



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

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

**MAESTRÍA EN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN**  
**MENCIÓN REDES INDUSTRIALES**

**TEMA: DISEÑO DE UN SISTEMA VIRTUAL 3D DE UNA ESTACIÓN**  
**DE CONTROL DE PRESIÓN ENFOCADO A LA SINTONÍA DE**  
**CONTROLADORES PI-PID**

**AUTOR: GUANO BERMEO, ANDRÉS RODRIGO**

**LATACUNGA DICIEMBRE 2021**



# AGENDA

- Planteamiento del Problema
- Objetivo General
- Objetivos Específicos
- Hipótesis
- Diagrama P&ID del Proceso
- Diagrama 2D del Proceso
- Entorno virtual del Proyecto
- Arquitectura del Proyecto
- Comunicación
- Niveles de usuario del ávatar

# AGENDA

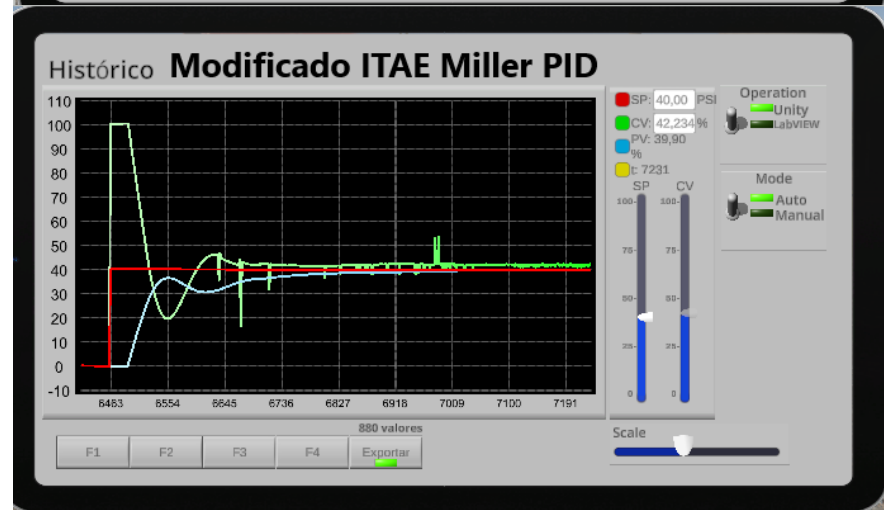
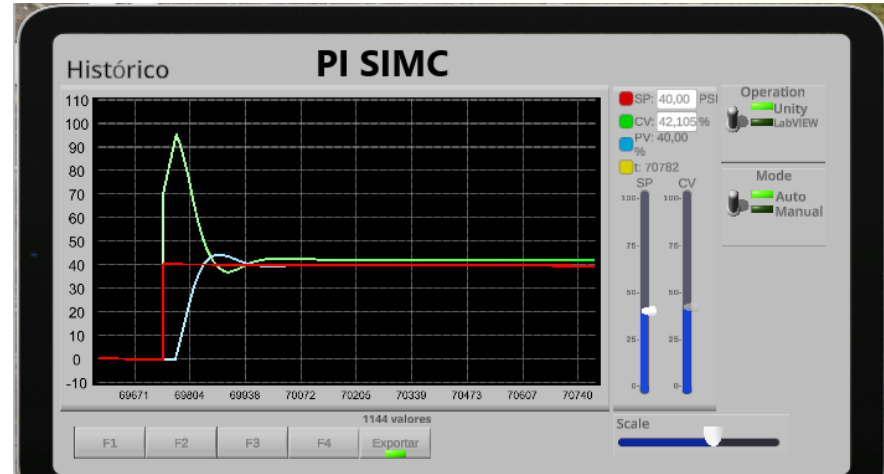
- Animaciones del Proyecto
- Modelado Matemático
- Curvas del Modelo Matemático
- Validación del Modelo Matemático
- Sintonización de Controladores
- Selección del Controlador
- Validación de la Hipótesis
- Conclusiones
- Recomendaciones

# Planteamiento del problema

- Actualmente algunos profesionales de libre ejercicio en el área de control de procesos, no disponen de sistemas didácticos virtuales 3D en donde se pueda evaluar los controladores PI-PID en una estación de presión, considerando que estos controladores siguen aún en vigencia y son muy utilizados en las industrias.
- Los conocimientos teóricos se refuerzan con las prácticas y al necesitar estaciones físicas para poder probar los controladores conlleva a gastos económicos representativos, a esto se le suma la actual pandemia que impide estar presentes en los laboratorios o lugares con muchas personas. En este contexto ha pensado diseñar un sistema virtual 3D de una estación de presión en la cual se pueda implementar los controladores PI-PID con diferentes métodos de sintonización para ver su funcionamiento y poder reforzar los conocimientos teóricos.

# Objetivo General

Diseñar un sistema virtual 3D de una estación de control de presión enfocado a la sintonía de controladores PI-PID.



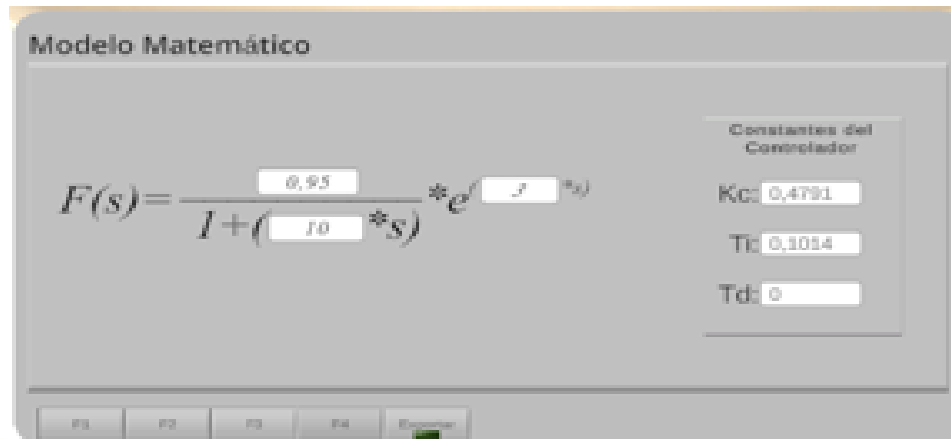
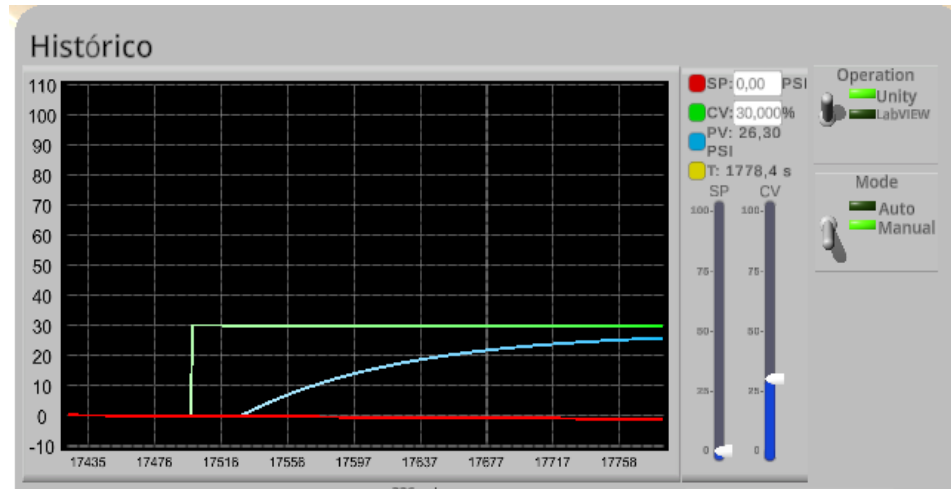
# Objetivos específicos

- Investigar los métodos de sintonización de controladores PI-PID.



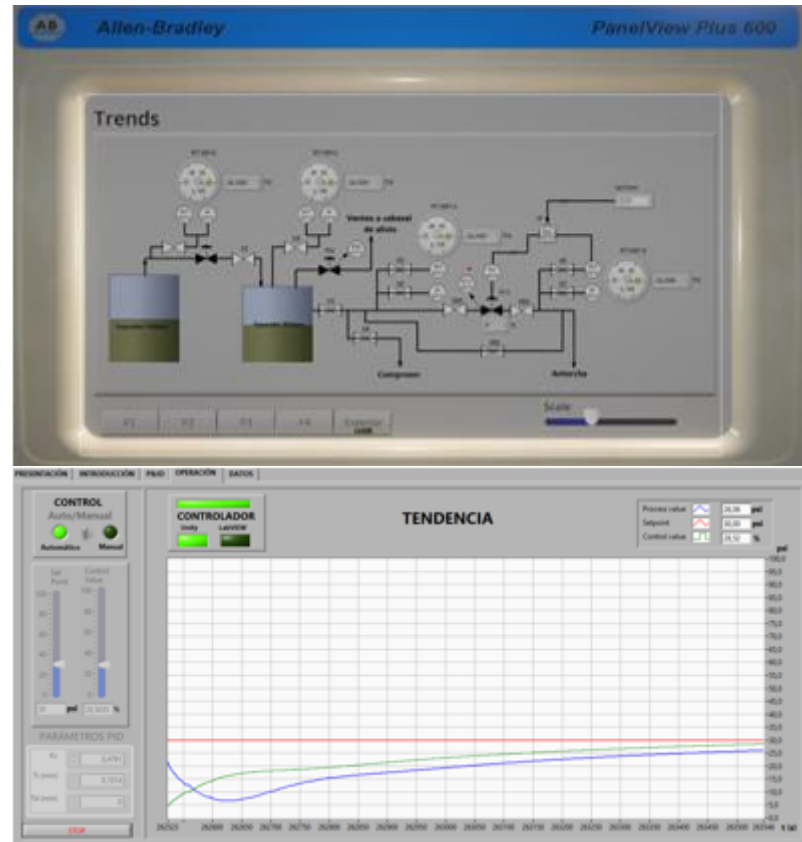
# Objetivos específicos

- Implementar el modelo matemático de la estación de presión.



