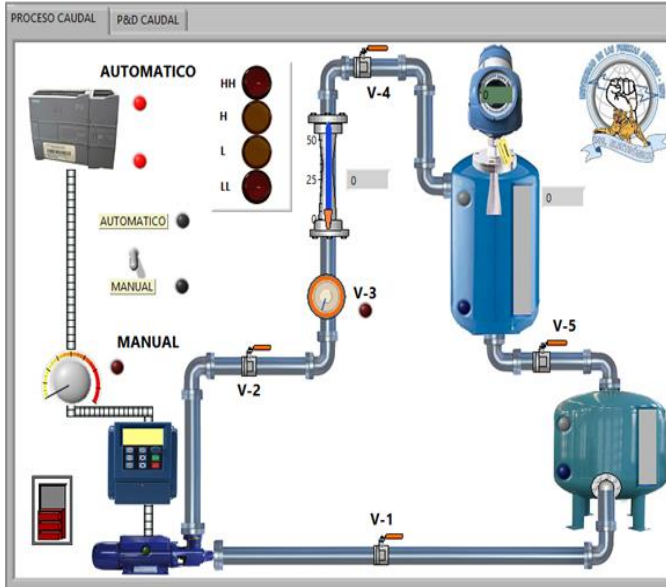
## SISTEMA EMBEBIDO



# DESARROLLO DEL SISTEMA EMBEBIDO



# DESARROLLO DEL SISTEMA EMBEBIDO



**CRITERIOS DE OPERACIÓN**

SISTEMA HABILITADO

VALVULA V-1

VALVULA V-2

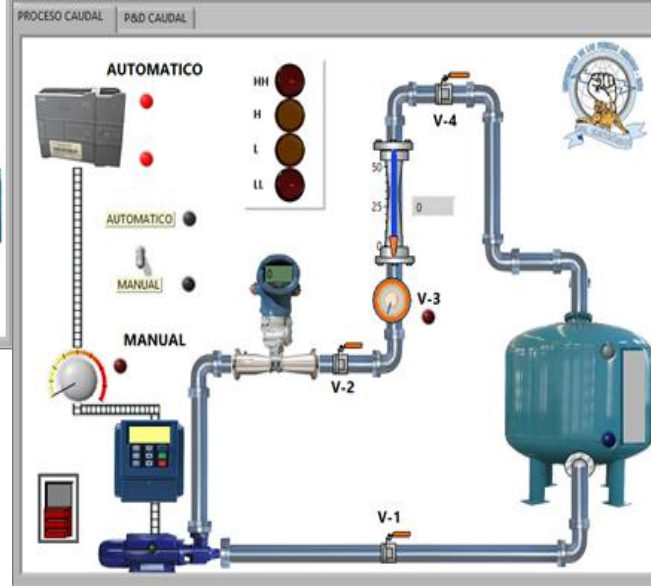
VALVULA V-4

VALVULA V-5

VARIADOR DE FRECUENCIA

MODELO MATEMÁTICO

REGISTRO DE DATOS



**CRITERIOS DE OPERACIÓN**

SISTEMA HABILITADO

VALVULA V-1

VALVULA V-2

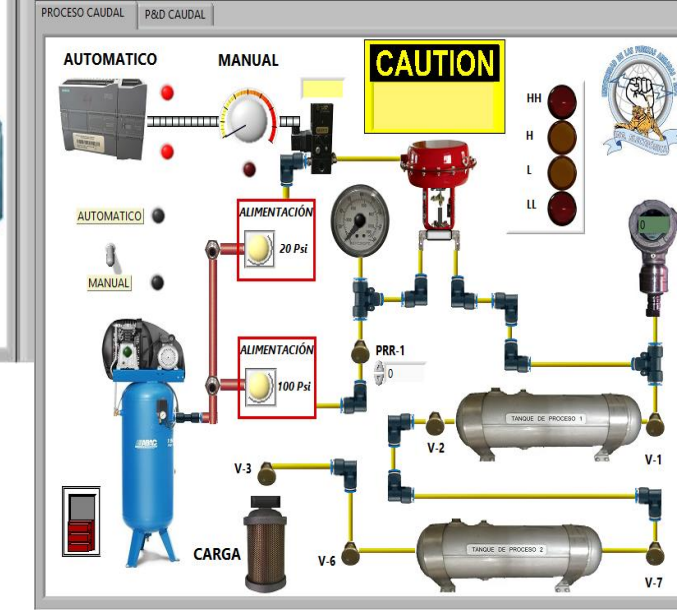
VALVULA V-3

VARIADOR DE FRECUENCIA

VALVULA DE CARGA

MODELO MATEMÁTICO

REGISTRO DE DATOS



**CRITERIOS DE OPERACIÓN**

SISTEMA HABILITADO

