

**CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE CONTROLADORES PID,  
LÓGICA DIFUSA Y REDES NEURONALES DE SISTEMAS  
DISTRIBUIDOS INDUSTRIALES EN EL LABORATORIO DE HIDRÓNICA  
Y NEURÓNICA DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
ESPE LATACUNGA.**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE: INGENIERO EN ELECTROMECAÁNICA**

**AUTOR: PACHECO TACO, DIEGO ERNESTO**

**DIRECTOR: ING. SÁNCHEZ, WILSON**

**2019**



# *Planteamiento del Problema*

El problema radica en que, debido a la variedad de métodos y técnicas de control, y cada una de ellas con sus características, procesos, eficiencia y rendimientos propios, un proceso de tipo industrial puede ser controlado con cada uno de estos, lo cual provocará un comportamiento particular según el controlador que se haya elegido.



# *Objetivo General*

Caracterizar y evaluar los lazos de control PID, lógica difusa y redes neuronales de sistemas distribuidos industriales en el laboratorio de Hidrónica y Neutrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.



# Objetivos Específicos

- Investigar acerca de las características y parámetros de los controladores PID, así como las características de los controladores inteligentes difusos (Fuzzy) y redes neuronales artificiales.
- Diseñar y comparar el desempeño de cada uno de los controladores PID, lógica difusa y redes neuronales respecto a los otros, utilizando para ello una aplicación industrial de control multivariable.
- Establecer las ventajas y desventajas de cada uno de los tipos de controladores usados dentro de un sistema distribuido industrial.



# Hipótesis

Mediante la evaluación del comportamiento de los controladores, se determinará las ventajas y desventajas de los diferentes tipos de control para la optimización y mejora de procesos productivos en sistemas distribuidos industriales.

## Variables de Investigación

**Variable Independiente:** La evaluación del comportamiento de los controladores PID, lógica difusa y redes neuronales.

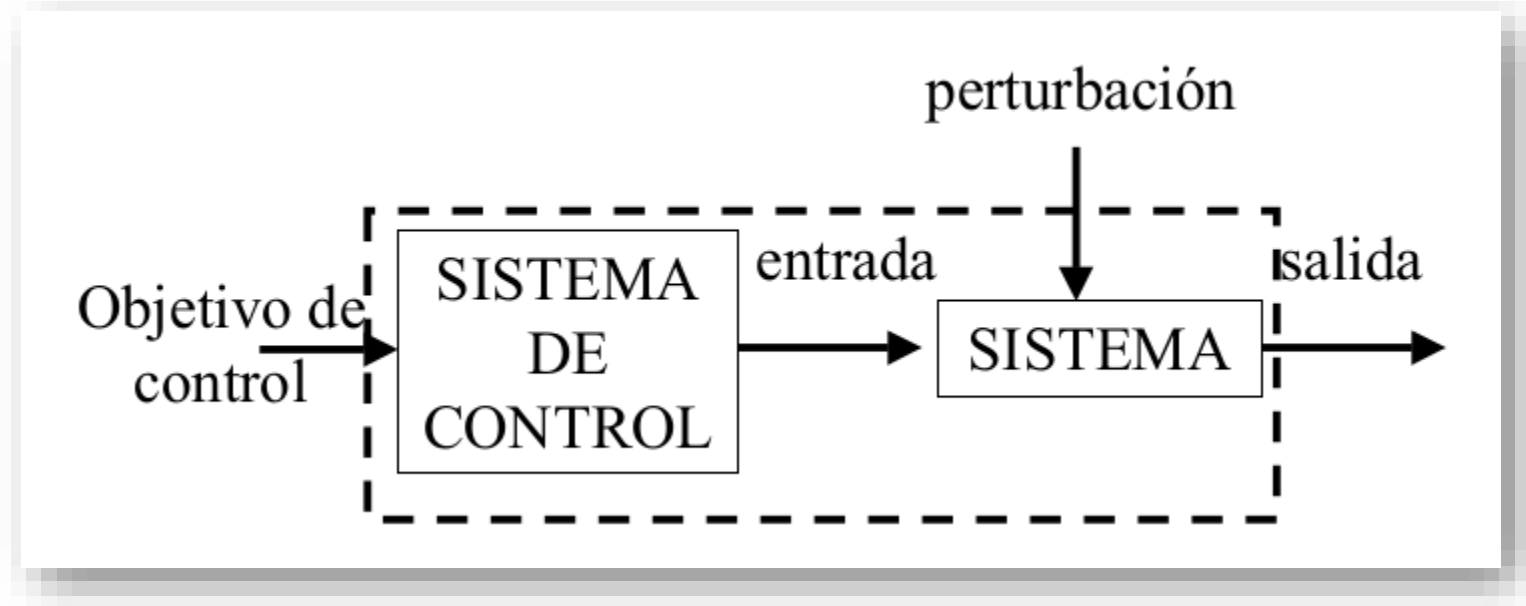
**Variable dependiente:** Optimización y mejora de procesos productivos en sistemas distribuidos industriales.

.



# Introducción

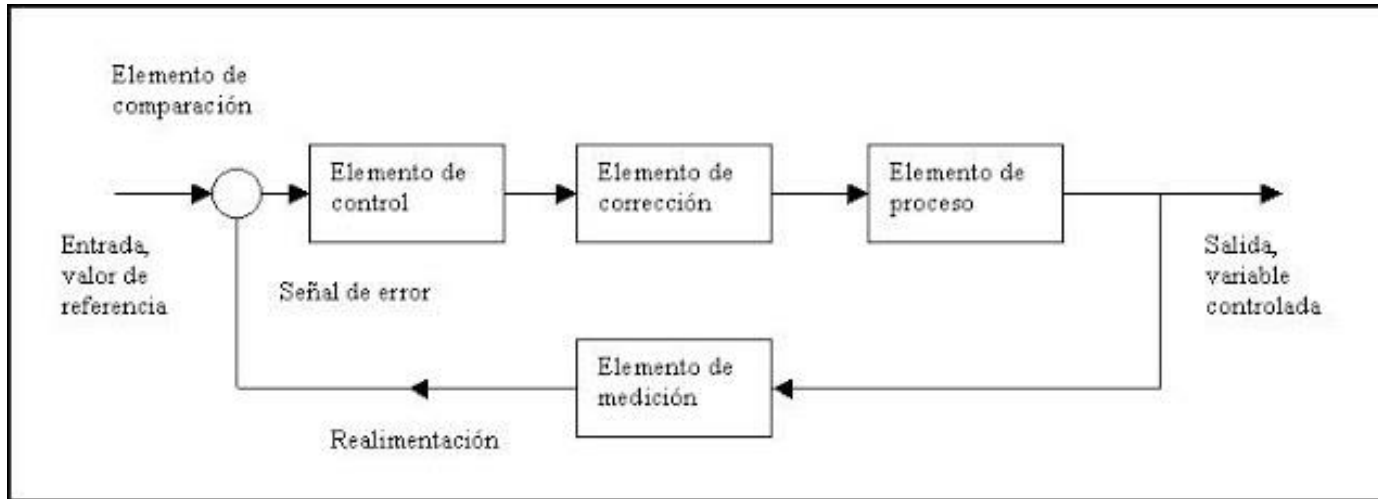
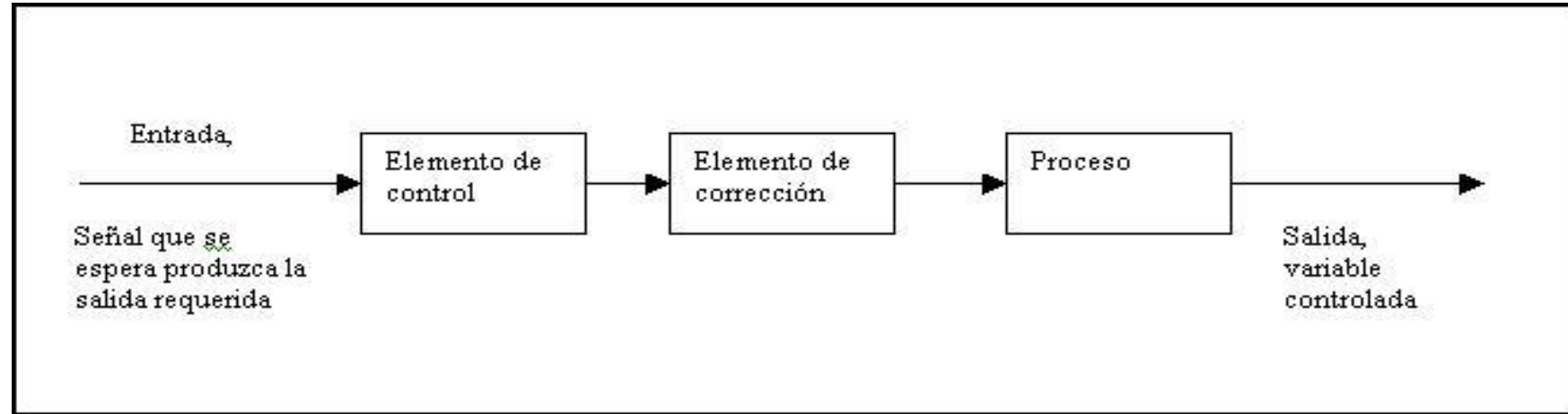
## Sistema de Control