# Objetivos específicos

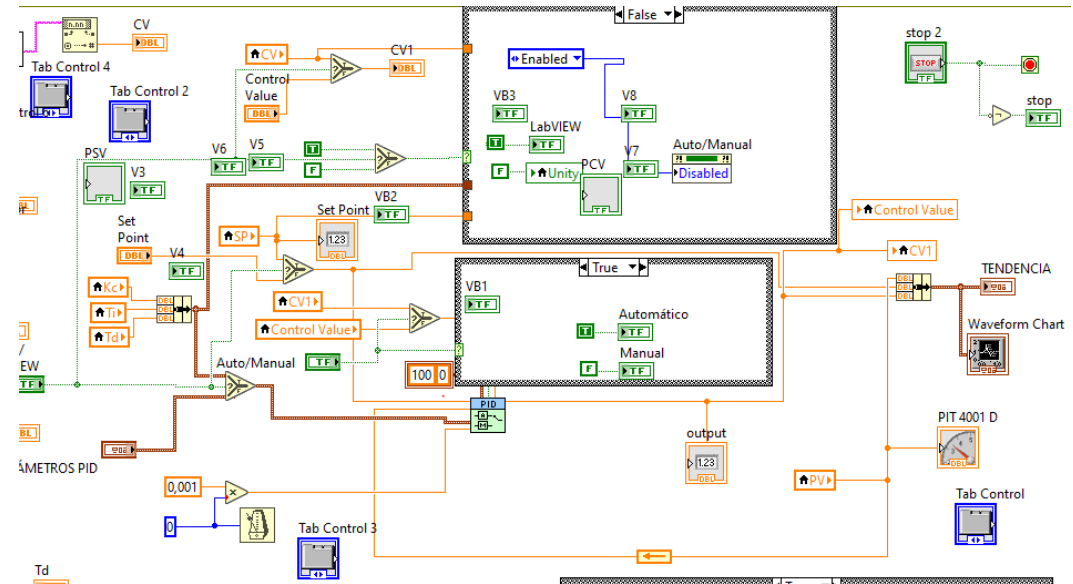
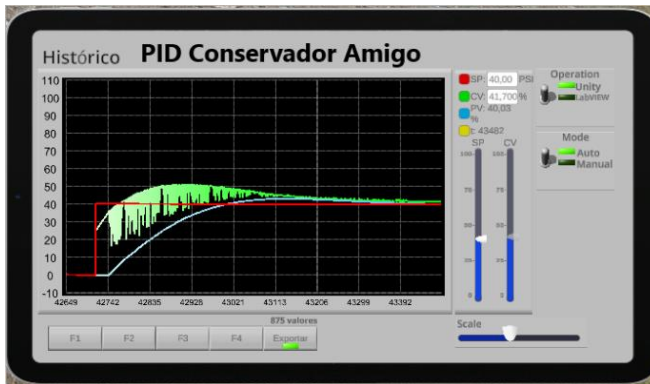
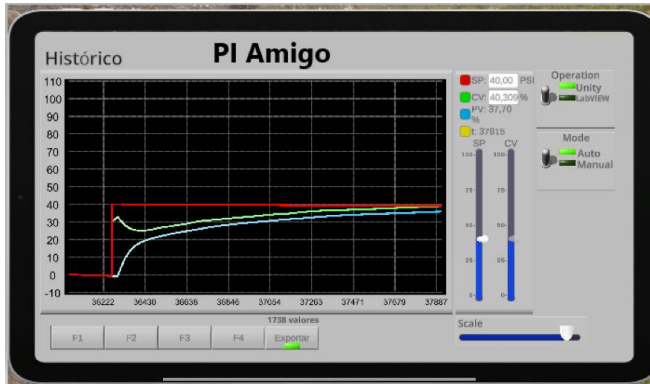
- Diseñar un entorno virtual 3D con Unity que conste con la planta de presión y un HMI para interactuar con las variables del proceso.





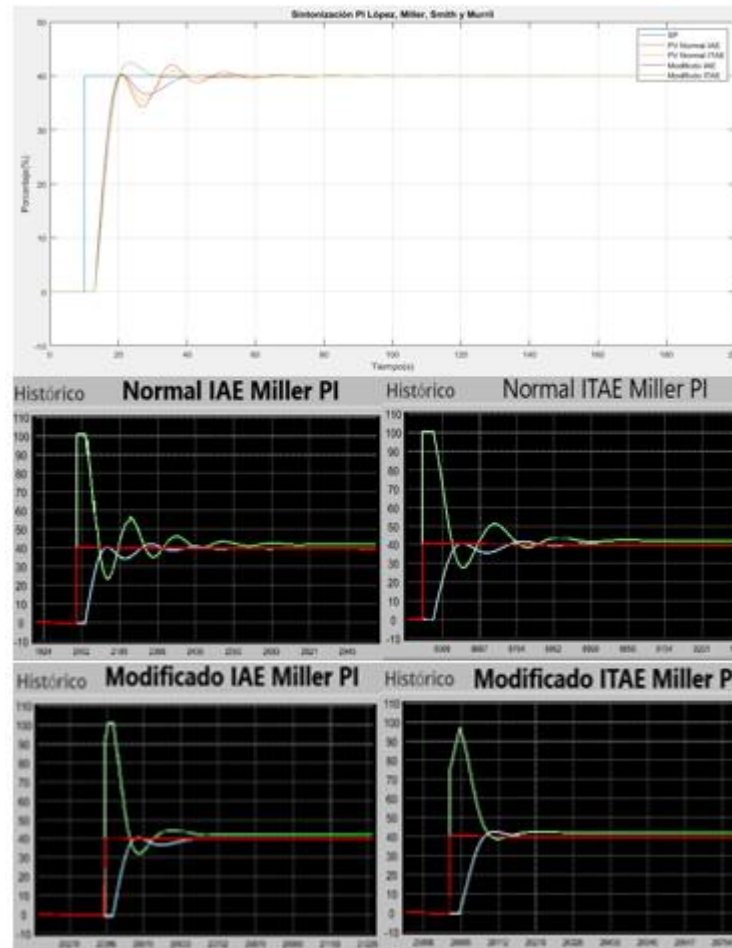
# Objetivos específicos

- Implementar los controladores PI-PID y probar los métodos de sintonización.



# Objetivos específicos

- Realizar las pruebas funcionales del sistema y analizar los resultados obtenidos.

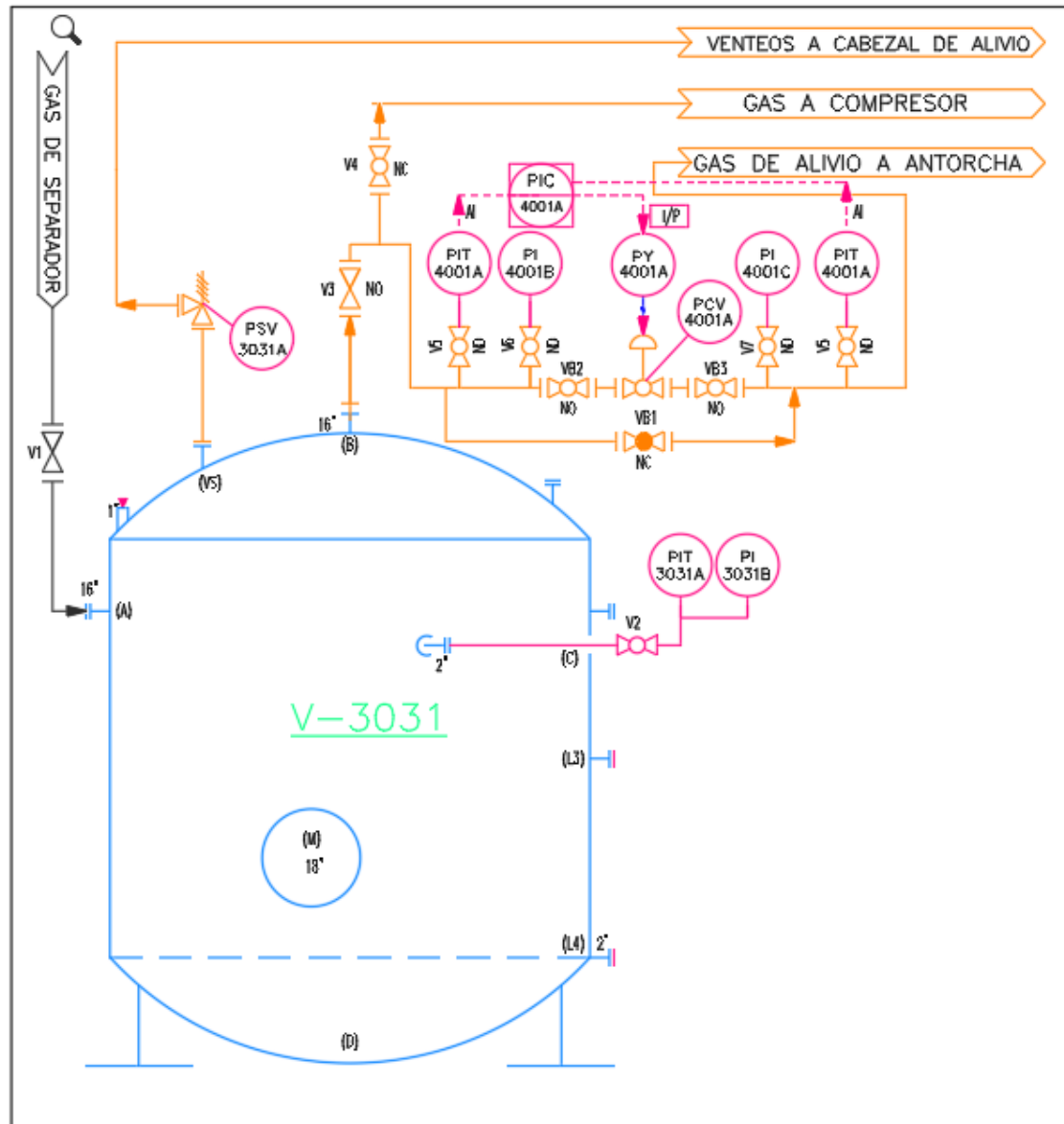


# Hipótesis

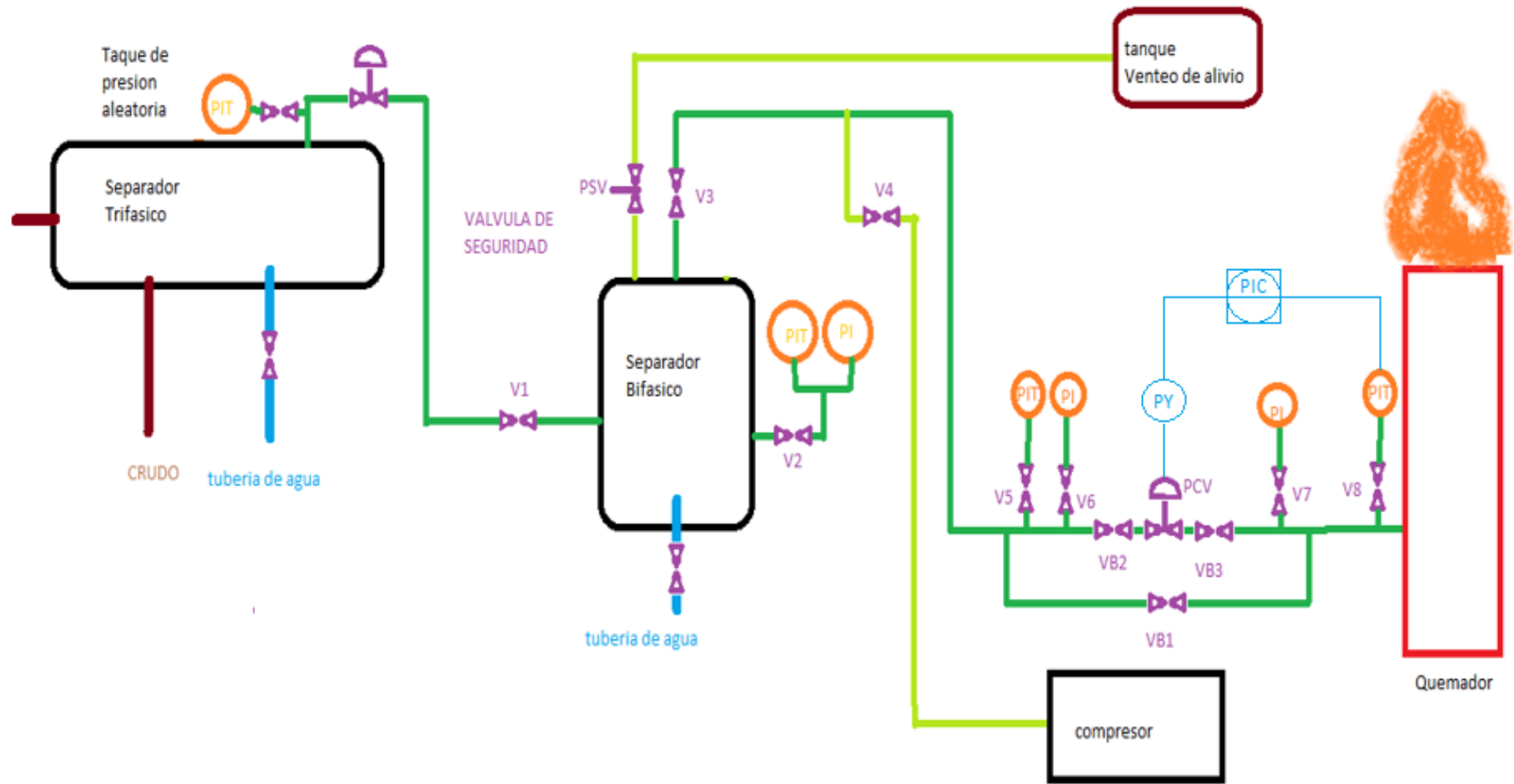
Es posible sintonizar controladores PI-PID de una estación de control de presión mediante un sistema virtual 3D.