VALVULA V-1

VALVULA V-2

VALVULA V-6

VALVULA V-7

VALVULA PRR-1

CONVERSOR I/P

VALVULAS DE CARGA V-3

MODELO MATEMÁTICO

REGISTRO DE DATOS

INFORMACIÓN DEL CONTROLADOR

Entrada PLC: 0

Salida al PLC: 0

PARÁMETROS DEL SISTEMA

Lim Sup: 0

Lim Inf: 0

PV: 0

CV: 0

TRANSMISOR: 0

VARIADOR: 0

RESET

Stop

ADVERTENCIAS



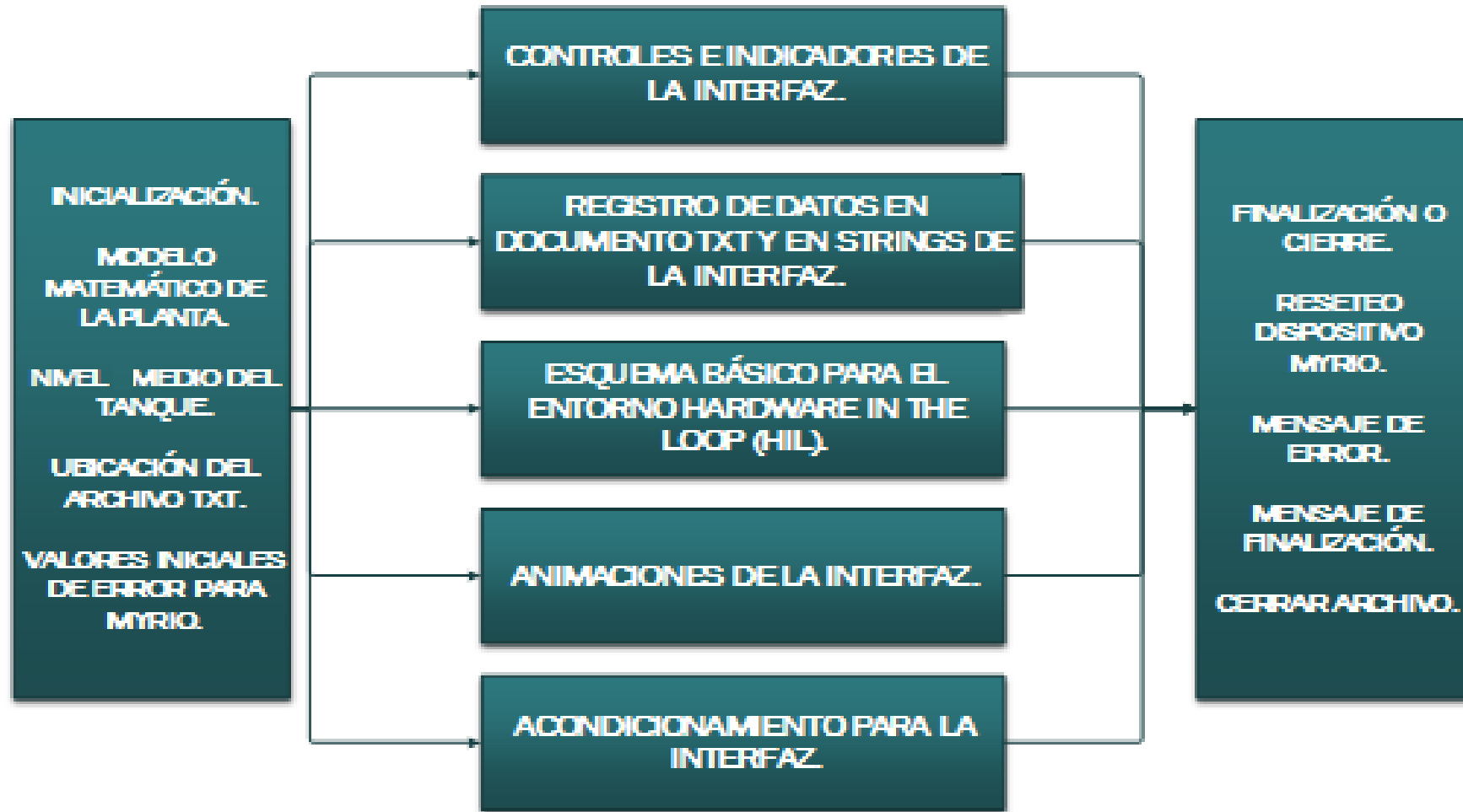


# DESARROLLO DEL SISTEMA EMBEBIDO



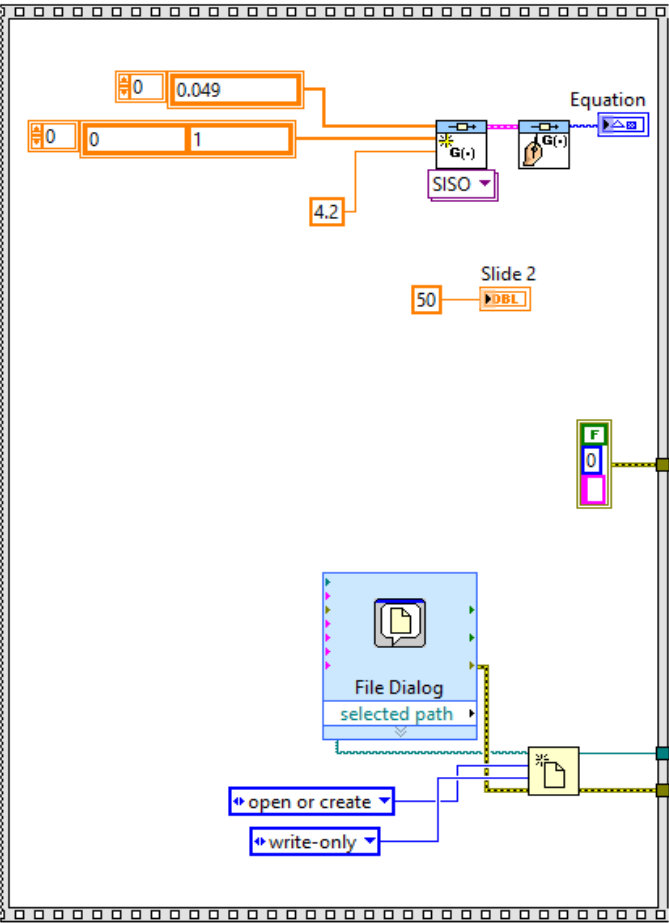


# DESARROLLO DEL SISTEMA EMBEBIDO



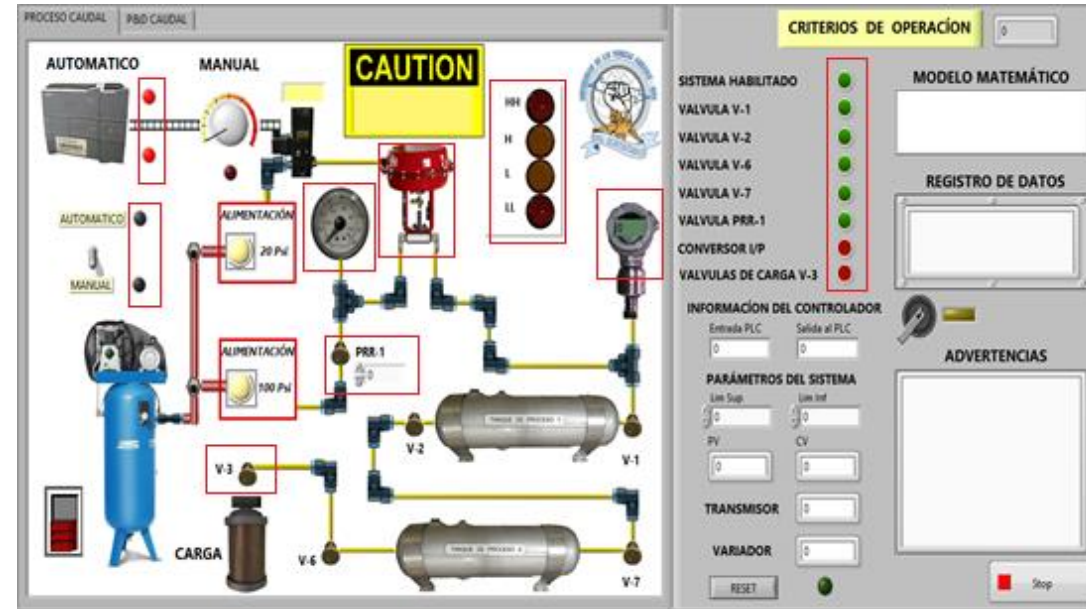
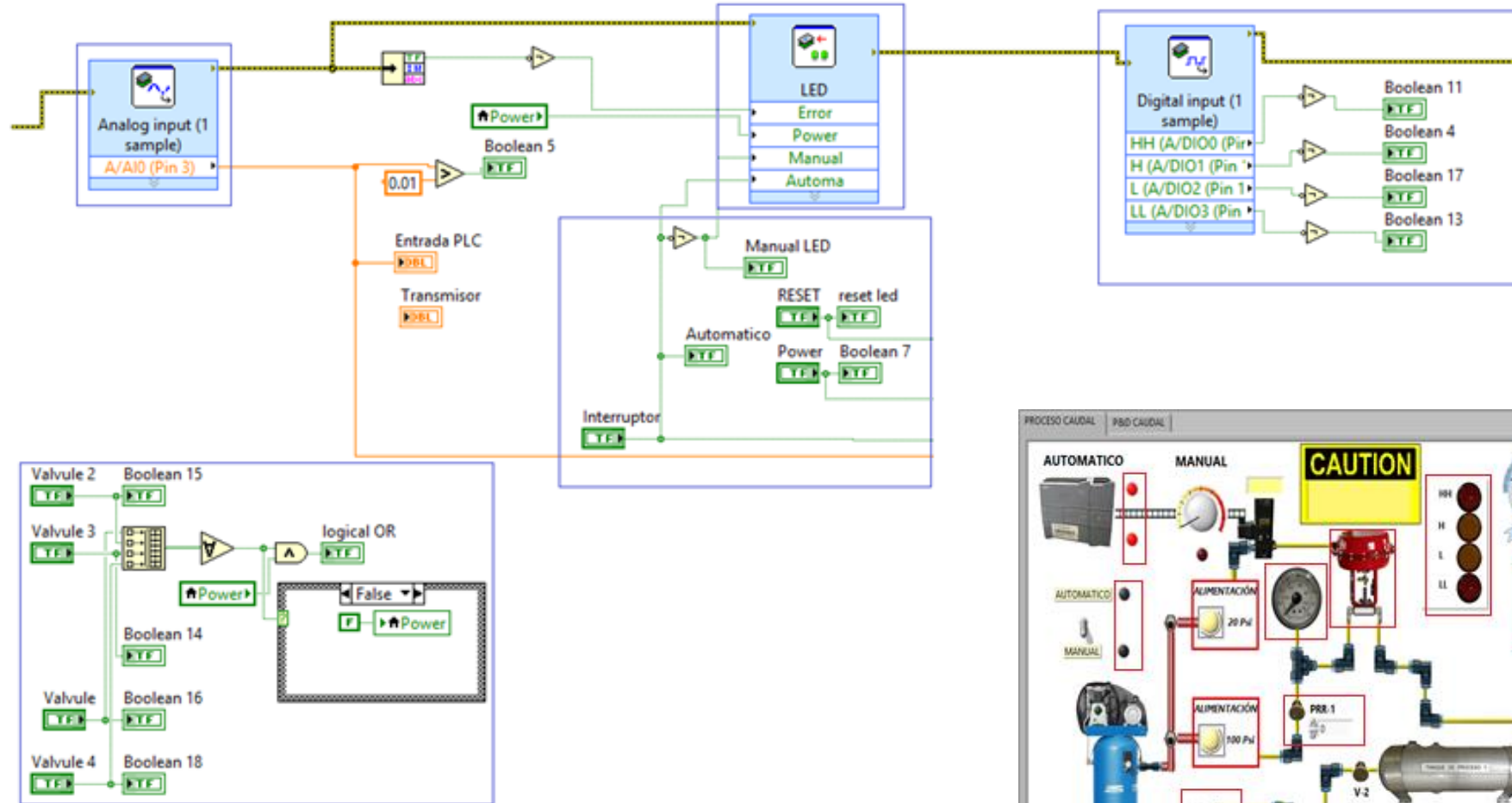
# DESARROLLO DEL SISTEMA EMBEBIDO