# Introducción

## Sistemas abiertos y cerrados

### Lazo abierto

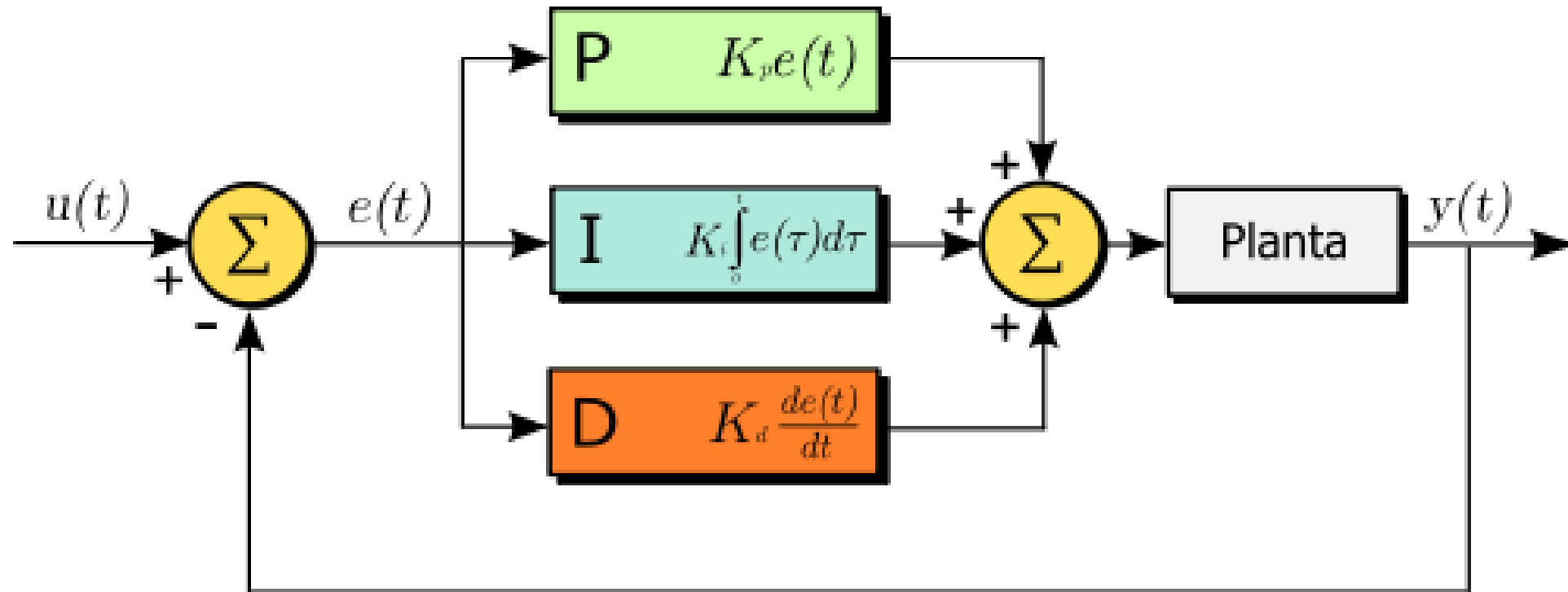


### Lazo cerrado



# Introducción

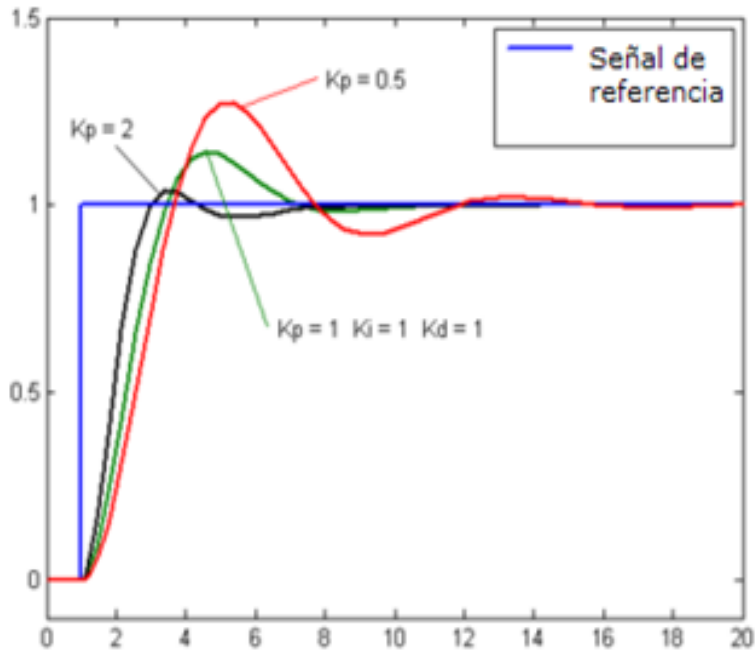
## Control PID



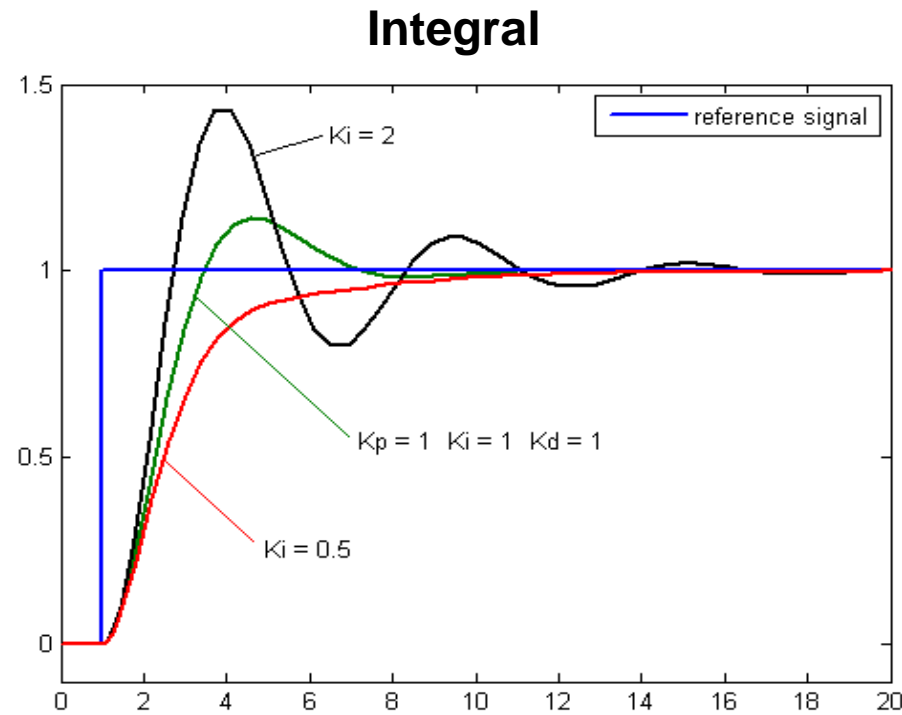


# Introducción

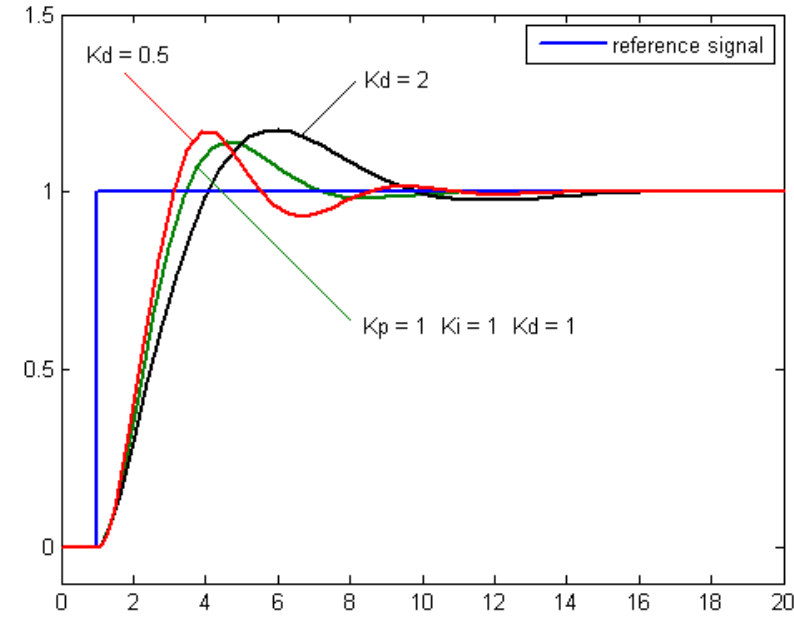