- **Variable Independiente:** Sistema Virtual 3D
- **Variable Dependiente:** Sintonización de controladores PI-PID

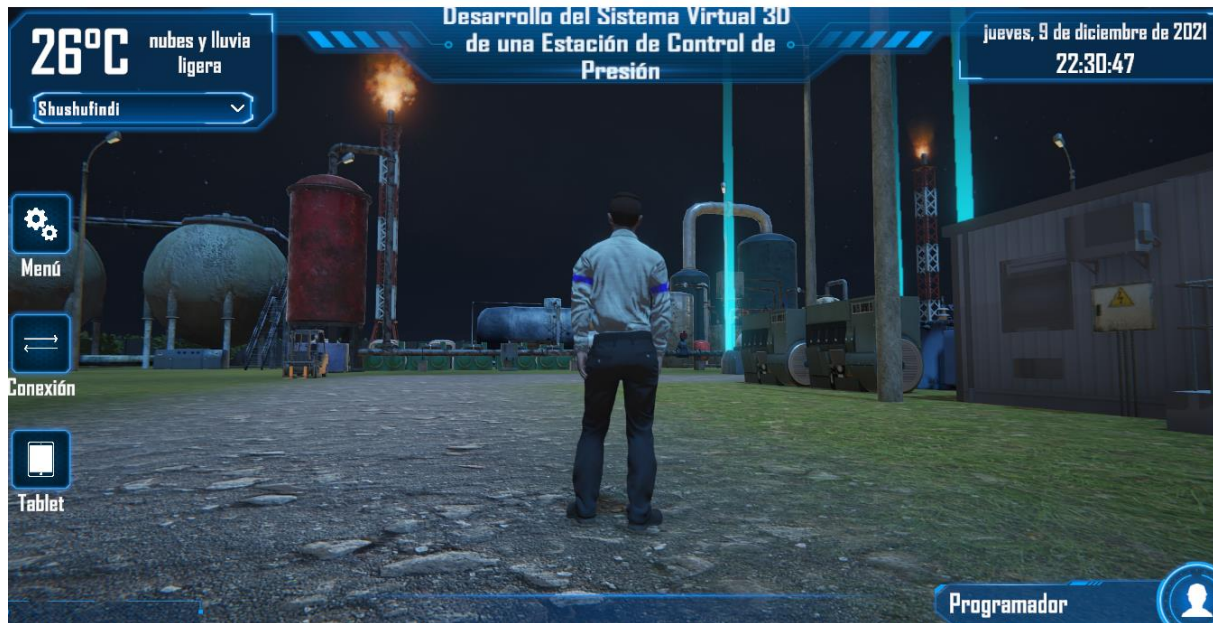
# Diagrama P&ID del proceso



# Diagrama 2D del proceso



# Entorno virtual del proyecto



# Entorno virtual del proyecto



*Tanque de venteo de alivio*



*Compresor con válvula para simulación de perturbaciones.*

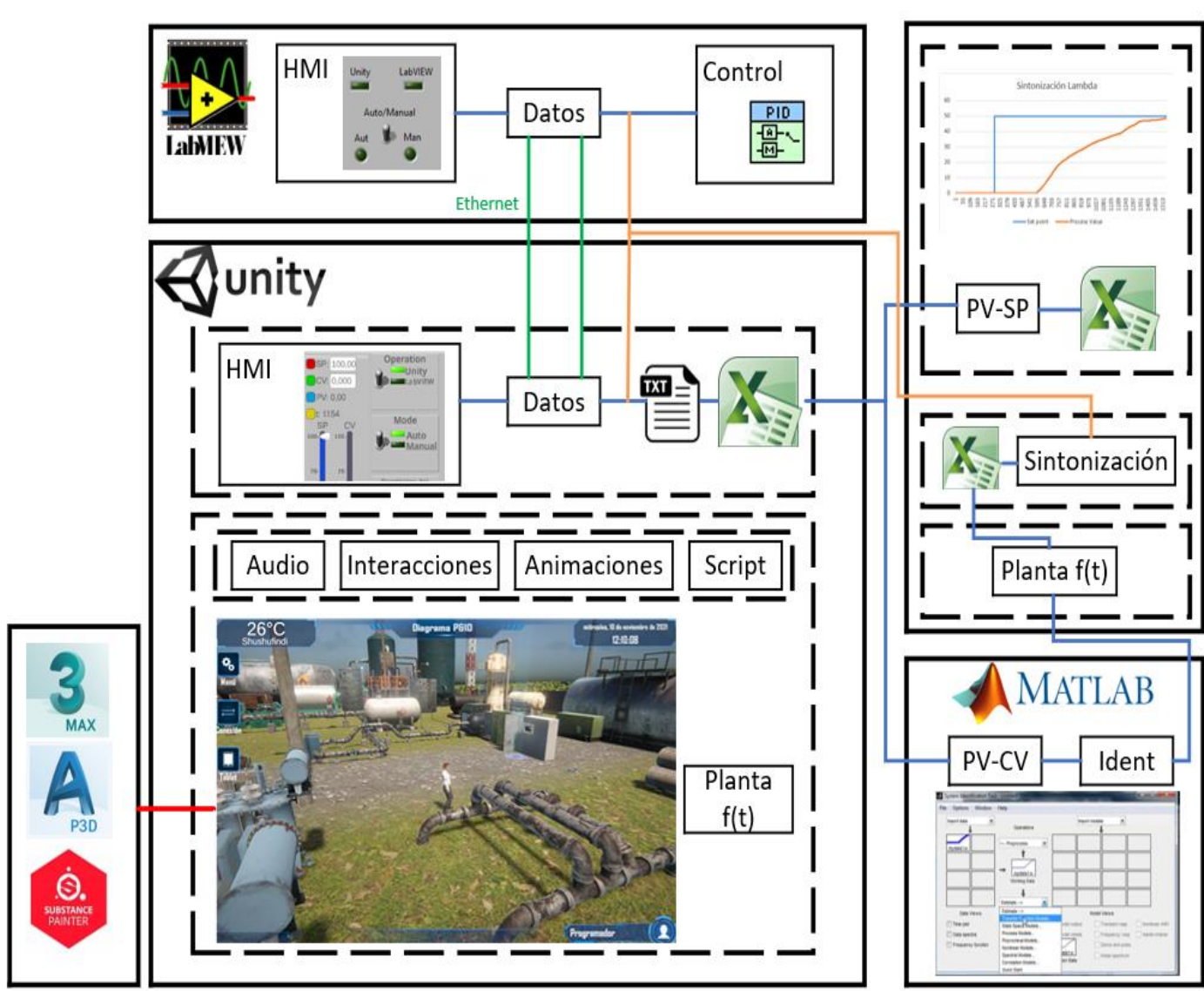


# Entorno virtual del proyecto

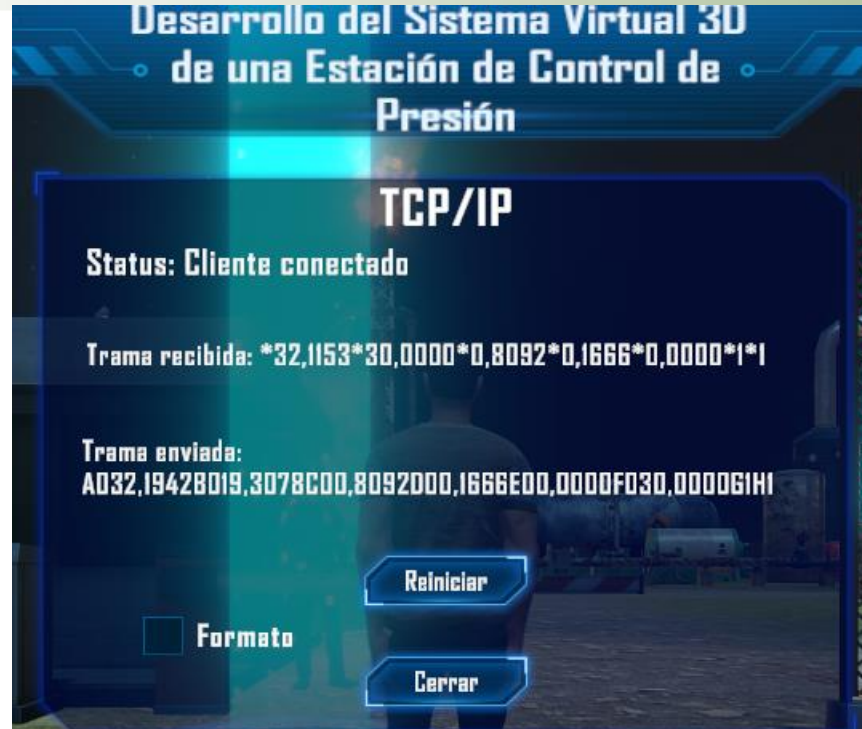




# Arquitectura del Proyecto



# Comunicación




PRESENTACIÓN | INTRODUCCIÓN | P&ID | OPERACIÓN | DATOS

## TRAMAS DE TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN DE DATOS


Dato enviado

\*31,6122\*30,0000\*0,8092\*0,1666\*0,0000\*1\*1

 \* CV \* SP \* KC \* Ti \* Td \* <sup>B</sup>/<sub>U-L</sub> \* <sup>B</sup>/<sub>A-M</sub>

Dato recibido

A031,6148B029,4080C00,8092D00,1666E00,0000F030,0000G1H1

 A CV B PV C KC D Ti E Td F SP G <sup>B</sup>/<sub>U-L</sub> H <sup>B</sup>/<sub>A-M</sub>