1

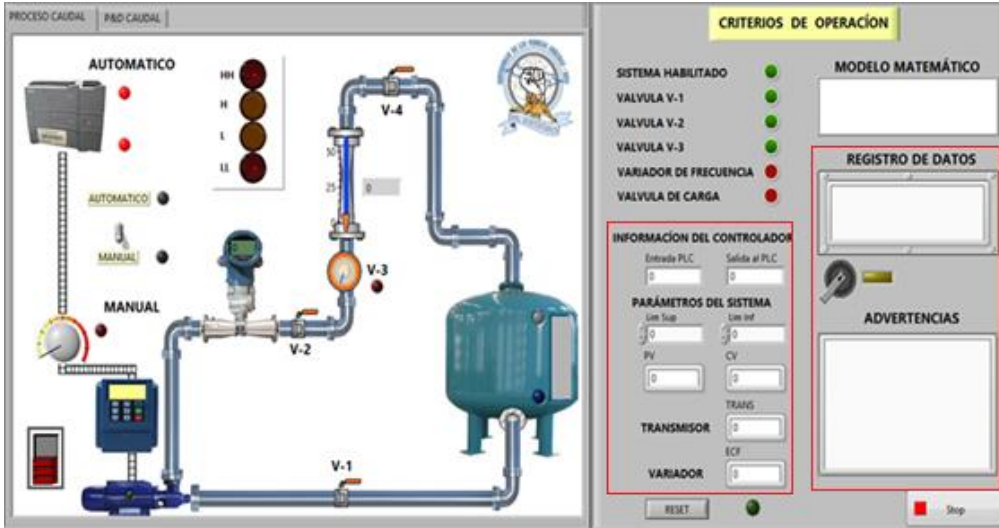
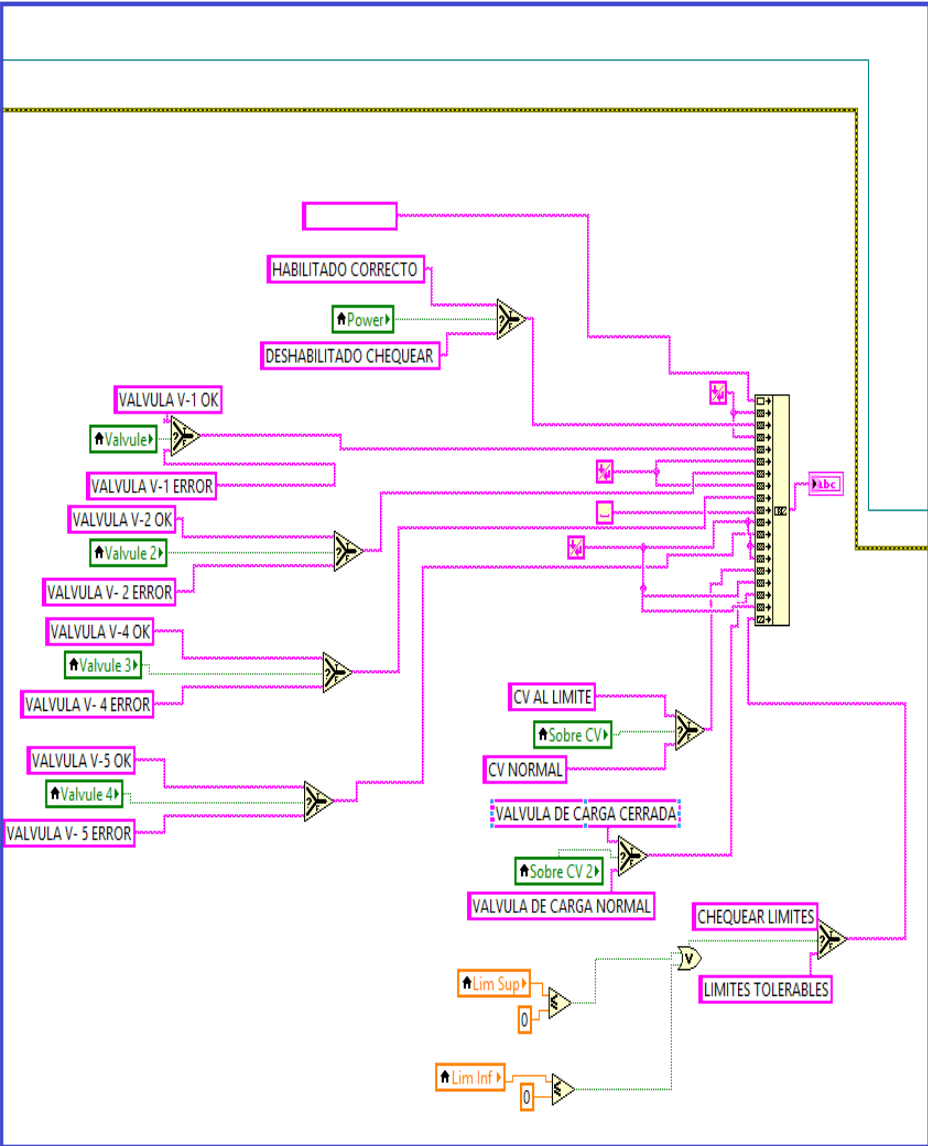
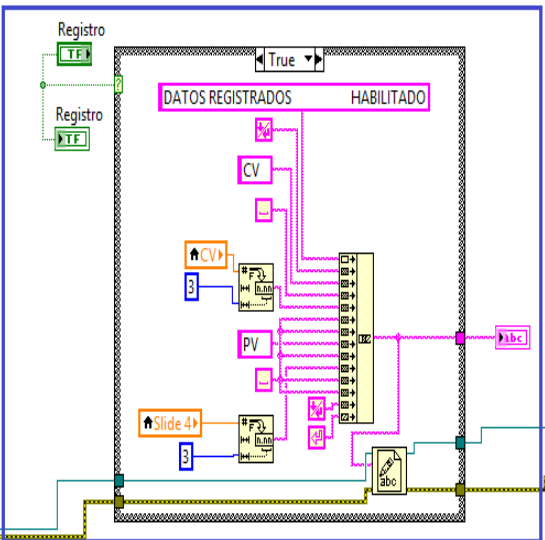