## Acciones de un control PID



Proporcional



Integral



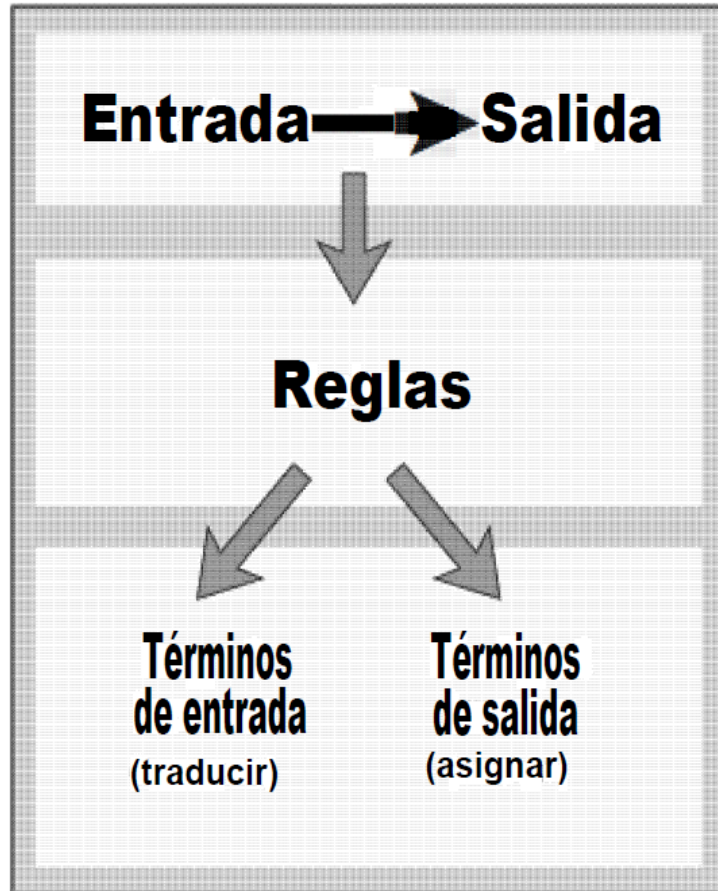
Derivativo



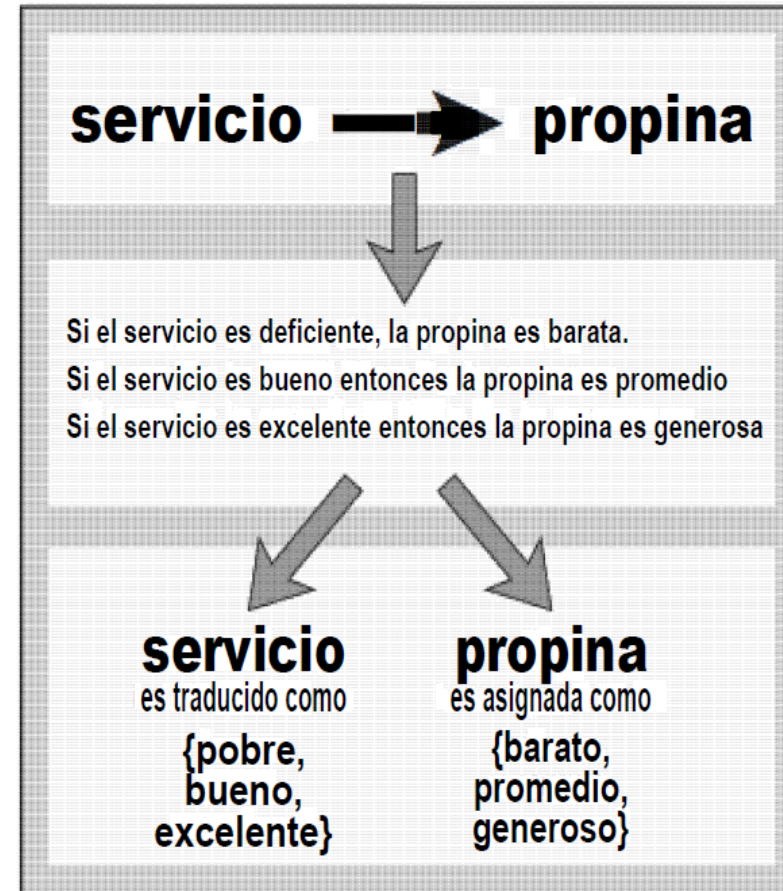
# Introducción

Lógica Difusa

## El Caso General

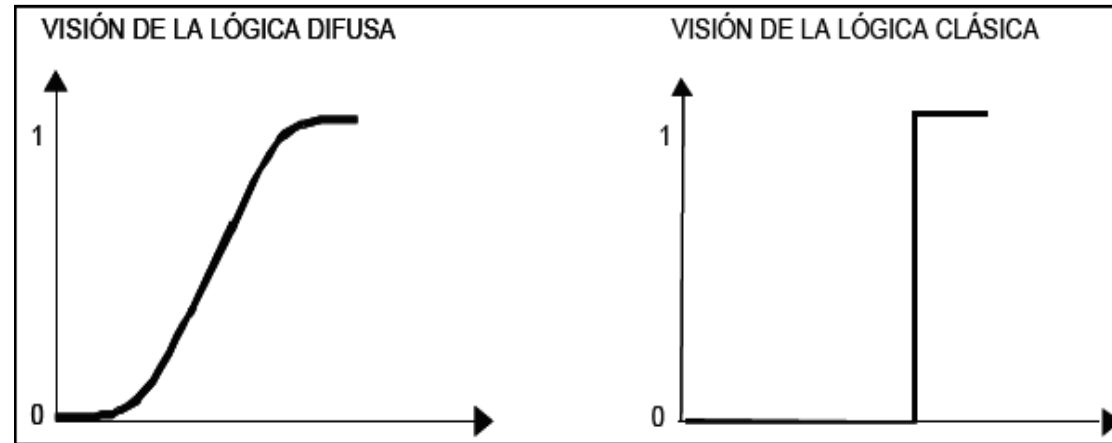
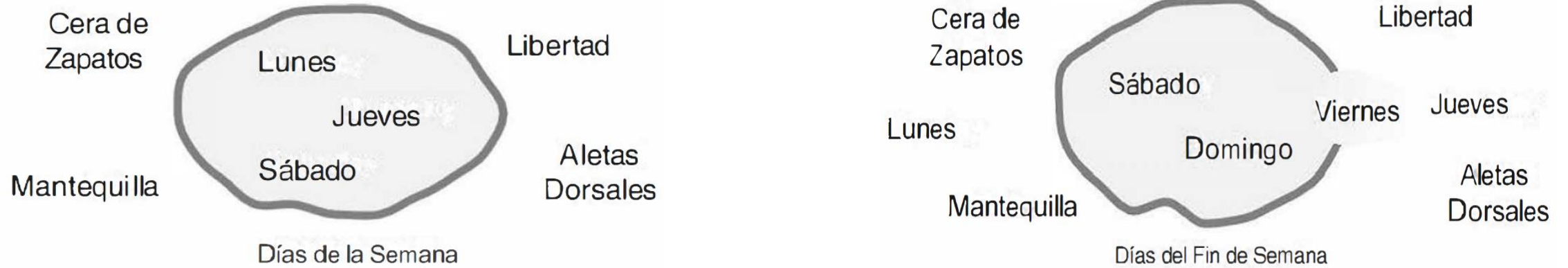