# Niveles de usuario del avatar

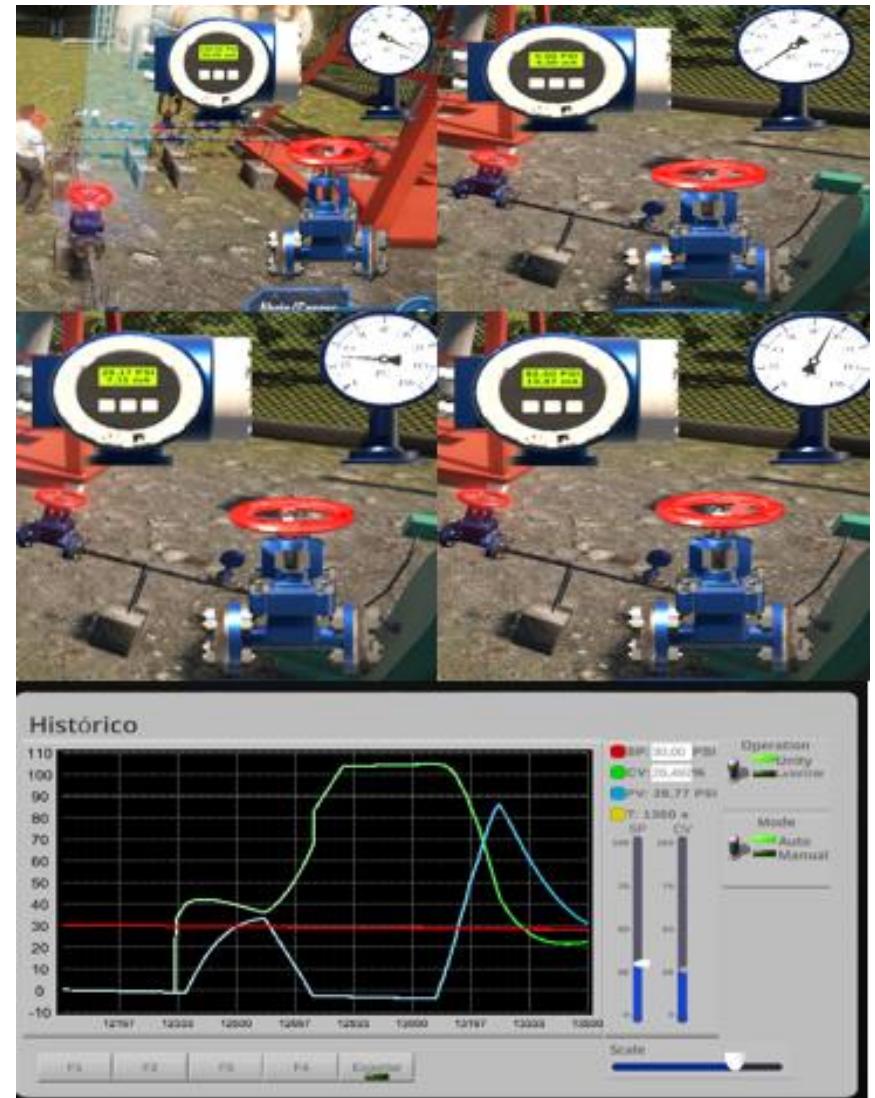
Nivel de usuario/ Funciones	Visualizar Variables	Cambios					Operación (Unity- MATLAB)
		SP	CV	Kp Ti Td	Constantes del Modelo matemático	Control (manual- automático)	
Visitante	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Ingeniero	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✗
Supervisor	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗
Programador	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Figura 56|

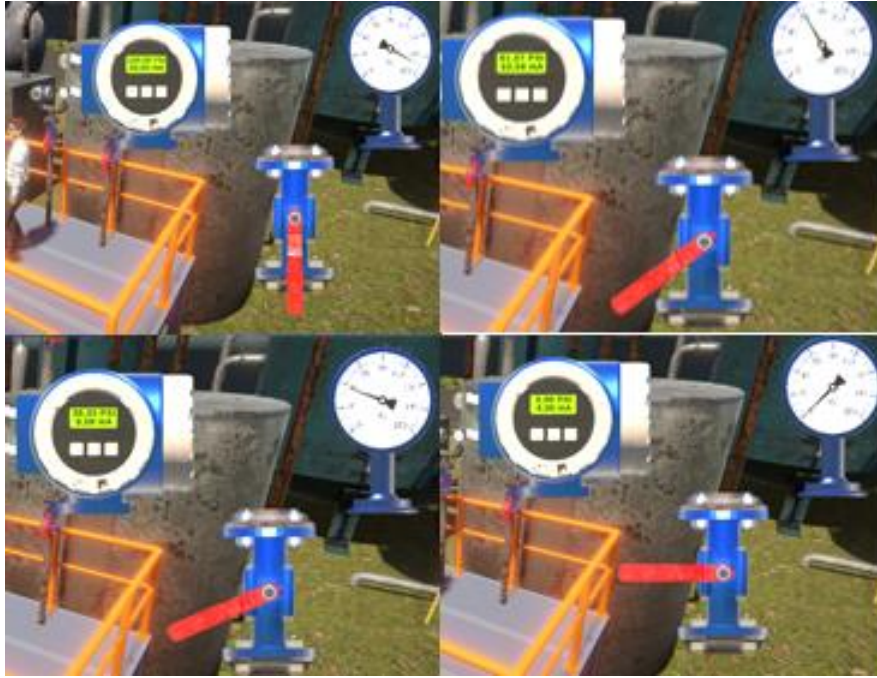
Selección de usuario a ingreso de garita



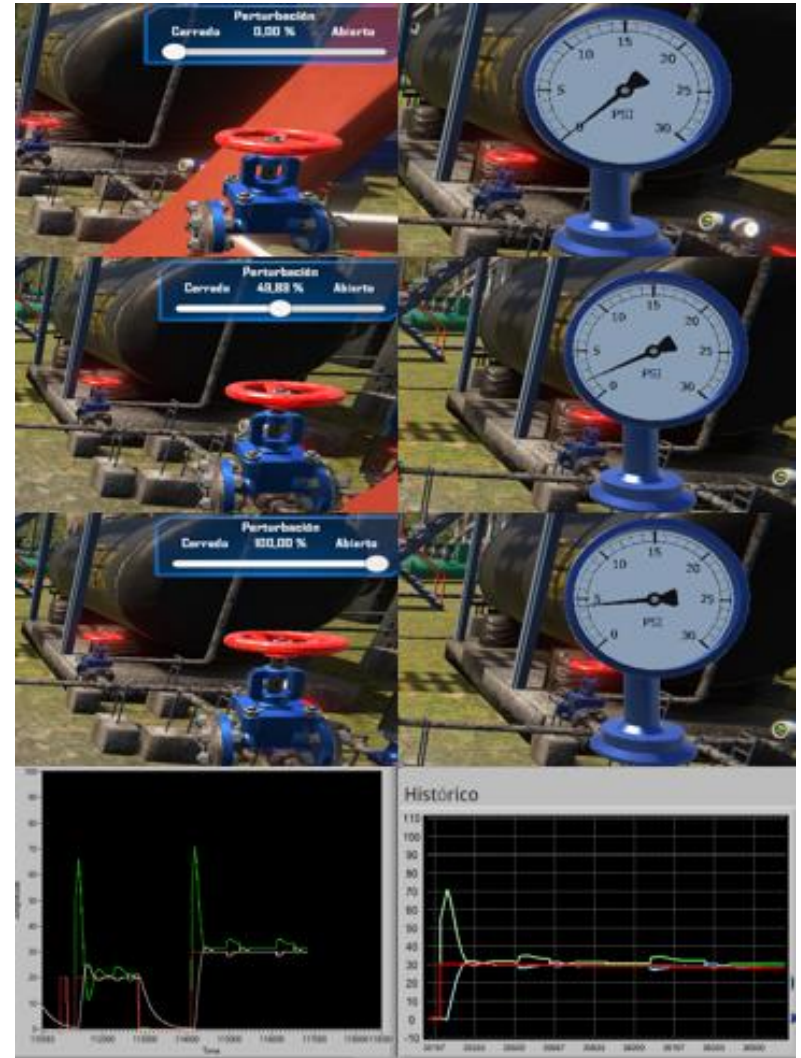
# Animaciones del proyecto



# Animaciones del proyecto



# Animaciones del proyecto



# Modelado matemático

El proceso de presión cumple con la función matemática de primer orden más tiempo muerto por lo que se realiza un análisis a esta función.

$$F(S) = K * \frac{e^{-L*s}}{T * s + 1}$$

Se le aplica un escalón en dominio s

$$G(S) = K * \frac{Cv}{s} * \frac{e^{-L*s}}{T * s + 1}$$

Se saca la inversa de Laplace de la Función

$$f(t) = K * Cv * \left( 1 - e^{-\left(\frac{1}{T}\right)*(t-L)} \right) * u(t - L)$$

# Curvas del modelo matemático

La planta de presión cumple con la ecuación:

$$F(s) = 0.95 * \frac{e^{-3*s}}{10 * s + 1}$$

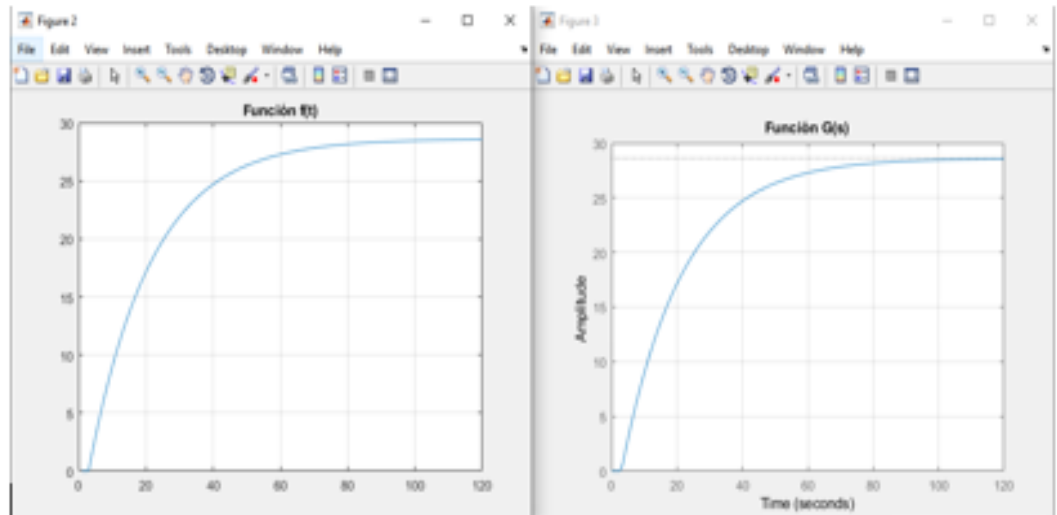
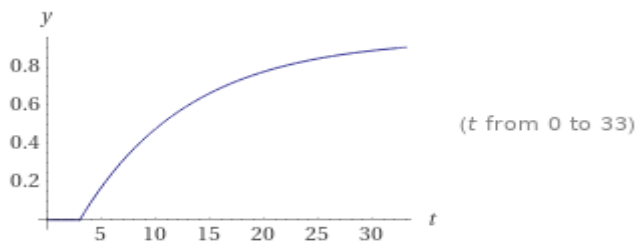
Input

$$\mathcal{L}_s^{-1} \left[ \frac{1}{s} * 0.95 * \frac{\exp(-3 s)}{1 + 10 s} \right] (t)$$