# DESARROLLO DEL SISTEMA EMBEBIDO

2



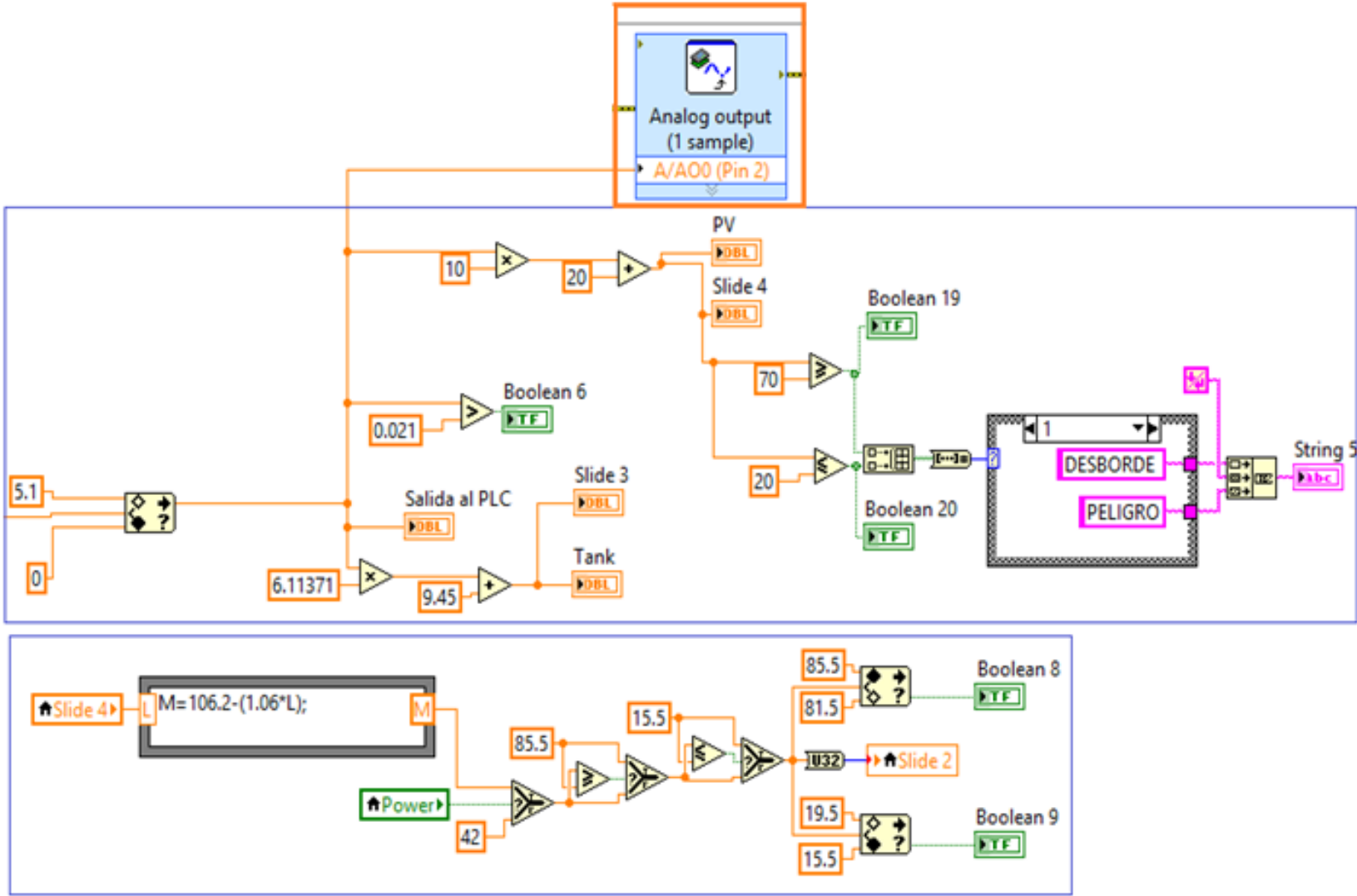
# DESARROLLO DEL SISTEMA EMBEBIDO



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

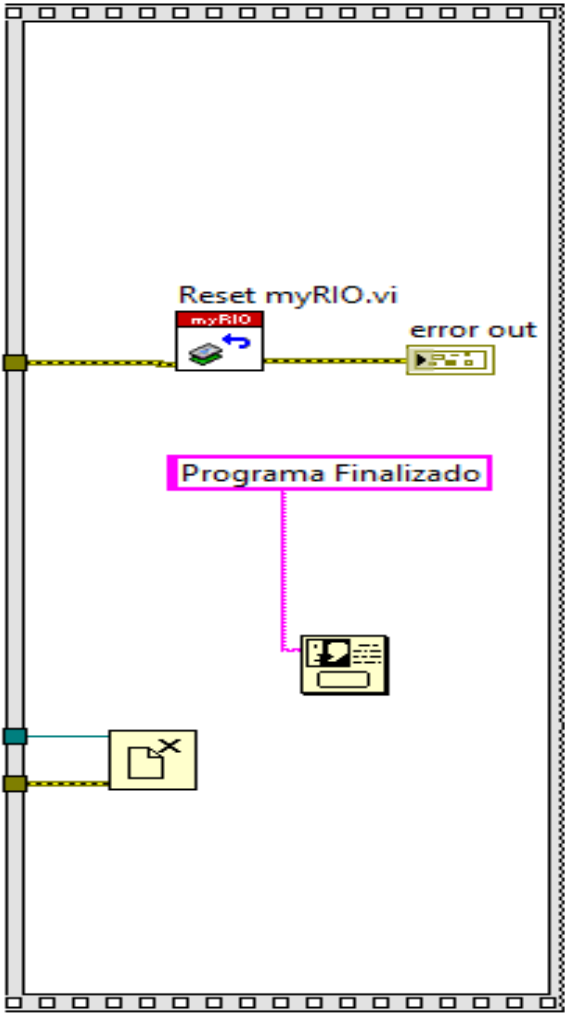


# DESARROLLO DEL SISTEMA EMBEBIDO

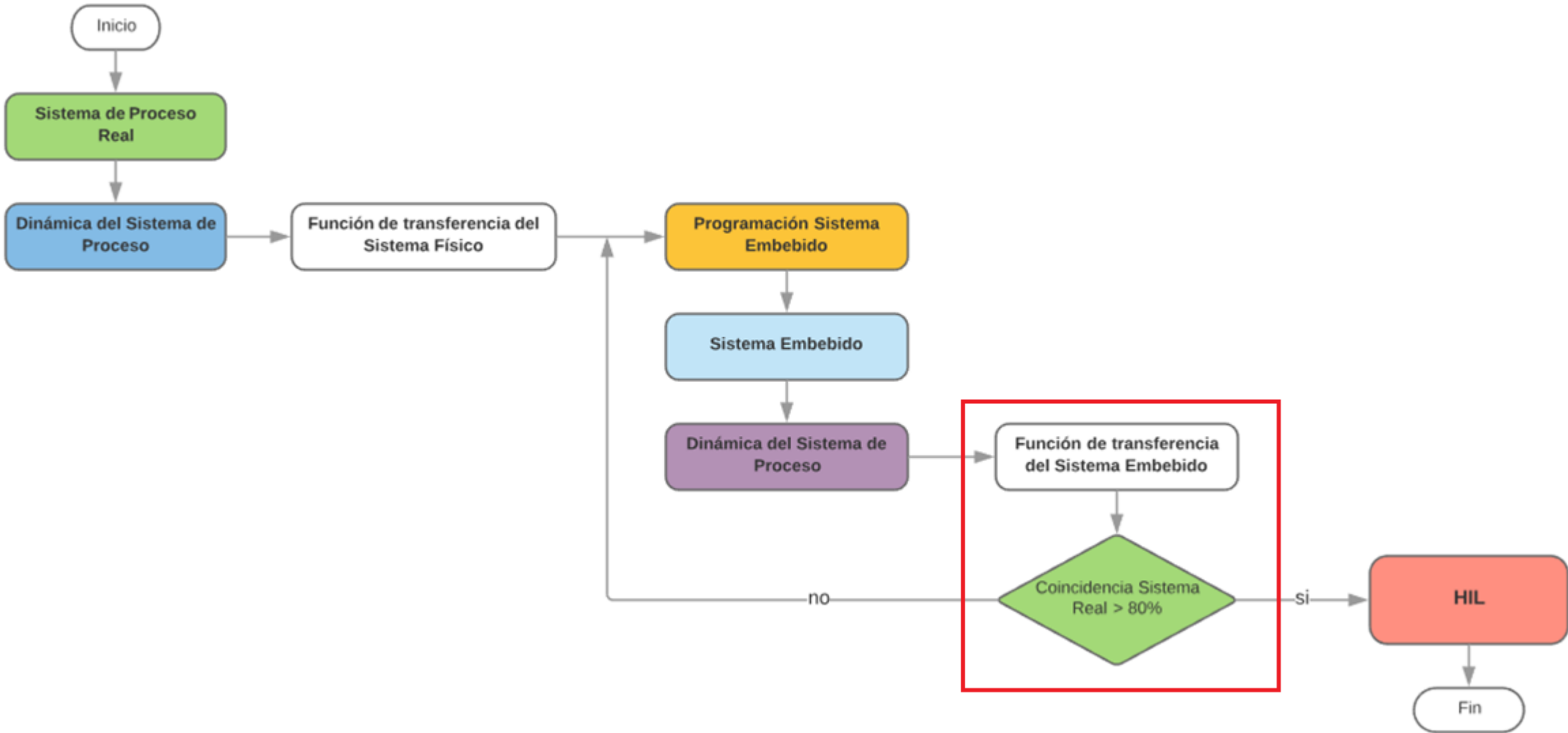


# DESARROLLO DEL SISTEMA EMBEBIDO

3

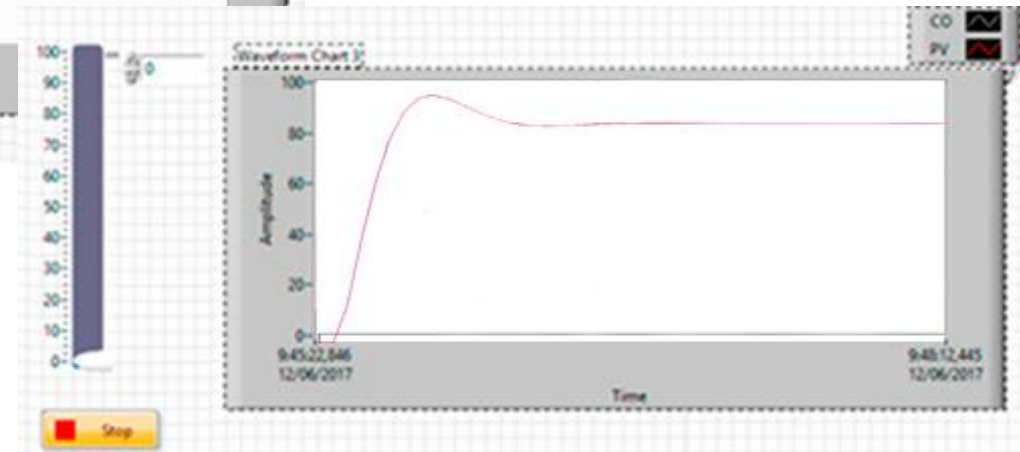