## Un ejemplo específico



# Introducción

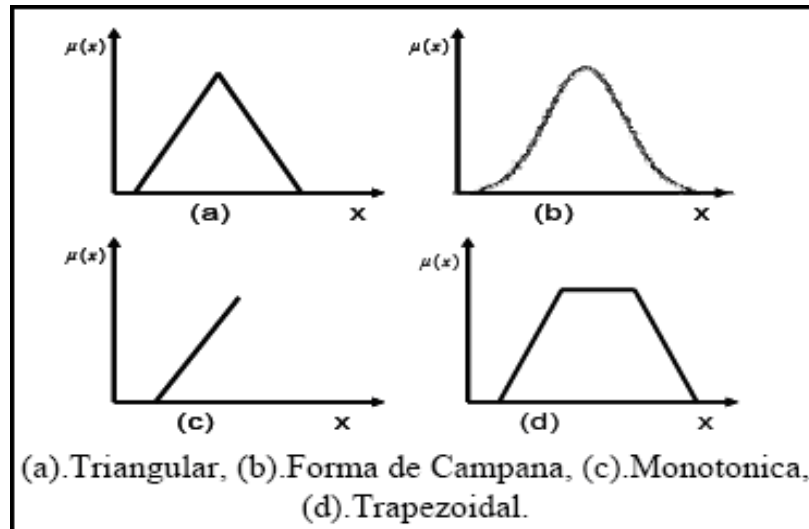
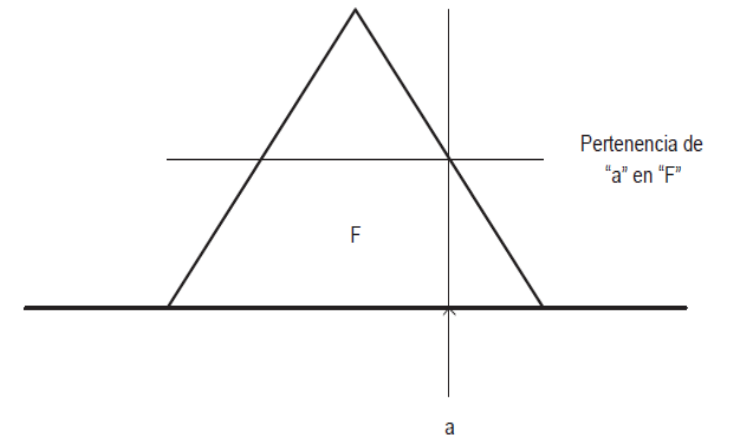
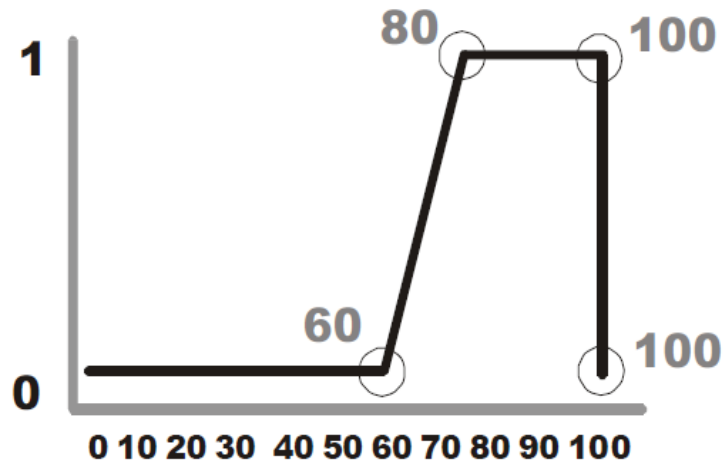
## Conjuntos Difusos