Result

$$0.95 (1 - e^{(3-t)/10}) \theta(t - 3)$$

Plots





# Validación del modelo matemático

Allen-Bradley PanelView Plus 600

Modelo Matemático

$$F(s) = \frac{0,95}{1 + (10 * s)} * e^{(3 * s)}$$

Constantes del Controlador

Kc: 0,4791  
Ti: 0,1014  
Td: 0

F1 F2 F3 F4 Exportar

Allen-Bradley PanelView Plus 600

Histórico

326 valores

F1 F2 F3 F4 Exportar

Datos Modelo Matematico N-P.xlsx - Excel

Archivo Inicio Insertar Diseño de pá Fórmulas Datos Revisar Vista Desarrollado Complemen Nitro Pro 10 Indicar... Compartir

Importar archivo de texto

Organizar Nueva carpeta

Nombre	SP; CV; PV; Time
Datos.txt	0; 0; 0; 0,0100993
Datos_Planta Nivel_24-11-2021 19_39_59.L...	7; 13; 38; 564
Datos_Planta Presión_24-11-2021 21_08_5...	7; 13; 38; 676
Datos_Planta S1 Coheen Coon PL_25-11-2...	0; 0; 0; 0,0100422
Datos_Planta S1 Zeegler y N PI_25-11-202...	7; 13; 38; 715
Datos_Planta S2 Ziegler y N PID_25-11-202...	0; 0; 0; 0,0099855
Datos_Planta_25-11-2021 18_55_51.txt	03; 13; 38; 946
	0; 0; 0; 0,0099290
	54; 13; 39; 003
	0; 0; 0; 0,0098171
	06; 13; 39; 107
	0; 0; 0; 0,0097616
	09; 13; 39; 207
	0; 0; 0; 0,0097064
	21; 13; 39; 306
	0; 0; 0; 0,0096515
	48; 13; 39; 407
	88; 13; 39; 506
	0; 0; 0; 0,0095437

Nombre de archivo: Datos\_Planta Presión\_24-11-2021 21 Archivos de texto (\*.prn;\*.txt;\*.\*)

Herramientas Importar Cancelar

System Identification - Untitled

File Options Window Help

Import data

Operations

Preprocess

Working Data

Estimate

To Workspace To LTI Viewer

Data Views

Time plot Data spectra Frequency function

Data Format for Signals: Time-Domain Signals

Workspace Variable

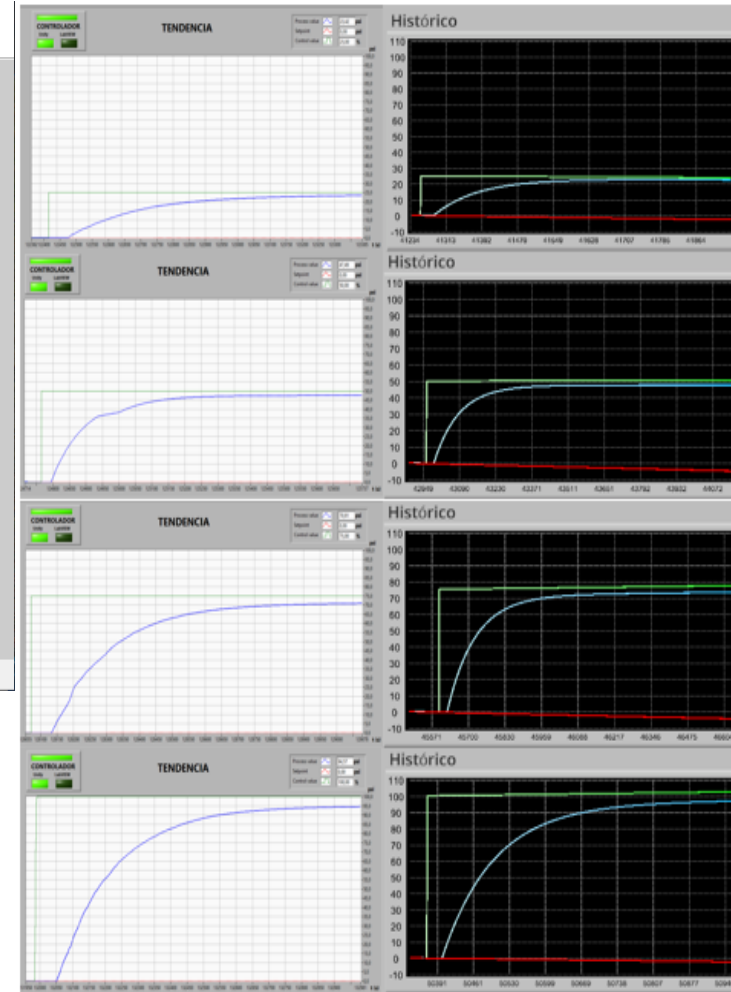
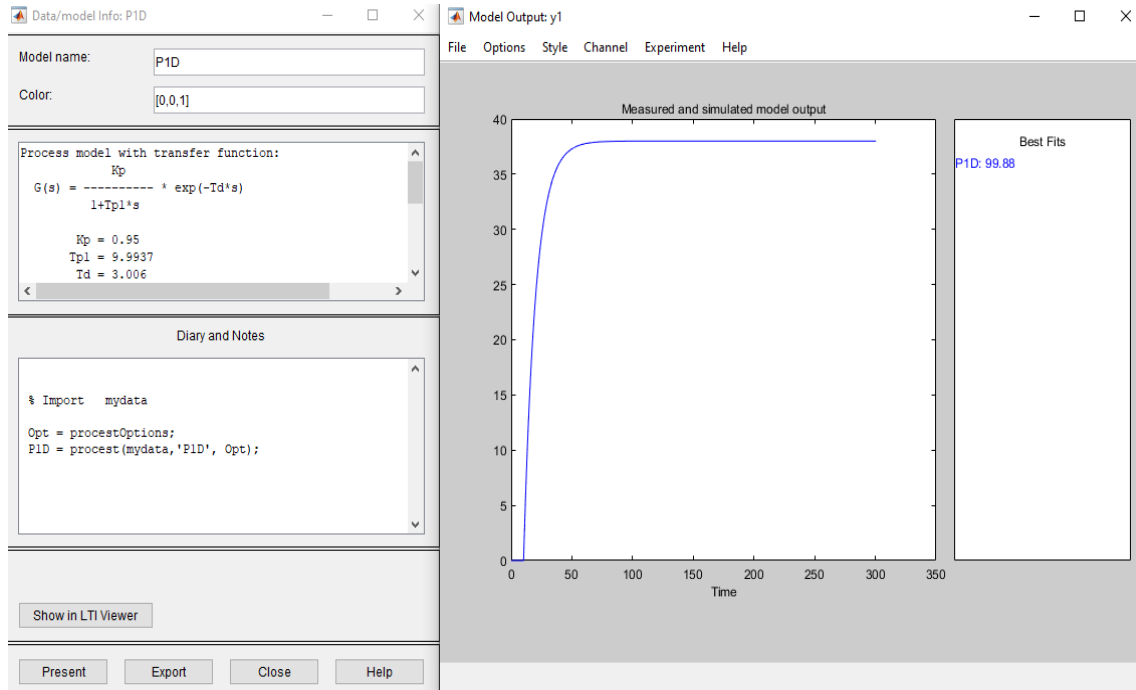
Input: CV Output: PV

Data Information

Data name: Dato30 Starting time: 0 Sample time: 0.1

Import Reset Close Help

# Validación del modelo matemático



$$F(S) = 0.95 * \frac{e^{-3*s}}{10 * s + 1}$$

$$F(S) = 0.95 * \frac{e^{-3.006*s}}{9.9937 * s + 1}$$

# Sintonización de controladores

Las pruebas de sintonización se va a seguir el siguiente proceso:

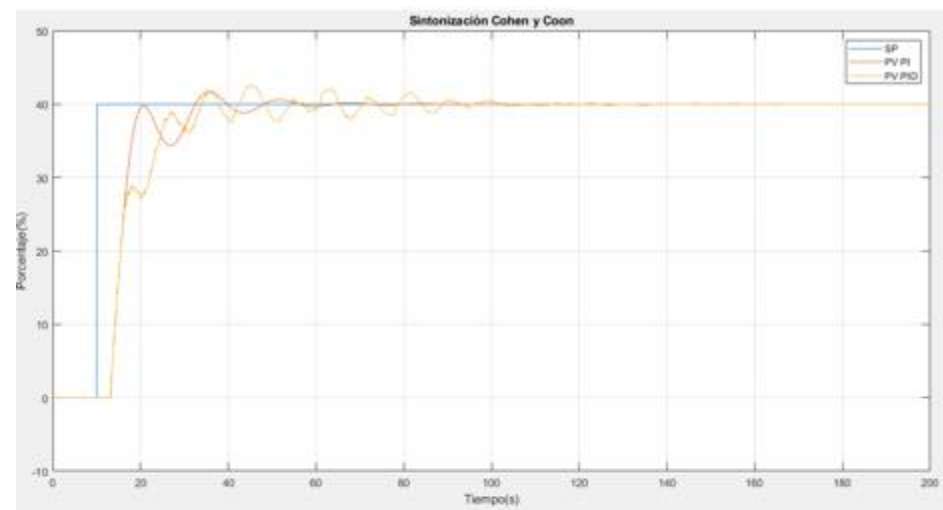
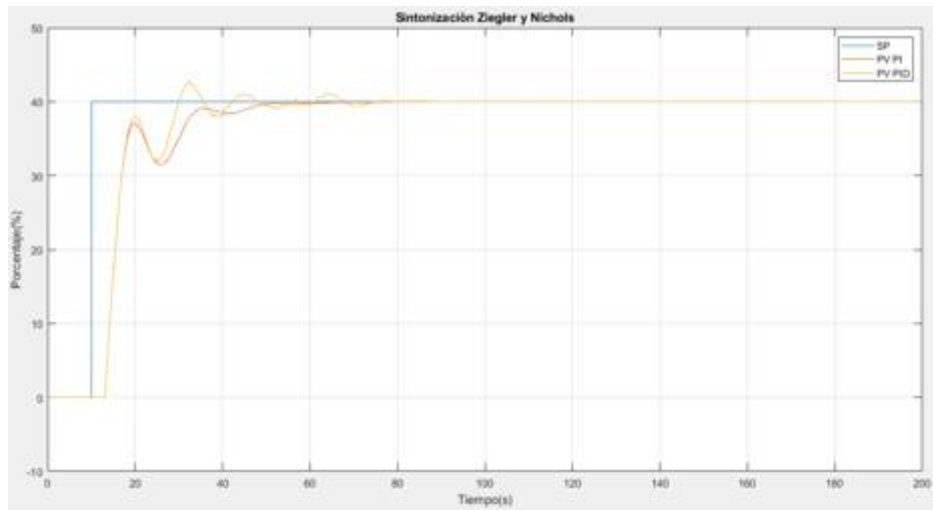
- Control desde Unity.
- Control en modo automático.
- Ingresar las constantes de sintonización  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$ .
- Exportar datos.
- Ingresar después del dato 100 un Set Point fijo en este caso va a ser 40 Psi.
- Finalizar la toma de 2100 datos
- Procesar los datos
- Copiar a MATLAB los vectores de PV, SP y añadir un vector de tiempo T, para Graficar las curvas