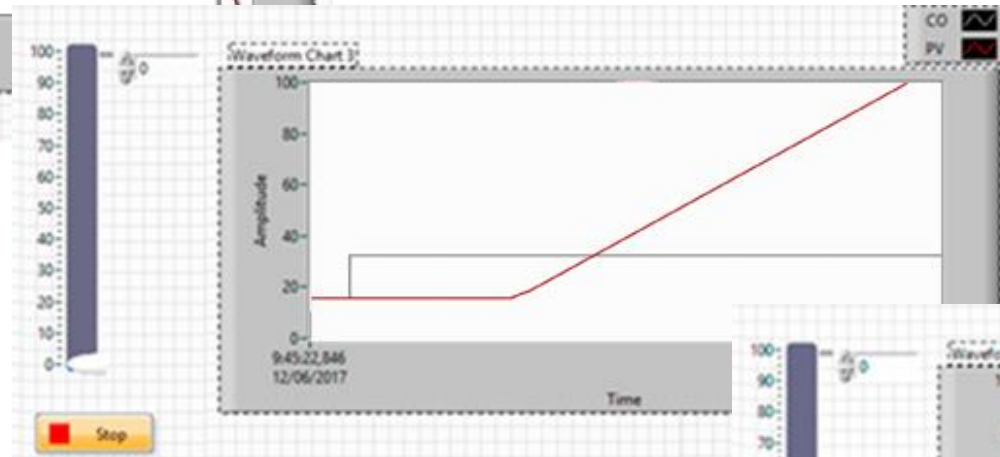
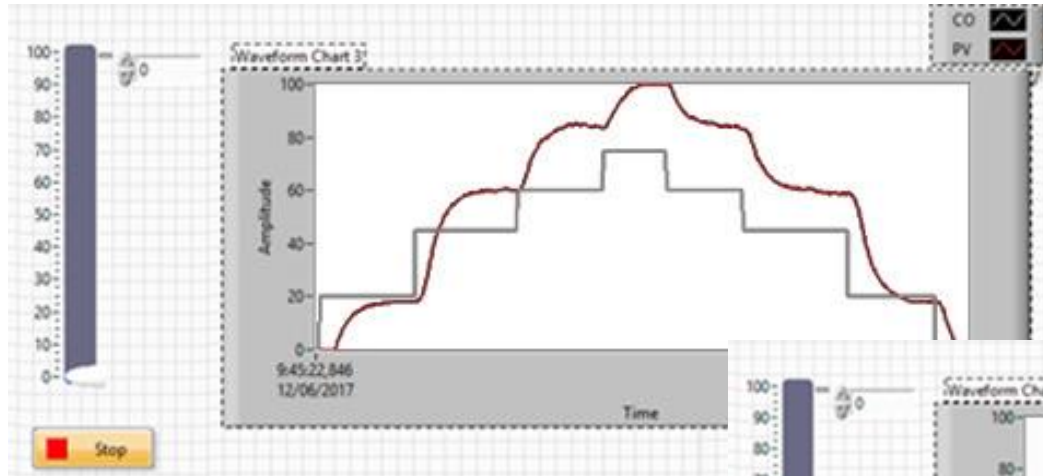


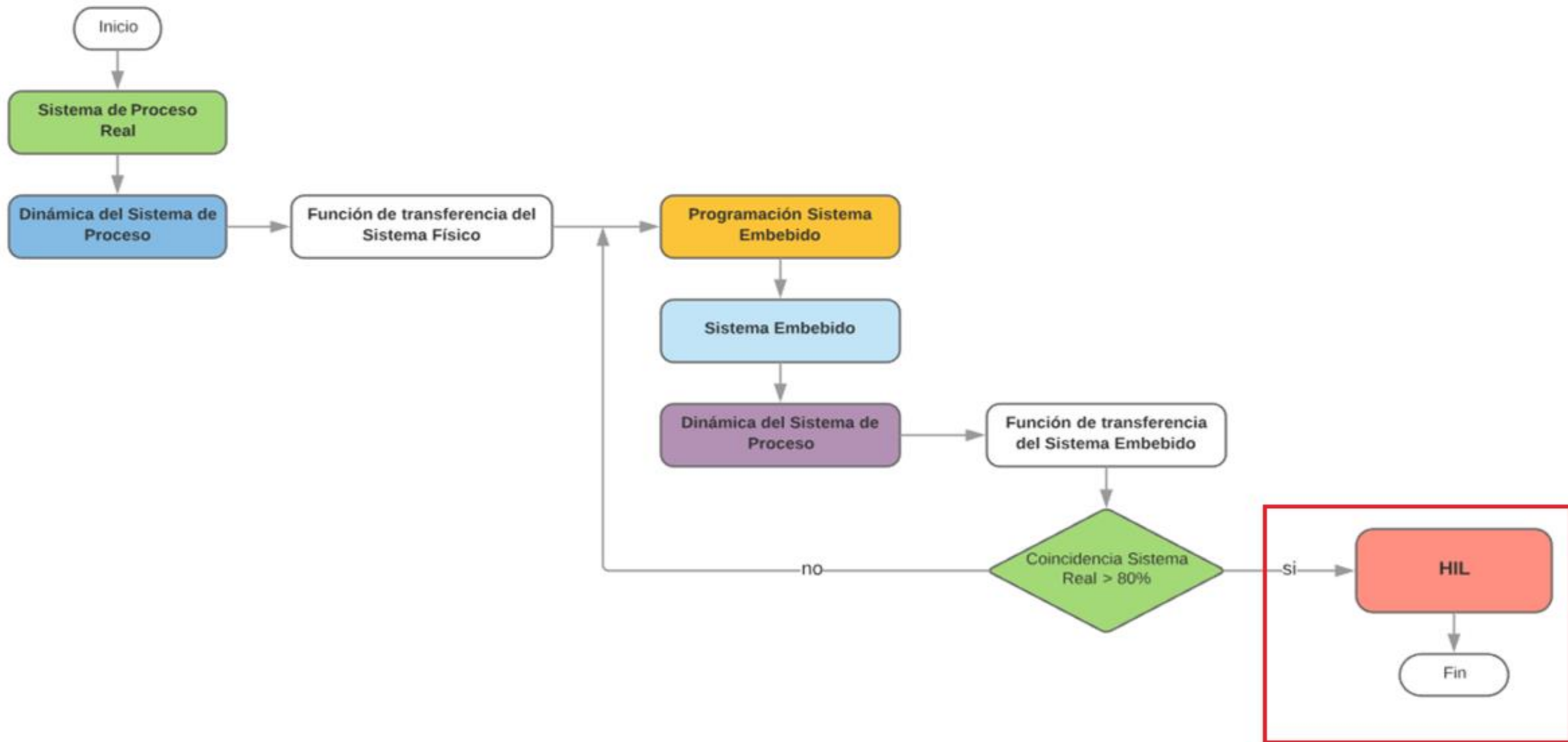
# DESARROLLO DEL SISTEMA EMBEBIDO





# DESARROLLO DEL SISTEMA EMBEBIDO



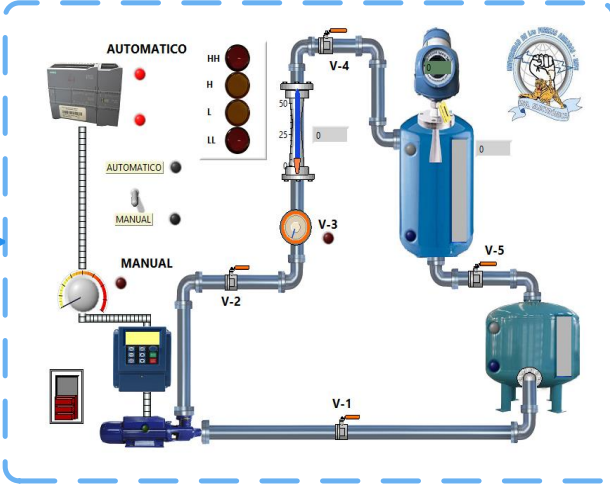


# ENTORNO HIL

PLC SIEMENS  
S7-1200

NI MYRIO - 1900

INTERFACE DE  
OPERADOR O USUARIO.