# Introducción

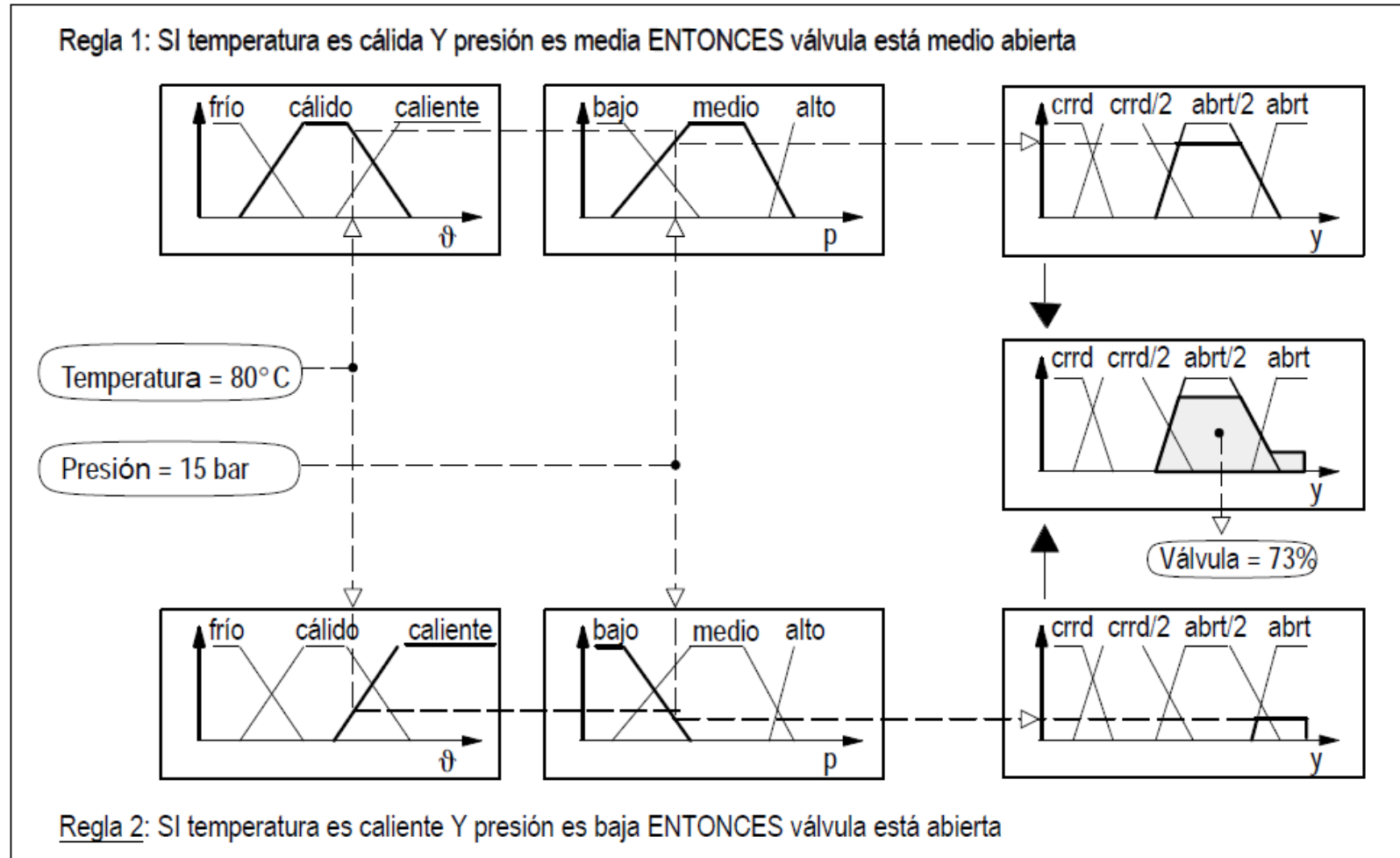
## Funciones de membresía

### Variable lingüística CALIENTE



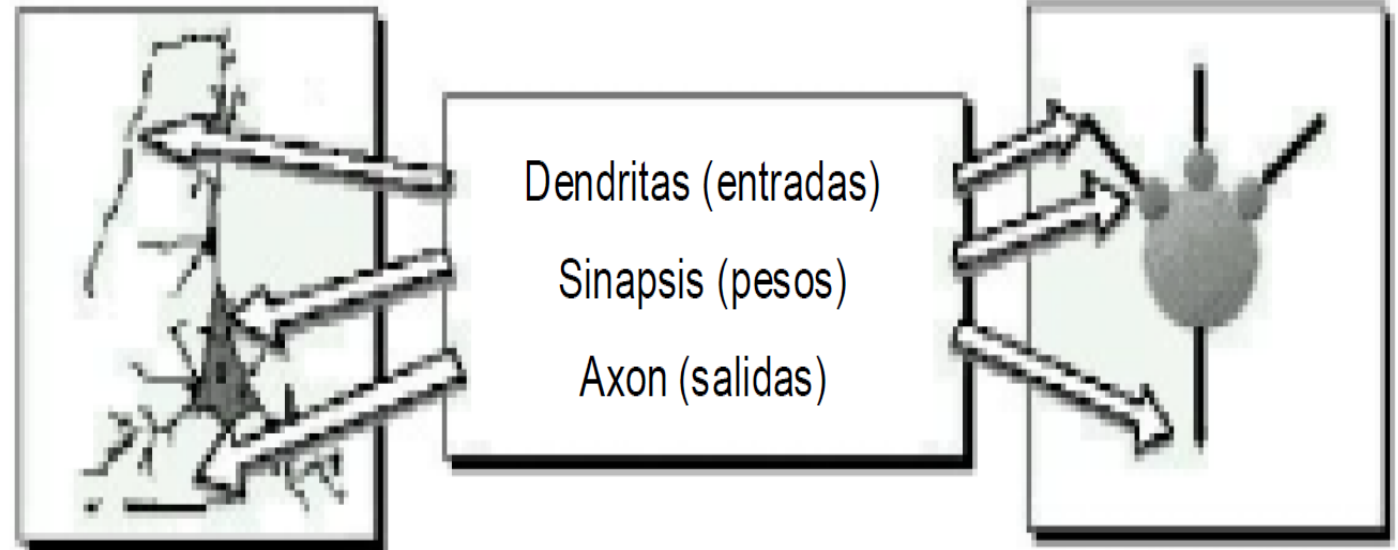
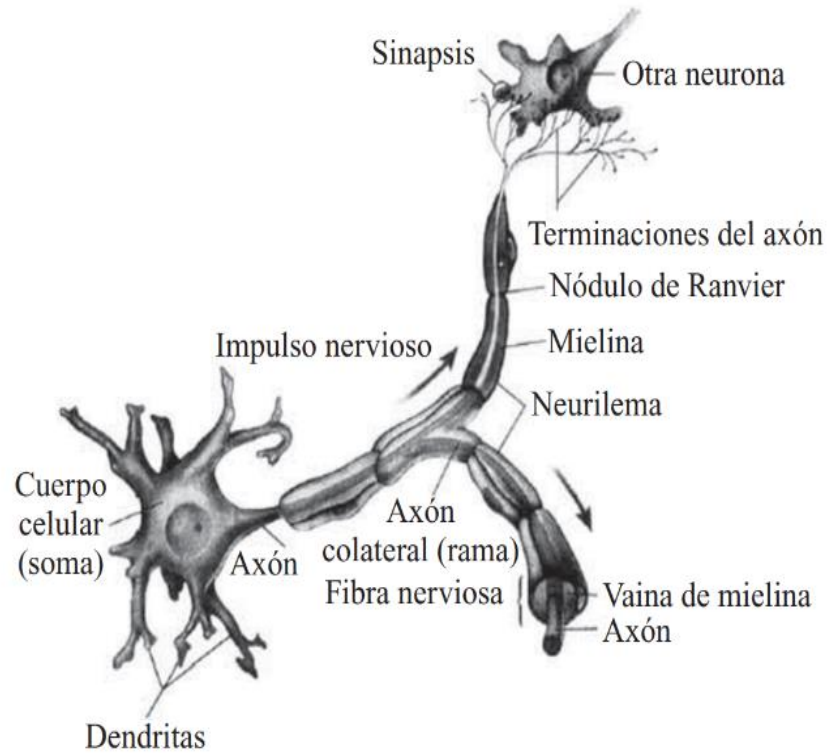
# Introducción