# Sintonización de controladores

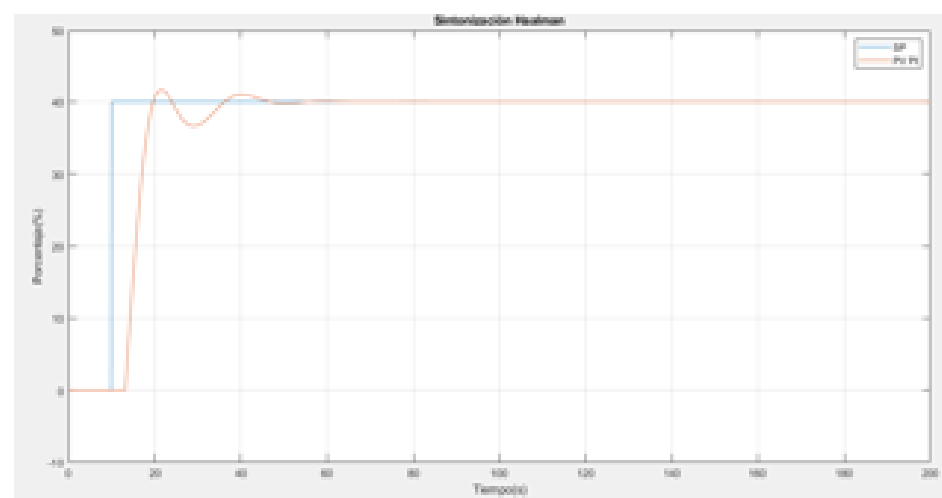
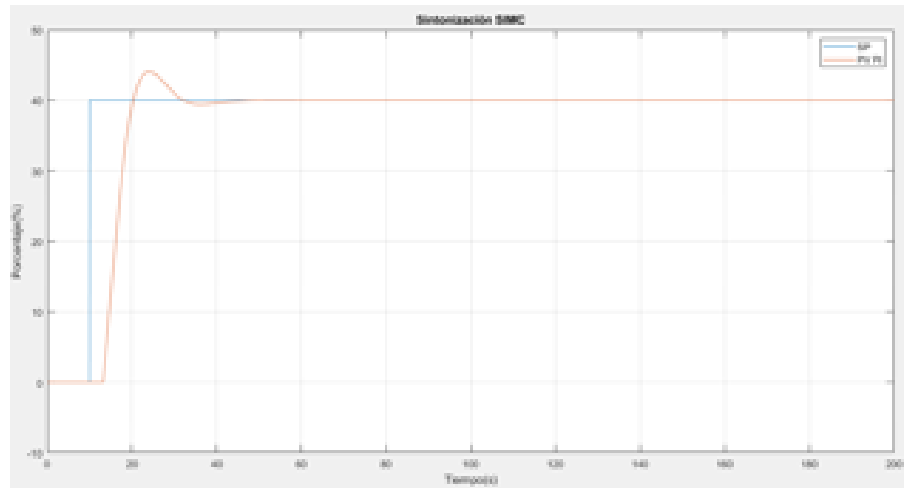
Las pruebas de sintonización se va a seguir el siguiente proceso:

- Control desde Unity.
- Control en modo automático.
- Ingresar las constantes de sintonización  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$ .
- Exportar datos.
- Ingresar después del dato 100 un Set Point fijo en este caso va a ser 40 Psi.
- Finalizar la toma de 2100 datos
- Procesar los datos
- Copiar a MATLAB los vectores de PV, SP y añadir un vector de tiempo T, para Graficar las curvas

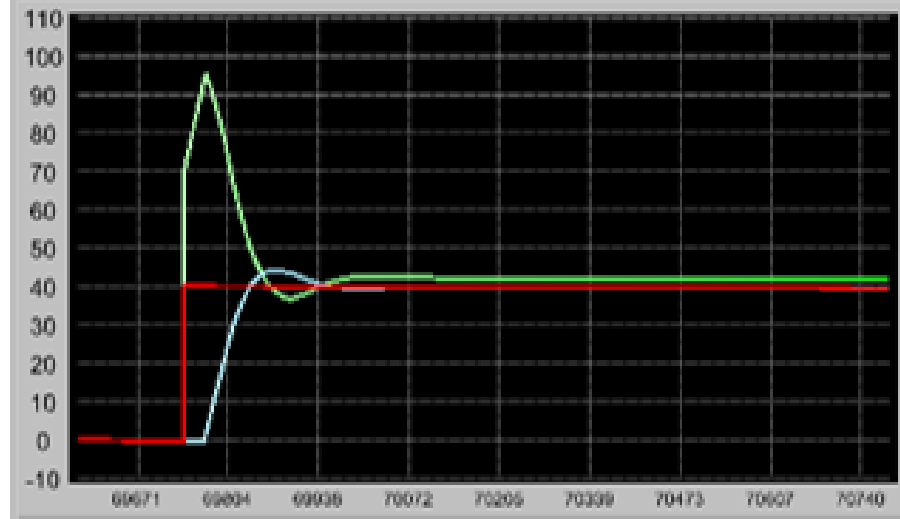
# Sintonización de controladores



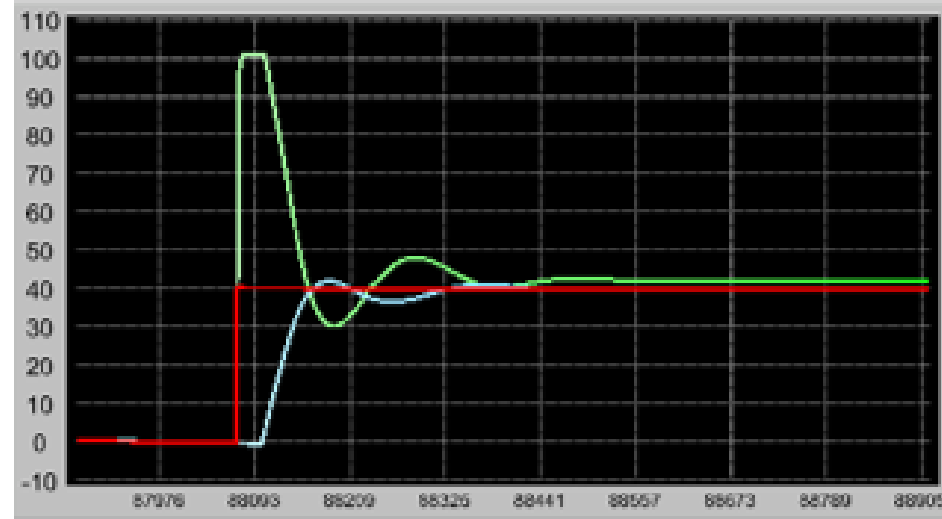
# Sintonización de controladores



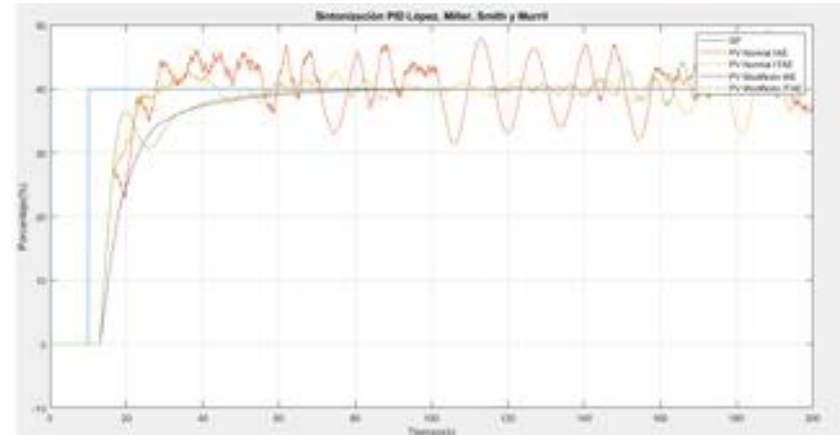
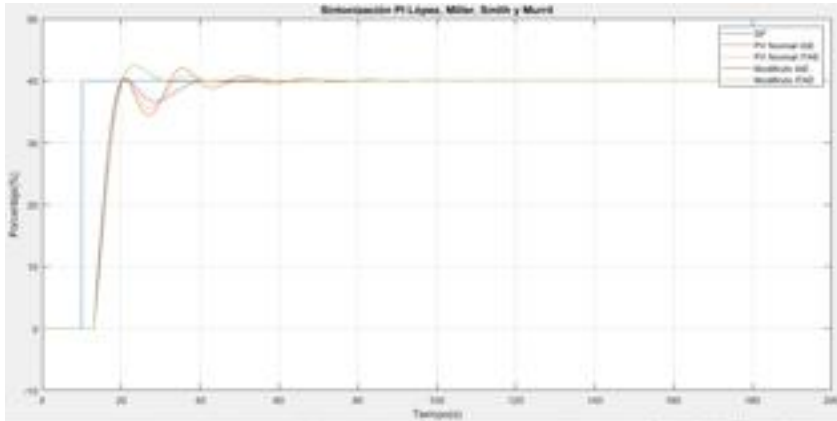
Histórico **PI SIMC**



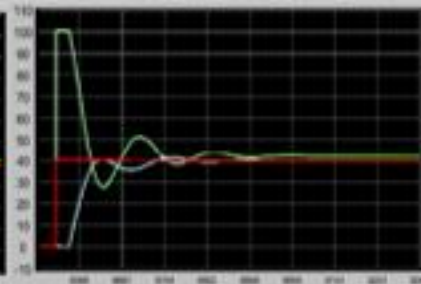
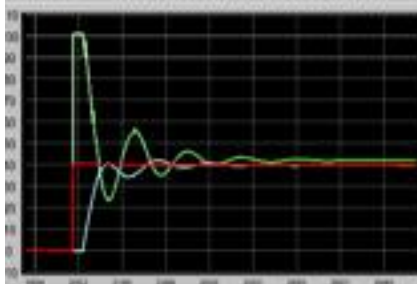
Histórico **PI Haalman**



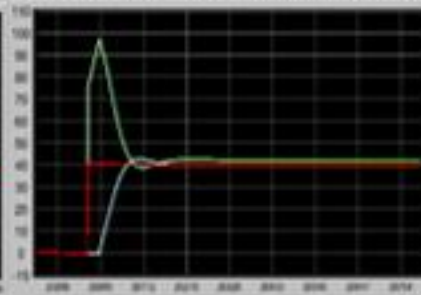
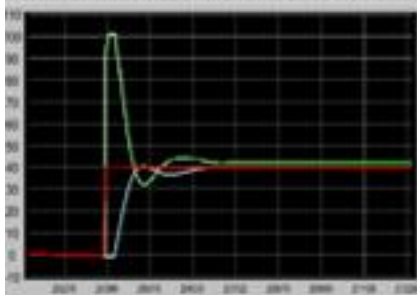
# Sintonización de controladores