SEÑALES DE CONTROL

SEÑALES DE RETROALIMENTACION

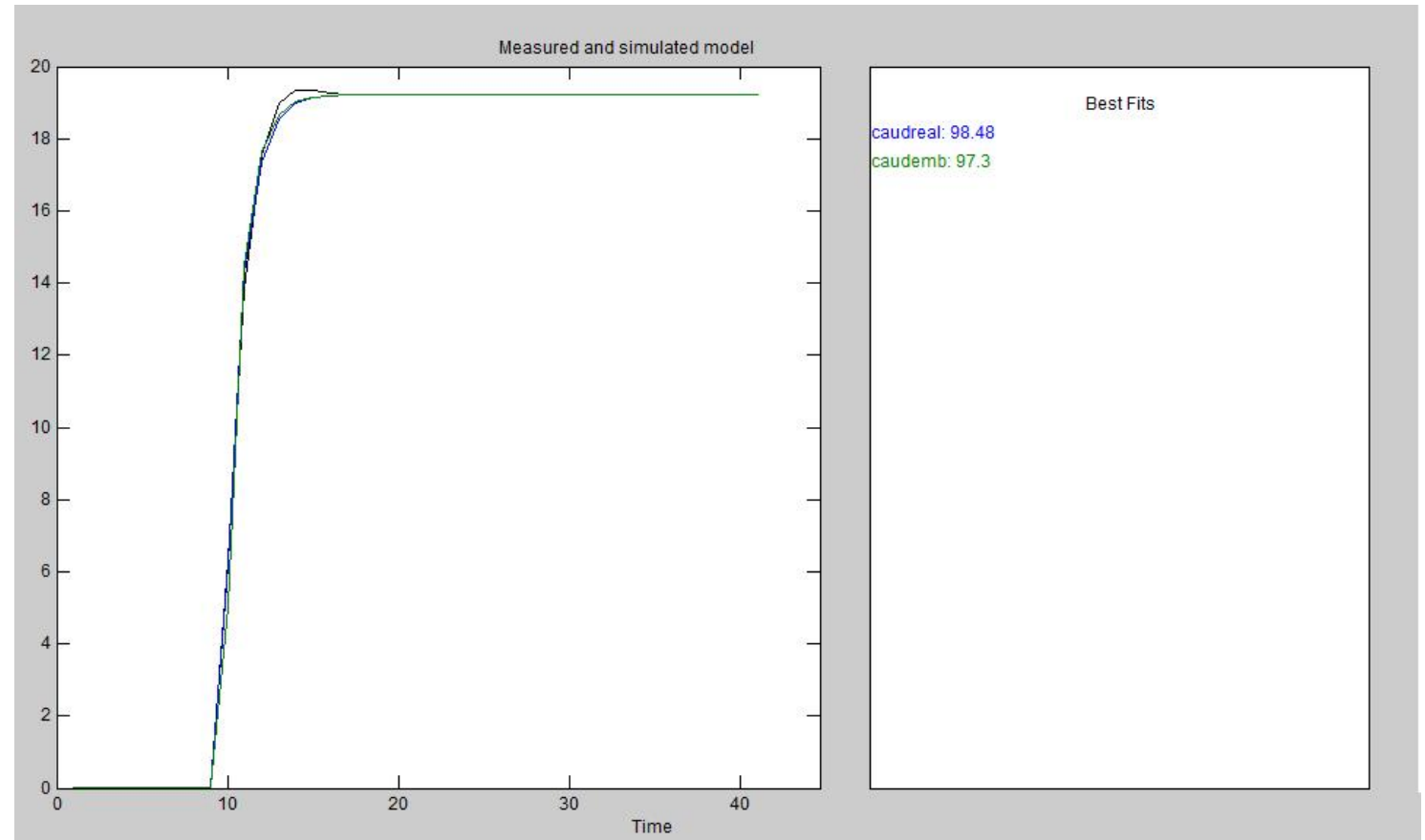


# ANÁLISIS DE RESULTADOS

## VALIDACIÓN DEL SISTEMA EMBEBIDO

$$G(s)_{real} = \frac{1.9211}{1.2168s+1} e^{-0.7023s}$$

$$G(s)_{embebido} = \frac{1.9121}{1.2202s+1} e^{-1.4102s}$$

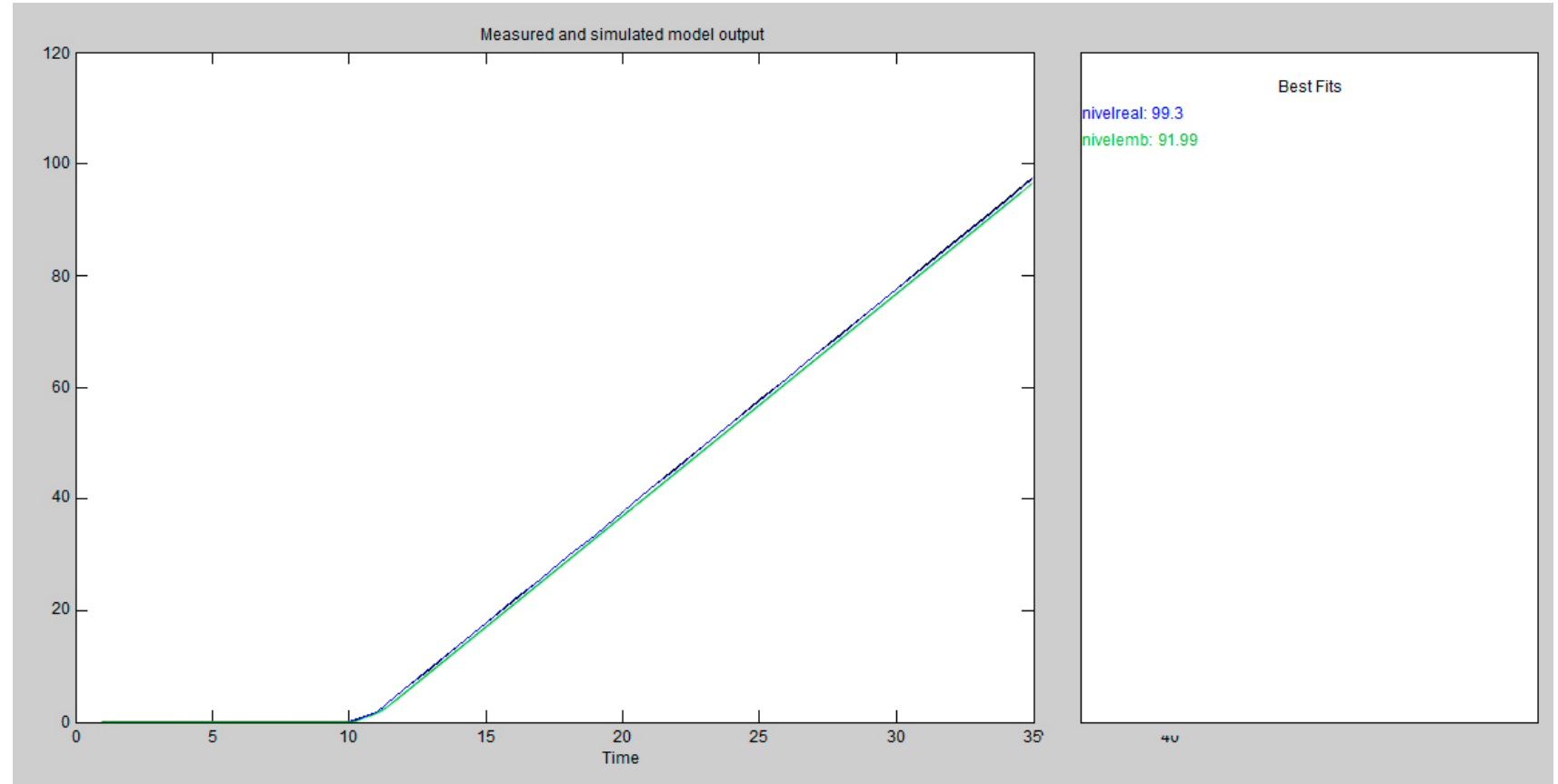


# ANÁLISIS DE RESULTADOS

## VALIDACIÓN DEL SISTEMA EMBEBIDO

$$G(s)_{real} = \frac{0.04997}{s} e^{-4.2s}$$

$$G(s)_{embebido} = \frac{0.07}{s} e^{-3.6s}$$

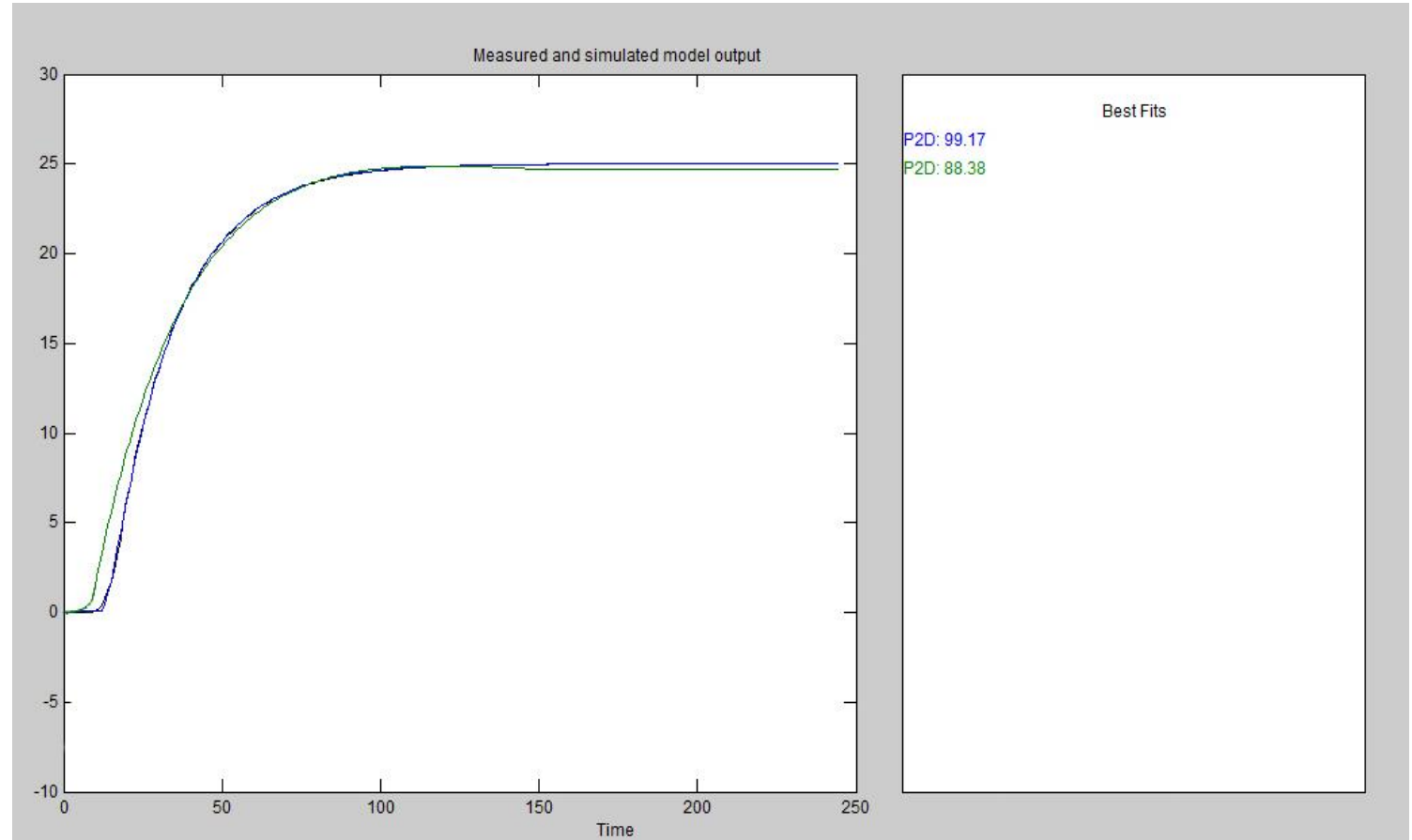


# ANÁLISIS DE RESULTADOS

## VALIDACIÓN DEL SISTEMA EMBEBIDO

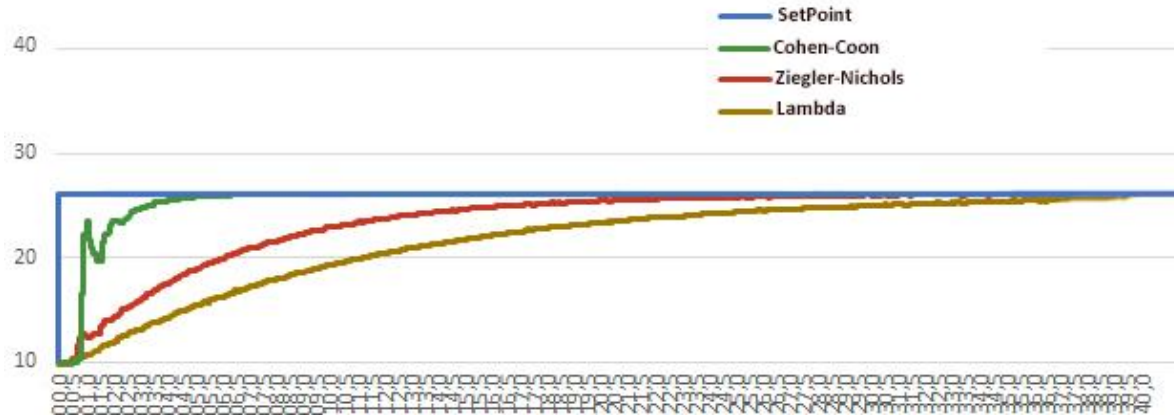