## Inferencia Difusa



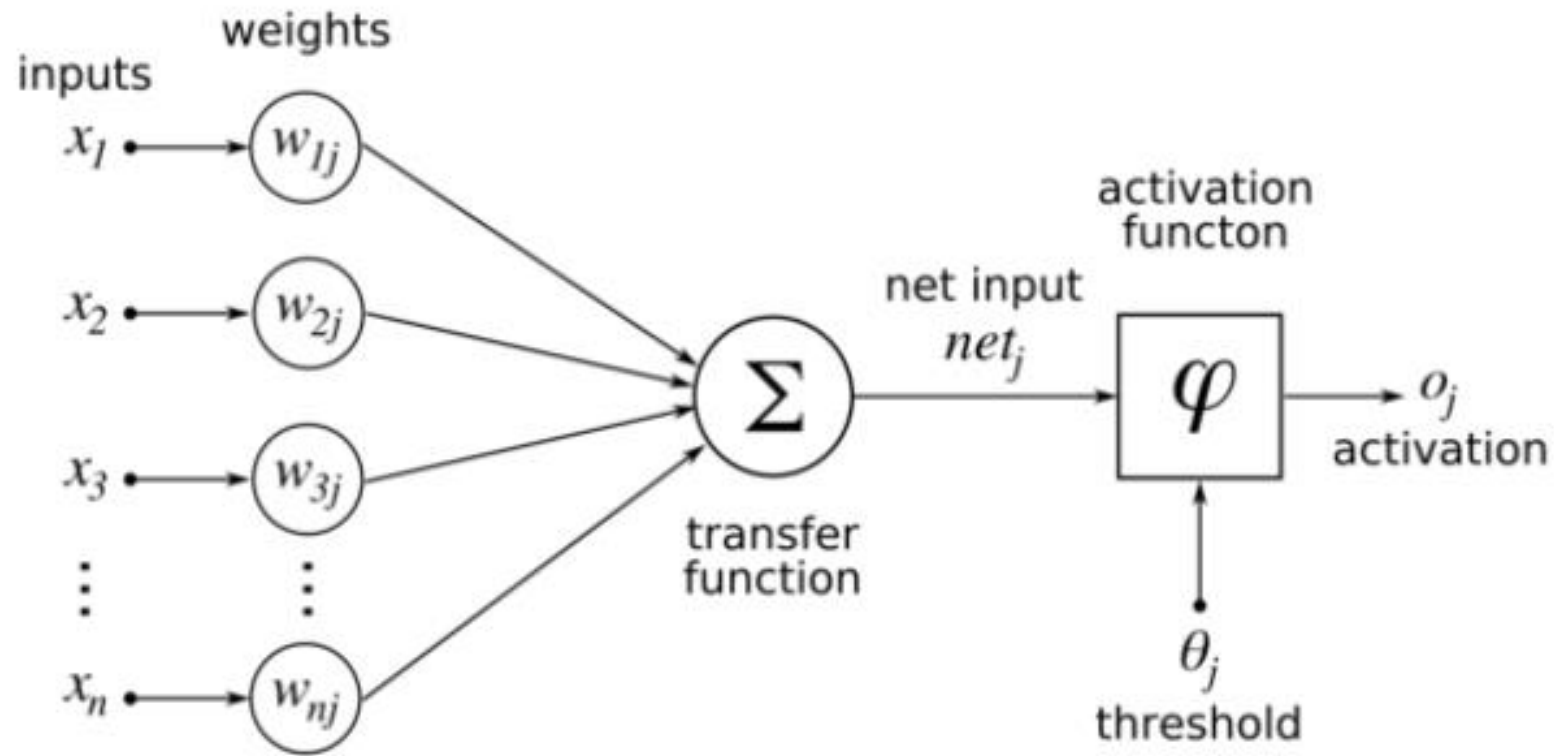
# Introducción

## Redes Neuronales



# Introducción

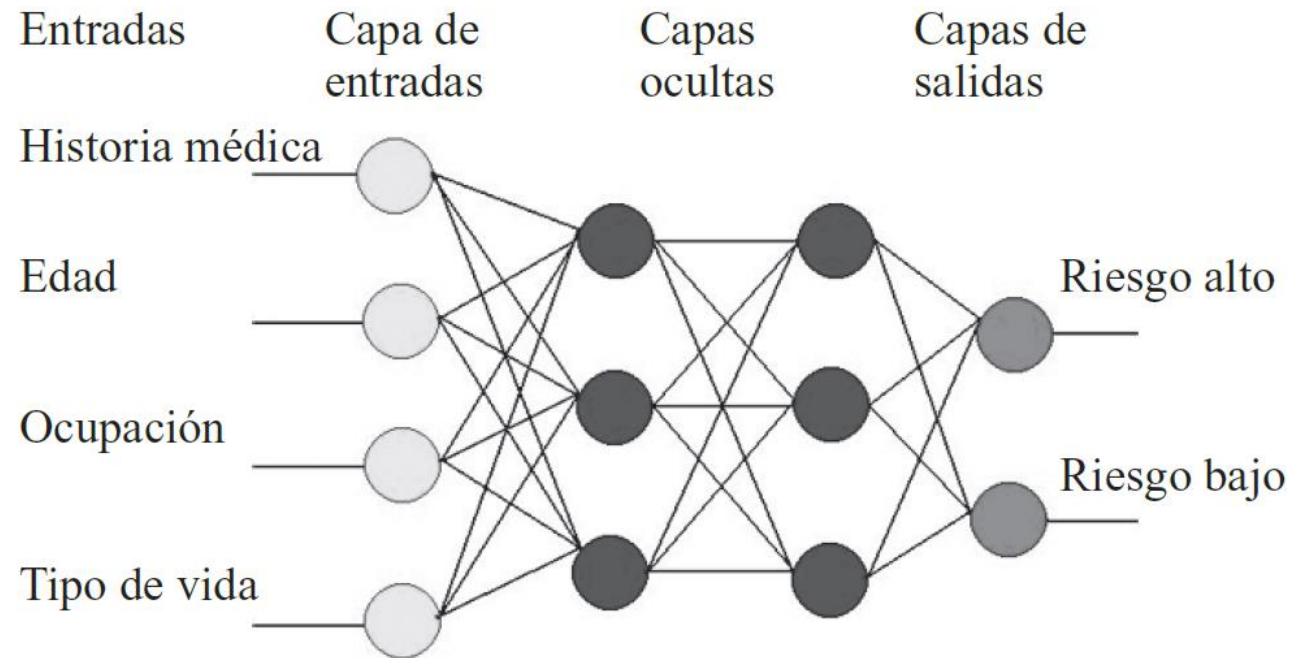
## Redes Neuronales





# Introducción

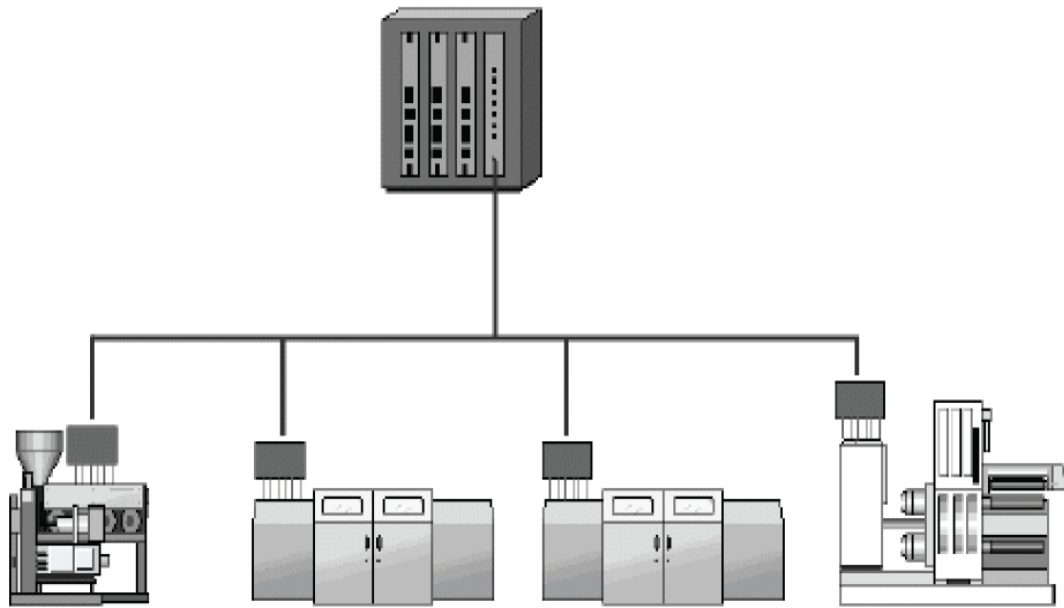
## Redes Neuronales Multicapa





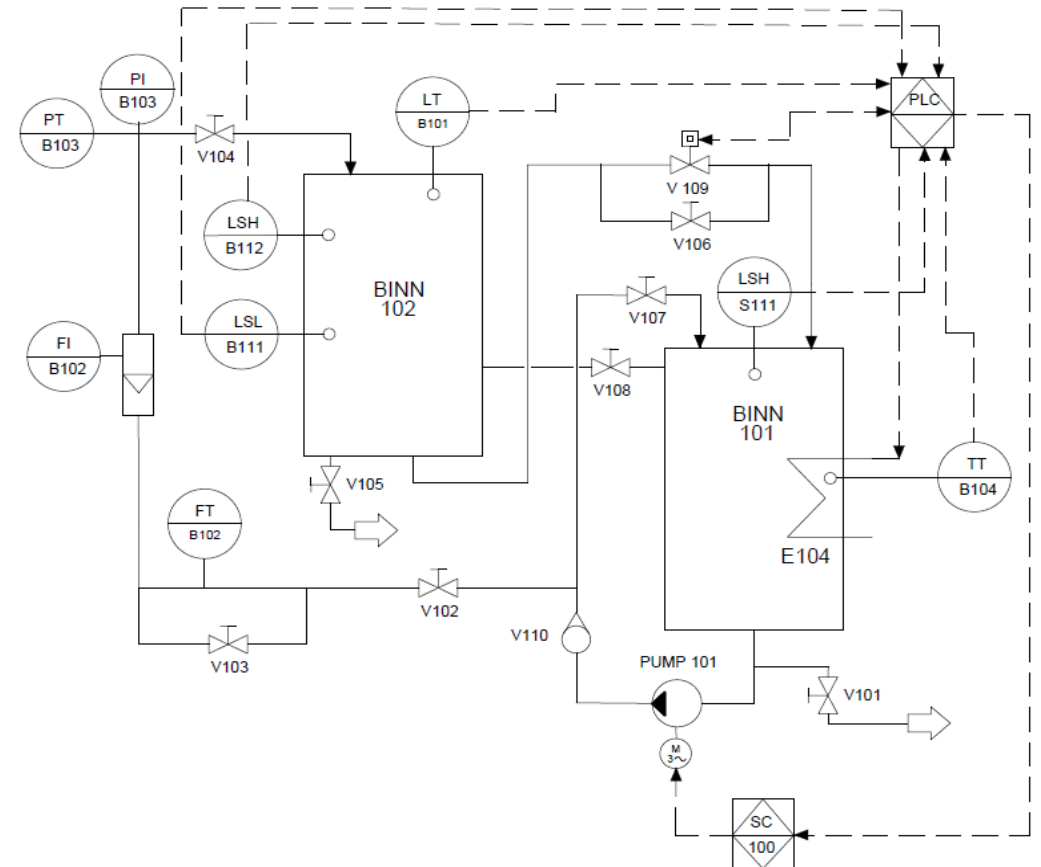
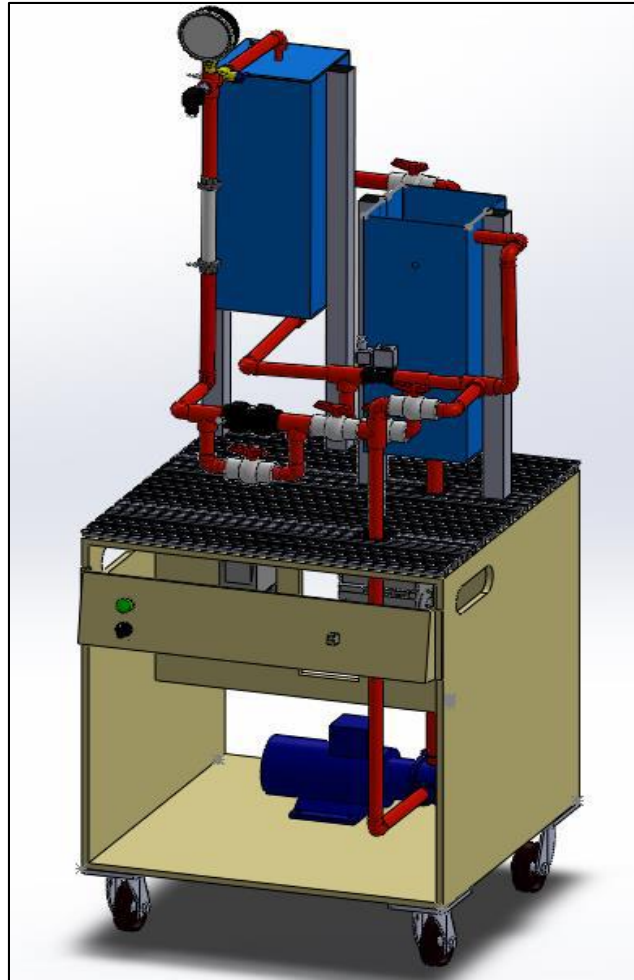
# Introducción