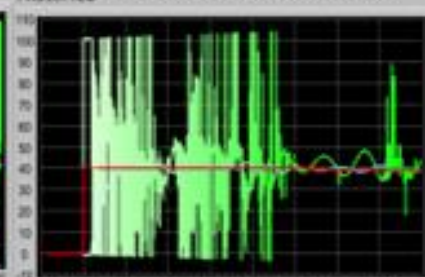
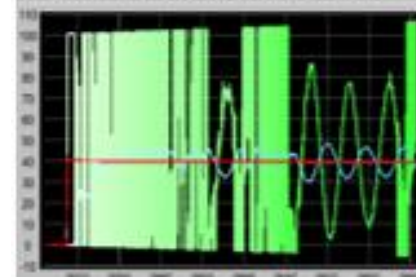
Histórico Normal IAE Miller PI      Histórico Normal ITAE Miller PI



Histórico Modificado IAE Miller PI      Histórico Modificado ITAE Miller PI



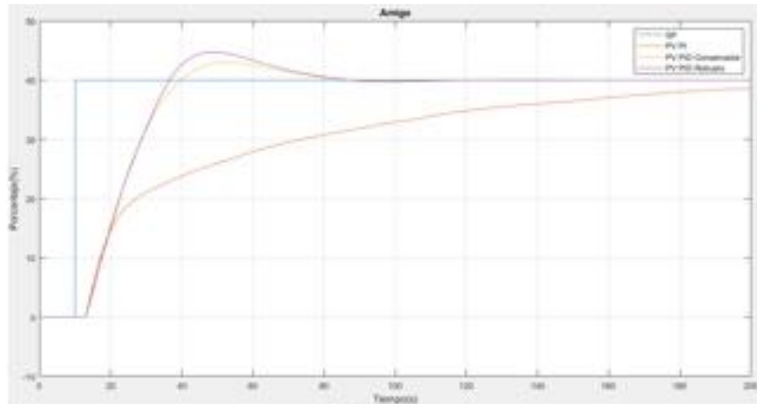
Histórico Normal IAE Miller PID      Histórico Normal ITAE Miller PID



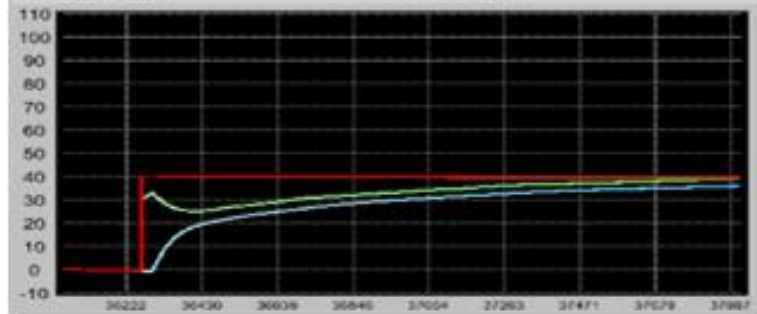
Histórico Modificado IAE Miller PID      Histórico Modificado ITAE Miller PID



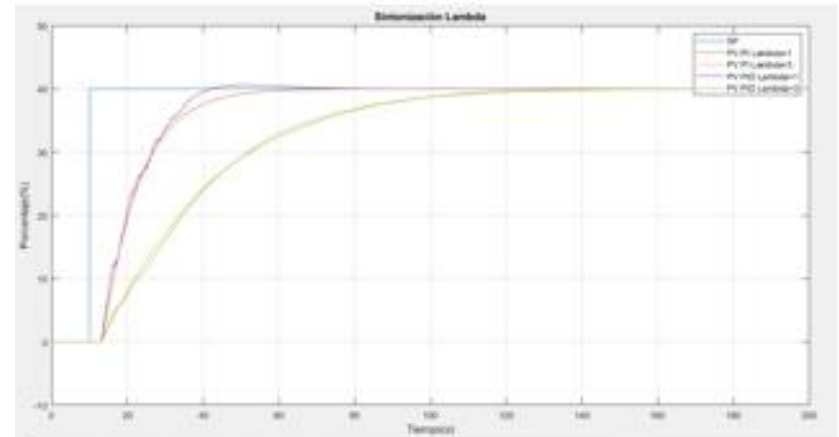
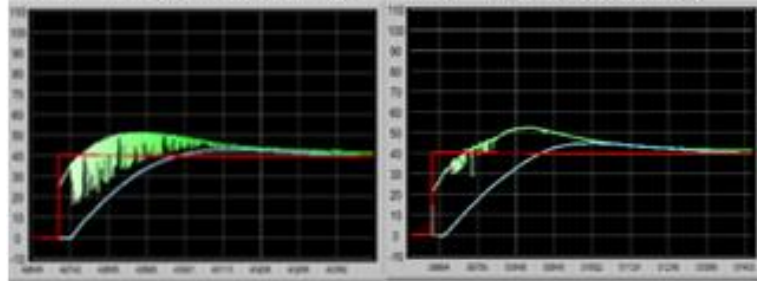
# Sintonización de controladores



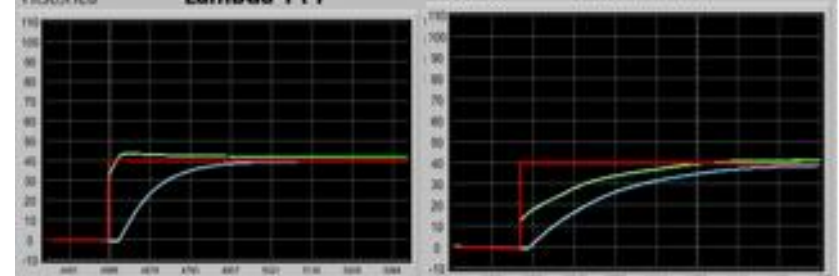
Histórico **PI Amigo**



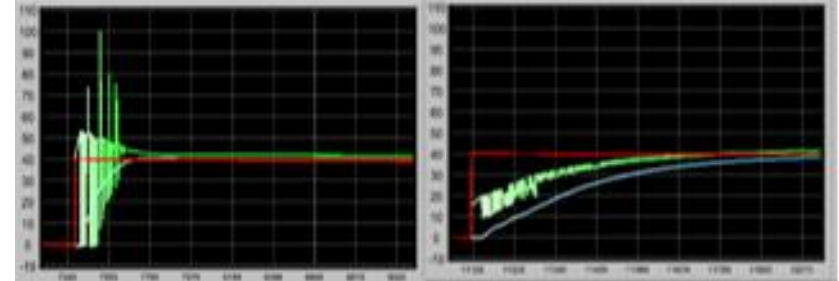
Histórico **PID Conservador Amigo**      Histórico **PID Robusto Amigo**



Histórico **Lambda 1 PI**      Histórico **Lambda 3 PI**



Histórico **Lambda 1 PID**      Histórico **Lambda 3 PID**





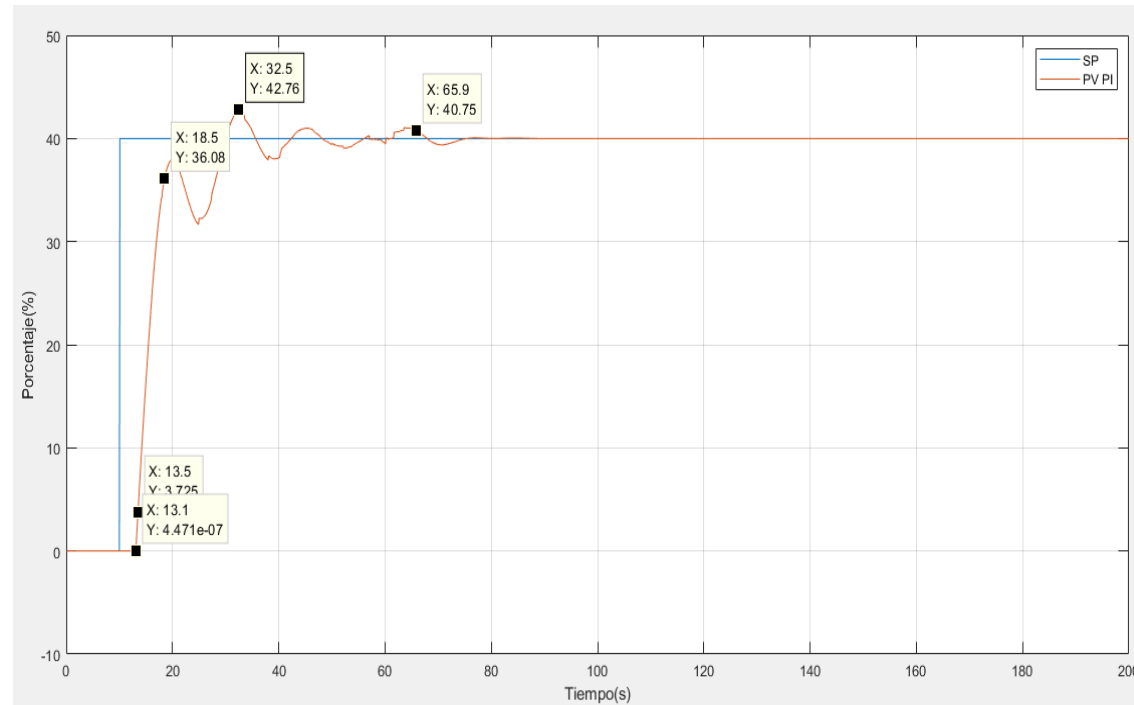
# Sintonización de controladores

El sobre impulso  $M_p$ : en porcentaje, se lo considera desde el valor del set point hasta el pico más alto generado por la curva.

$$M_p = \frac{M_p PV - 40}{40} * 100\%$$

El tiempo de asentamiento  $t_s$ : se lo toma dando una histéresis entre el 2% al 5% del valor del set point, de 39.2 psi a 40.8 psi.