$$G(s)_{real} = \frac{25.011}{(71.1478s^2 + 9.96069s + 1)} e^{-0.686s}$$

$$G(s)_{embebido} = \frac{25.102}{(70.8452s^2 + 8.96069s + 1)} e^{-1.02s}$$



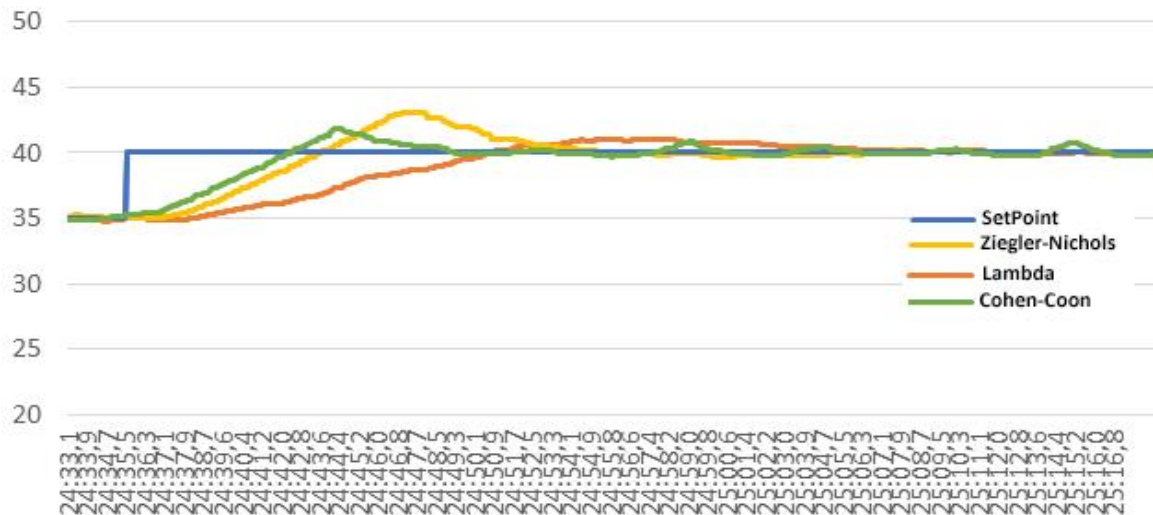
# ANÁLISIS DE RESULTADOS

## CONTROLADOR



Método de Sintonía	Kp	Ti	Td	Sobrepulso	TS(s)
Ziegler-Nichols	0.82597	4.1346	0	0	30
Lambda	0.2199	2.84	0.6147	0	46
Cohen-Coon	0.5479	0.6538	0	0	8

Comparación de los Métodos de sintonía para el Sistema de Control de Caudal



Método de Sintonía	Kp	Ti	Td	Sobrepulso	TS(s)
Ziegler-Nichols	7.0519	8.4	1.554	0.077	19
Chien, Hrones y Reswick	0.2638	8.64	1.512	0.016	39
Cohen-Coon	23.989	0.10602	0	0.024	-