## Control Distribuido y Redes Industriales



# Resultados de la investigación

## Planta industrial del laboratorio



# Resultados de la Investigación

## Sensores y actuadores



*Sensor ultrasónico*



*Sensor de flujo*



*Variador de frecuencia*



*Sensor de Temperatura*



*Sensor de Presión*



# *Diseño de la Propuesta*

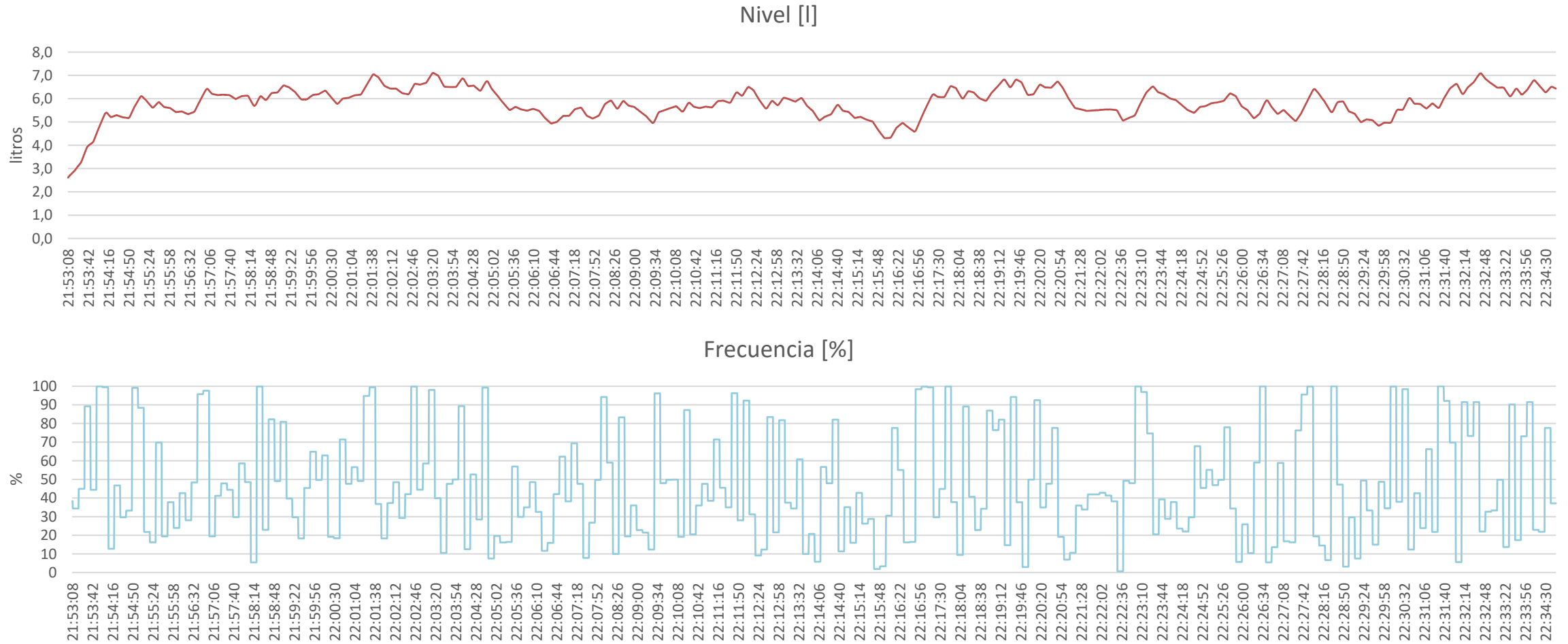
## Arquitectura del Proyecto

- **Obtención del modelo simulado de la planta:**
- **Desarrollo de los controladores:**
- **Implementación de los controladores:**
- **Procesamiento de datos:**
- **Resultado**