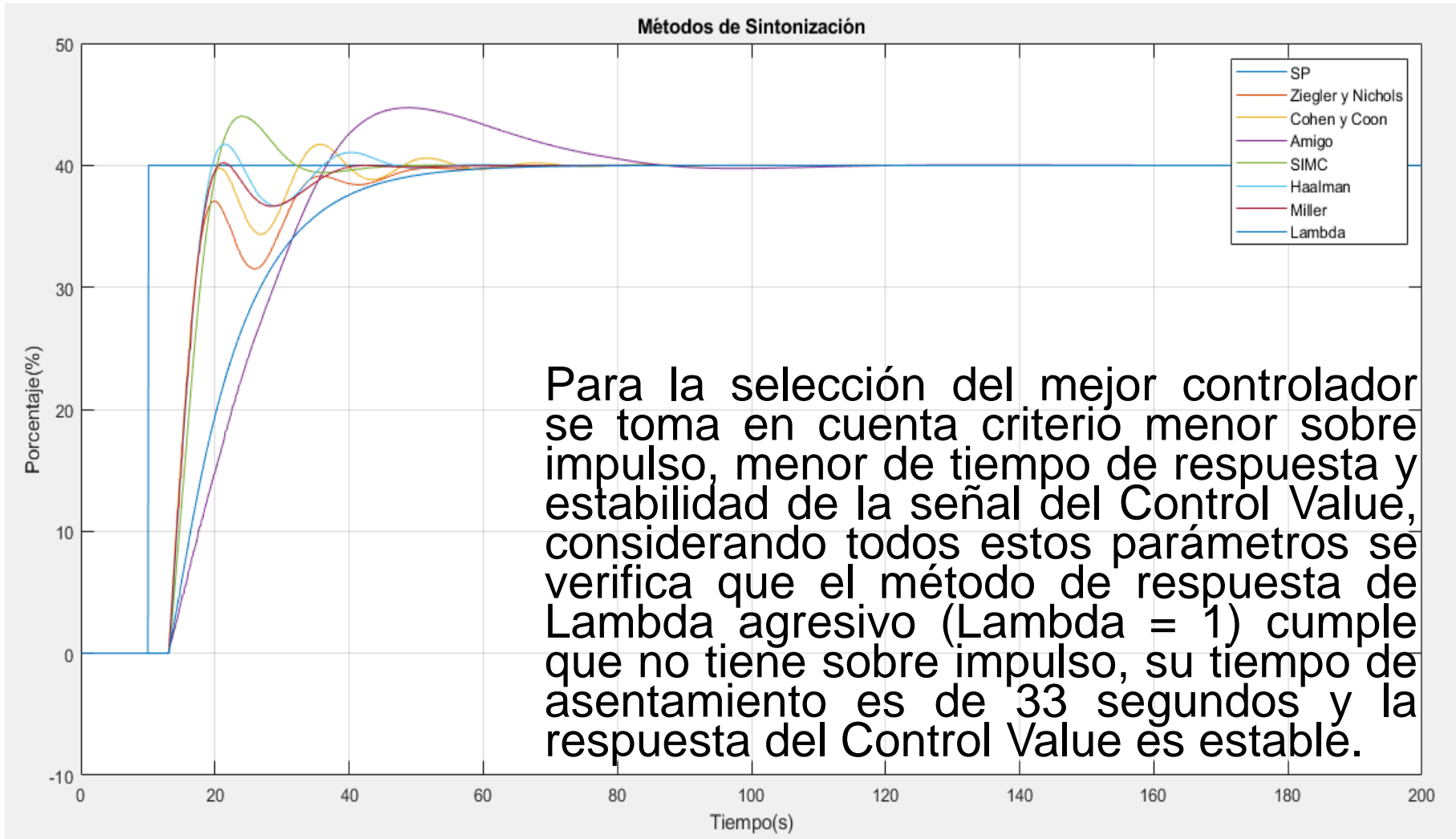
El tiempo de levantamiento  $t_r$ : se lo considera como el tiempo tomado desde el valor del 10% hasta el 90 % del set point, es decir desde 4 psi hasta 36 psi.



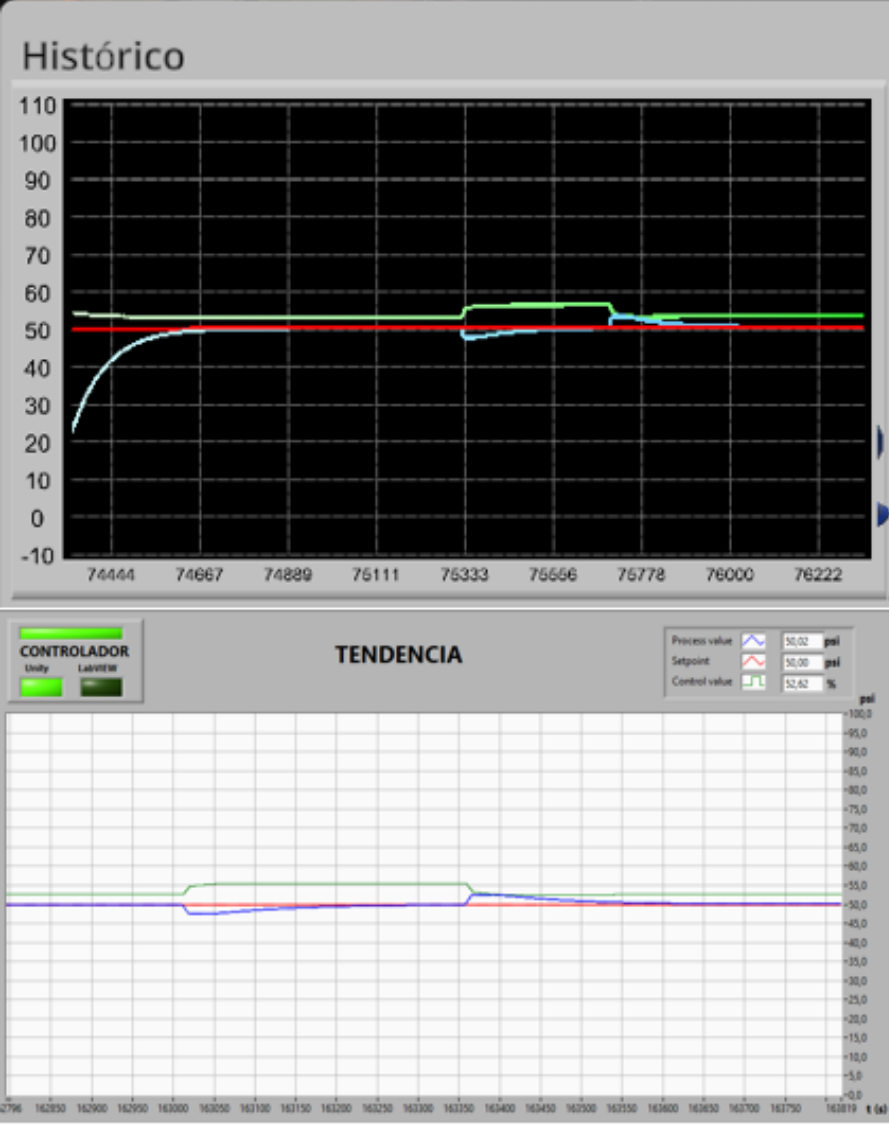
# Selección de controlador

Método de sintonización	Parámetros					Selección
	Tipo de Control	Sobre impulso %Mp	Tiempo de Levantamiento Tr (s)	Tiempo de asentamiento Ts (s)	Estabilidad en CV	
Ziegler y Nichols	PI	-	5,20	33,40	✓	✓
Ziegler y Nichols	PID	6,90%	5,00	52,80	X	X
Cohen y Coon	PI	4,28%	4,90	32,50	✓	✓
Cohen y Coon	PID	6,15%	11,20	74,60	X	X
Amigo	PI	-	126,00	>200	✓	X
Amigo conservador	PID	7,48%	19,40	62,00	X	X
Amigo Robusto	PID	11,80%	18,40	64,00	✓	✓
SIMC	PI	10,05%	5,30	17,10	✓	✓
Haalman	PI	4,32%	4,70	29,40	✓	✓
Miller Normal IAE	PI	4,98%	4,70	32,40	✓	X
Miller Normal ITAE	PI	2,33%	4,80	24,40	✓	X
Miller Modificado IAE	PI	0,47%	4,80	23,70	✓	X
Miller Modificado ITAE	PI	6,08%	5,20	14,60	✓	✓
Lambda Tao=1	PI	-	21,00	37,00	✓	✓
Lambda Tao=3	PI	-	60,40	98,90	✓	X

# Selección de controlador



# Selección de controlador



# Validación de la Hipótesis

La hipótesis propuesta dice: “Es posible sintonizar controladores PI-PID de una estación de control de presión mediante un sistema virtual 3D”.

Como primer punto de la validación de la hipótesis se realizó las pruebas con el modelo matemático de Unity con una eficiencia del 99.88% de lo programado, y al aplicar el método de Sintonía Lambda, se tiene un control sobre la misma, validando de esta forma que el modelo matemático funciona desde Unity y a su vez que si se puede sintonizar controladores desde un sistema virtual 3D.

Como punto final para la validación se aplican varios métodos de sintonía mediante los cuales se controló a la planta de presión unos más eficientes que otros, pero teniendo un resultado final de controladores sintonizados y controlando el proceso de Presión, por lo que la hipótesis es afirmativa y se cumple con la hipótesis de la investigación.

# Conclusiones

- Se implementó un sistema virtual 3D de una estación de Presión, emulando un ambiente petrolero con instrumentación y dispositivos industriales para el control del proceso, el entorno virtual 3D se encuentra programado en Unity y su dinámica de funcionamiento responde a un sistema de primer orden más retardo, característica de los procesos industriales de presión.
- 
- El sistema virtual 3D fue desarrollado en base al diagrama P&ID de un separador bifásico de presión, en el diseño se consideran todos los detalles y características de los instrumentos, tuberías, equipos, etc., lo que proporciona un ambiente virtual con un alto nivel de similitud en la apariencia y funcionamiento, proporcionando al usuario gran nivel de realismo.
- Se validó la función de transferencia del proceso de presión, para ello se generó varios escalones a diferentes valores y se verificó que el modelo matemático cumple con un sistema de primer orden más retardo (autorregulado) y trabaja en el rango de 0 a 100 psi.

# Conclusiones

- La comunicación entre los software Unity 3D y Labview es en tiempo real y sin retardo, esto gracias al uso del protocolo de comunicación Ethernet, que fue verificado en el intercambio de datos entre aplicaciones.
- Se diseñaron varios controladores PI-PID utilizados en el control del proceso presión, mediante los métodos de diseño analítico, estos controladores responden de forma eficiente ante perturbaciones así como presentan estabilidad, y se verifica el funcionamiento correcto tanto del proceso industrial simulado y del controlador.
- Del diseño e implementación de varios algoritmos (PI-PID) se determina que el controlador más eficiente para el sistema de presión es el control PI Lambda agresivo ( $\Lambda = 1$ ), ya que no presenta sobre impulso, su tiempo de asentamiento es de 33 segundos y la respuesta del Control Value es estable.
- El parámetro de sobre impulso es importante tomarlo en cuenta en el diseño de controladores, ya que ello puede activar las alarmas de los sistemas SCADA provocando un funcionamiento incorrecto.

# Recomendaciones

- Para la obtención del modelo matemático con la ayuda del Ident de MATLAB considerar significativamente el tiempo de muestreo para la obtención de datos, ya que de ello depende mucho la función de transferencia que MATLAB entregue.
- Para los datos de  $T_i$  y  $T_d$  que LabVIEW maneja, considerar como punto importante que las unidades son en minutos, al momento de aplicar las fórmulas lo tenemos en segundos y esto puede provocar que el controlador no se sintonice.
- Verificar que los datos de los parámetros PID se carguen de forma correcta en LabVIEW, puede que exista que un dato que no esté cargado y esto provocará que no se sintonice el controlador.



# Recomendaciones

- Tomar en cuenta que la válvula V3 se encuentre abierta ya que si no es así no se puede realizar ninguna prueba de control en el proceso.
- Para poder comparar las curvas de sintonización del controlador se tiene que tener los mismos datos en cuanto al valor del set point y el tiempo en que se da el set point.
- Tomar en cuenta el formato que maneja la computadora de coma o punto decimal, para no tener problemas en la transmisión de datos.