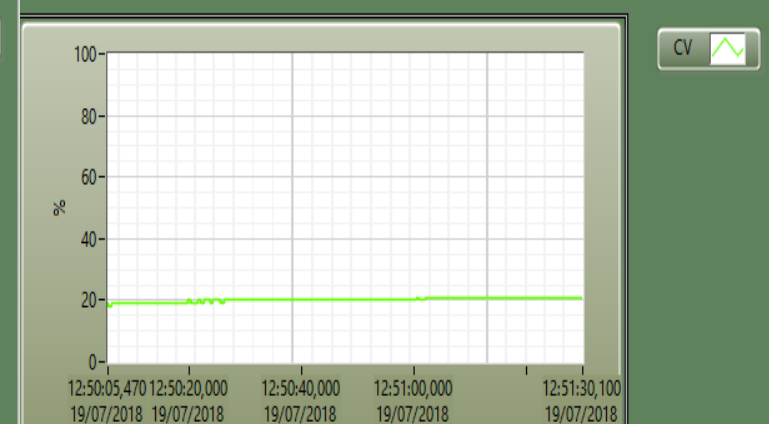
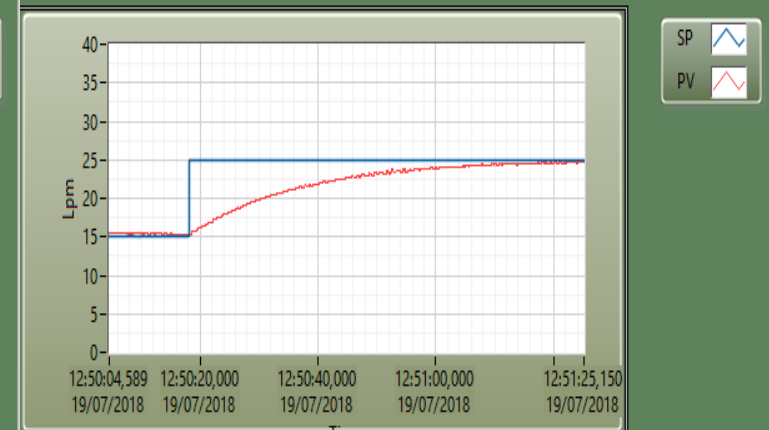
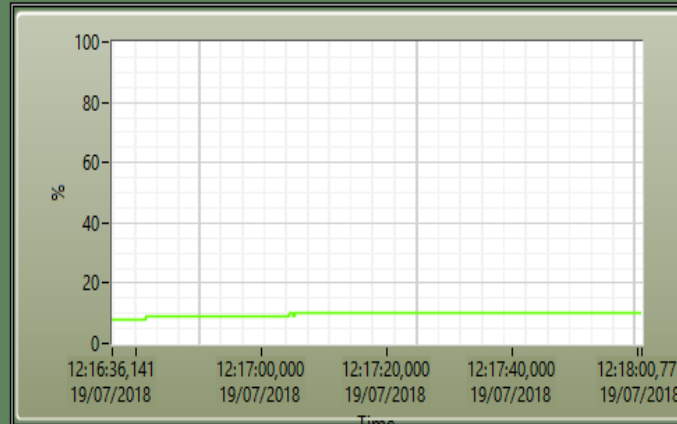
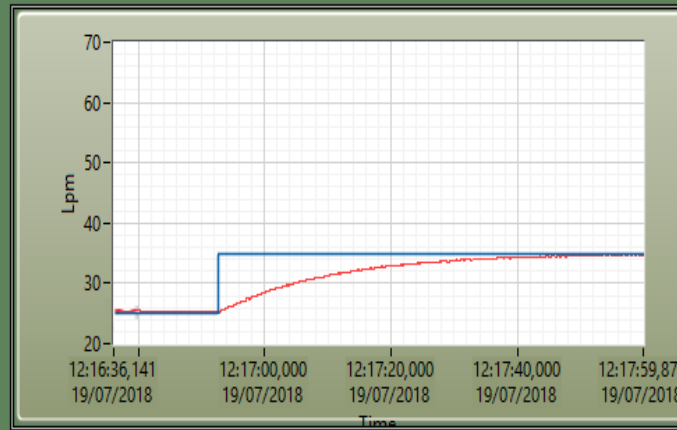
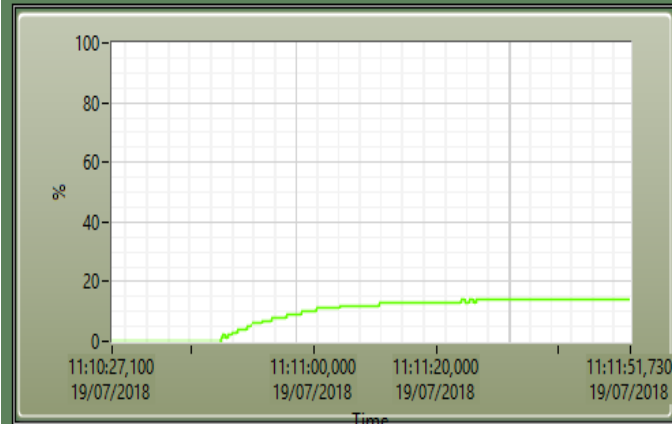
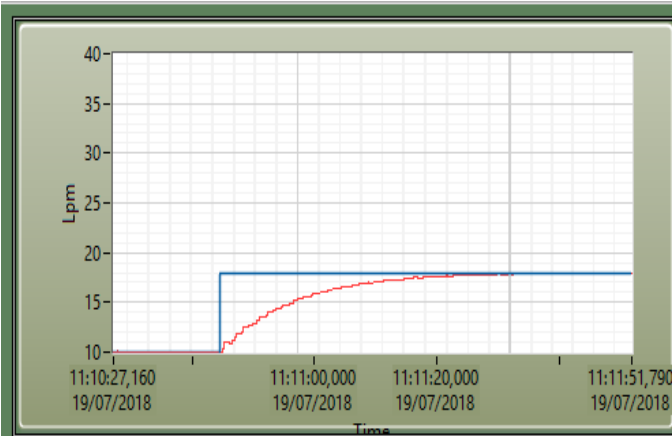
Comparación de los Métodos de Sintonía para el Sistema de Control de Nivel





# ANÁLISIS DE RESULTADOS

## CONTROLADOR



Respuesta del Sistema de Caudal con el Controlador PID

Respuesta del Sistema de Nivel con el Controlador PID

Respuesta del Sistema de Presión con el Controlador PID





# CONCLUSIONES

- La simulación de las Estaciones de Procesos no puede sustituir completamente la experiencia de usuario que brindan los módulos físicos en forma real. Pero, al tener esta simulación el mismo funcionamiento que dichas Estaciones con la gran ventaja de eliminar riesgos que afecten a la seguridad del operador, medio ambiente y equipos, dan al usuario la tranquilidad de experimentar y probar todas las funcionalidades de cada Sistema de Control en un entorno seguro, incluso llevarlo a condiciones extremas de trabajo, brindando así el conocimiento necesario al usuario para que al interactuar con las Estaciones de Procesos Reales no se cometan errores que causen daños o catástrofes.
- La validación de las Estaciones de Procesos embebidas permiten asegurar que el funcionamiento de las mismas sea lo más cercano posible al funcionamiento de las Estaciones de Procesos en forma real, lo que permite que el usuario tenga una experiencia muy similar tanto en el Sistema Simulado como en el Sistema Real.



# CONCLUSIONES

- La inmersión y familiarización del usuario con los Sistemas de Control de Procesos implementados a través de la técnica Hardware in the Loop, es primordial para conseguir un correcto conocimiento del funcionamiento de los mismos, para lo cual, la importación de gráficas en 3D de cada elemento que compone la Planta de Proceso contribuye en un alto grado para que la simulación de dichas plantas presenten una apariencia muy cercana a las Estaciones de Procesos facilitando al usuario realizar la manipulación de cada elemento de una forma correcta y cumpliendo el objetivo de realizar el control del sistema.
- A pesar que los tres métodos son muy precisos dependiendo de las especificaciones de diseño impuestas, existen algunas diferencias y que al buscar el mejor desempeño del controlador se consideran factores como el tiempo de establecimiento y el sobreimpulso. En éste caso, al ser Sistemas de Procesos sin demasiada complejidad el método de Ziegler-Nichols resultó tener mejor rendimiento, aunque al final es el diseñador del sistema de control quien decide cual método es el adecuado de acuerdo a sus necesidades.



**GRACIAS POR SU ATENCIÓN**



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