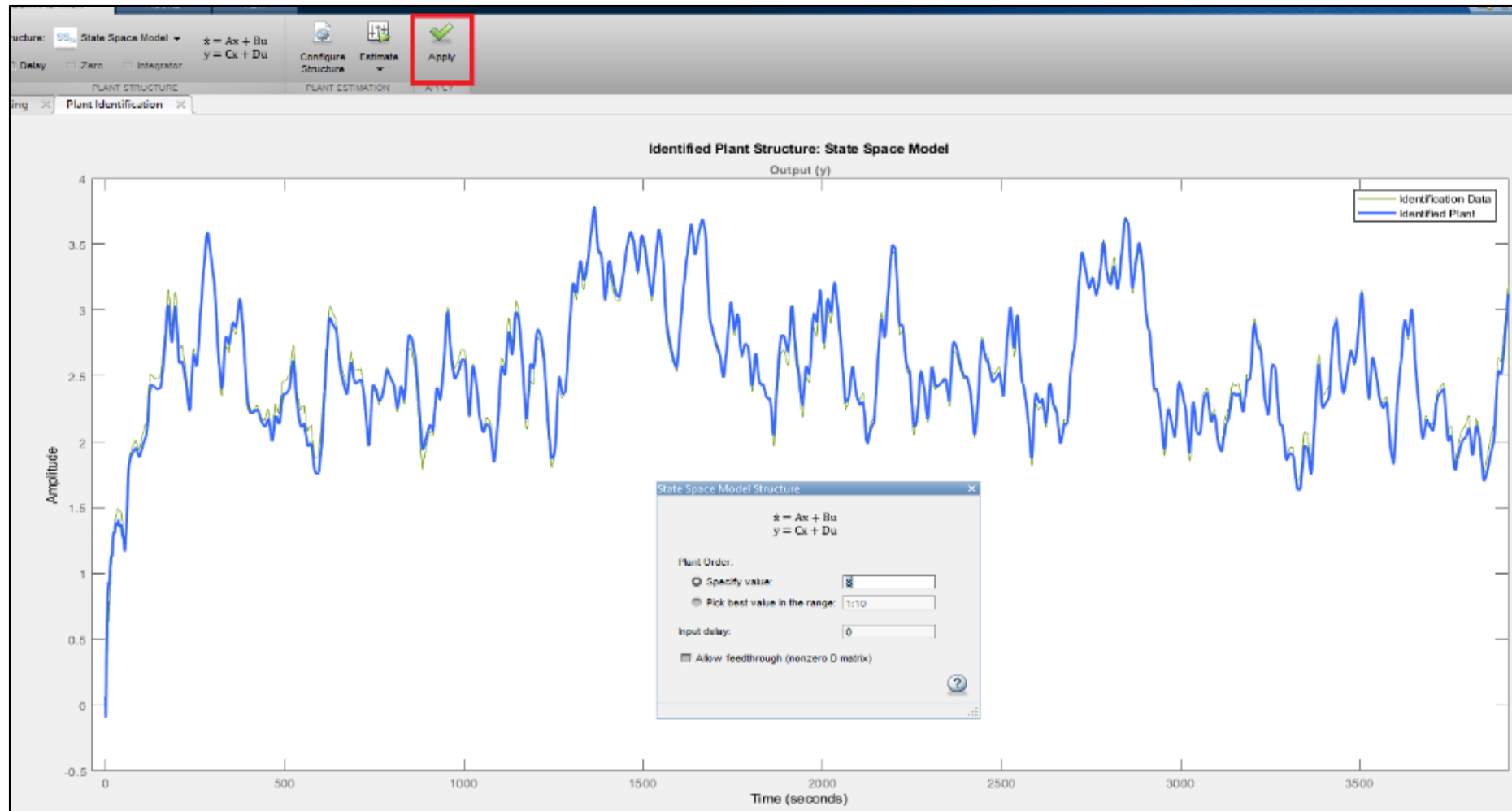
# Diseño de la Propuesta

## Toma de Datos



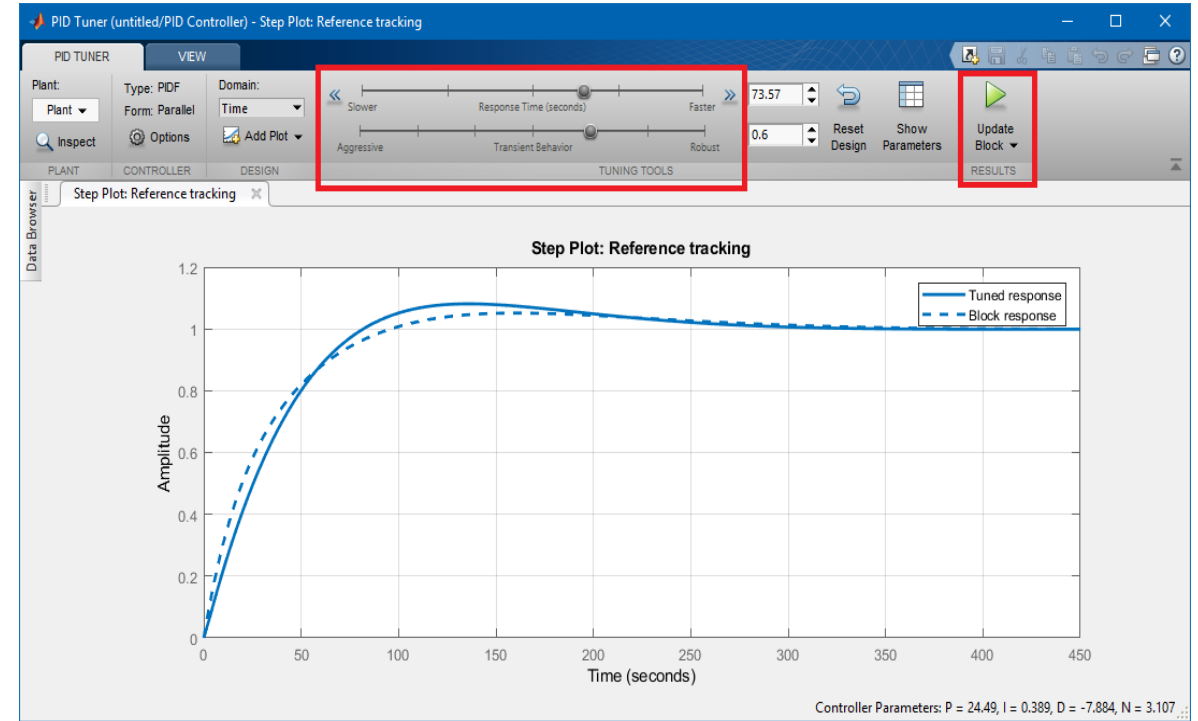
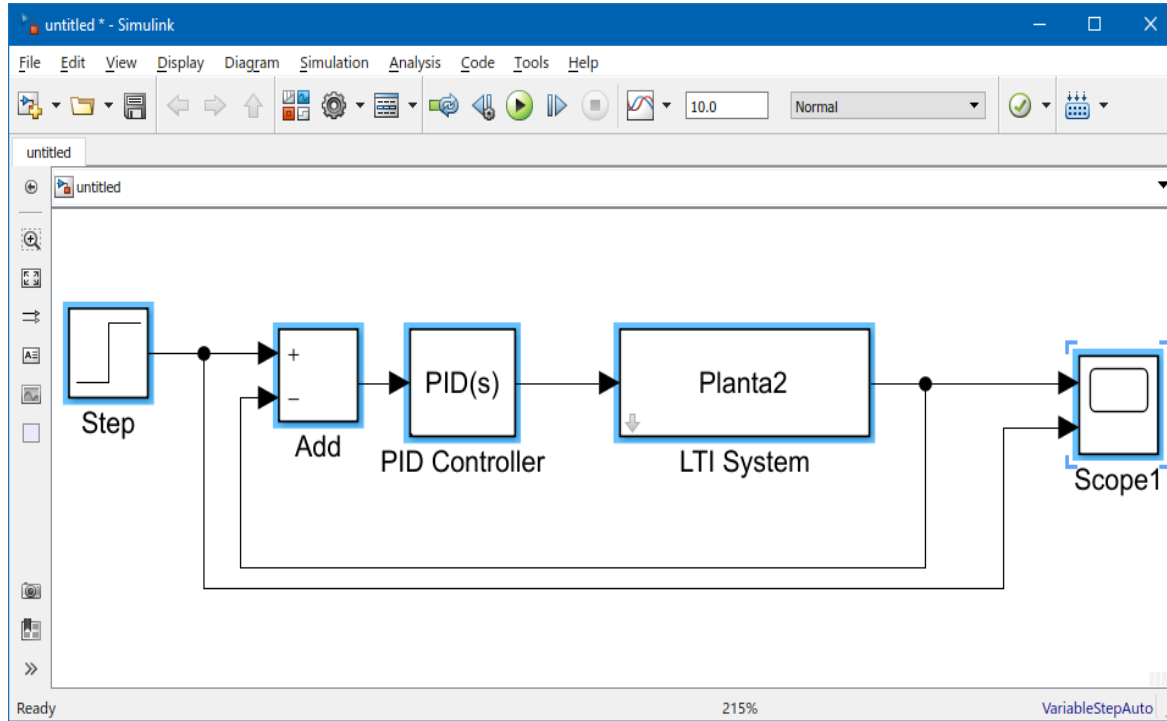
# Diseño de la Propuesta

## Modelo simulado de la planta



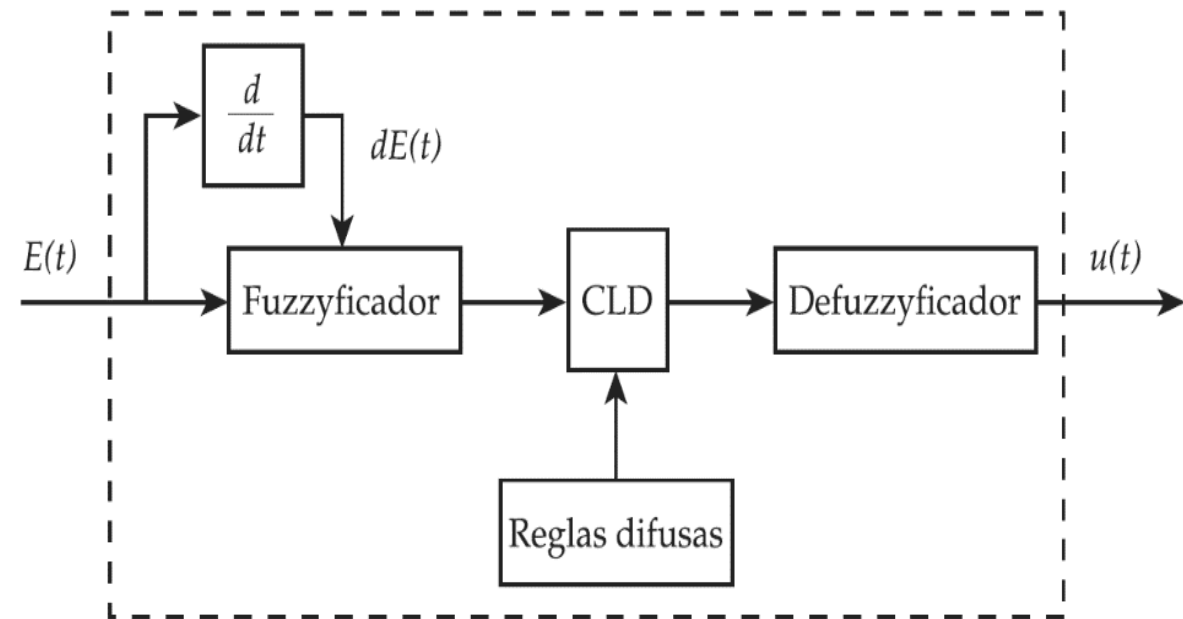
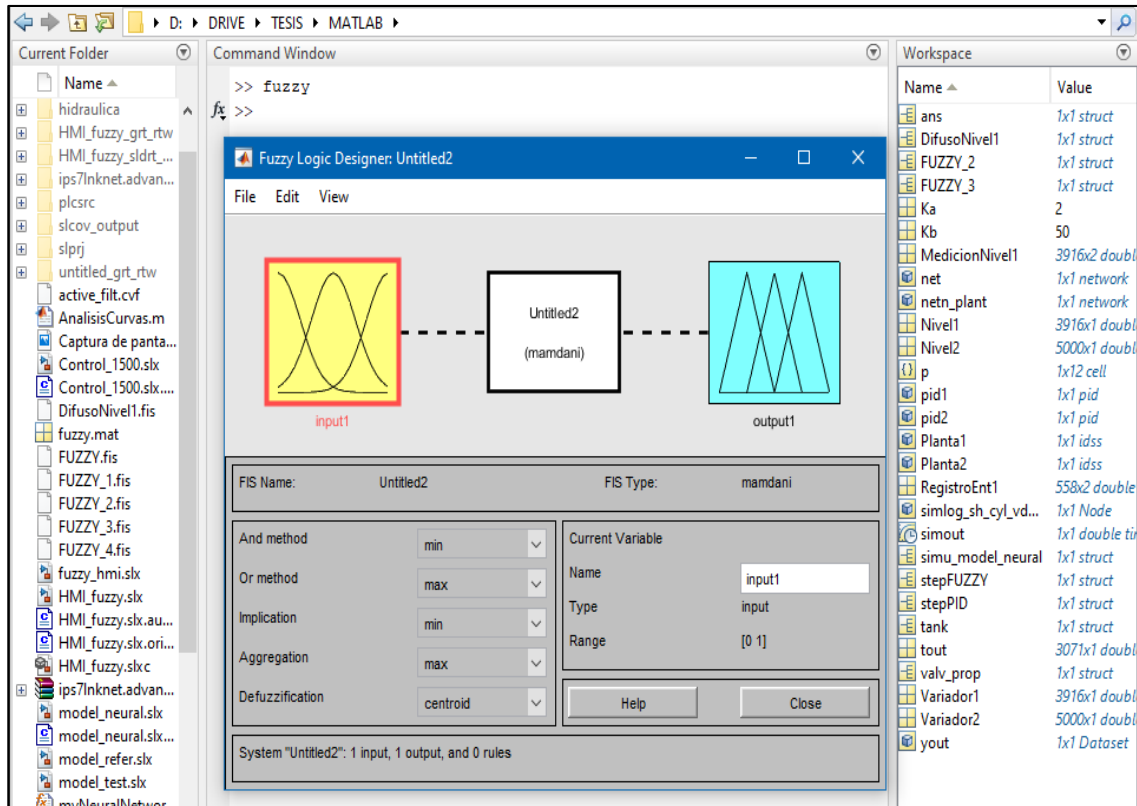
# Diseño de la Propuesta

## Diseño del control PID



# Diseño de la Propuesta

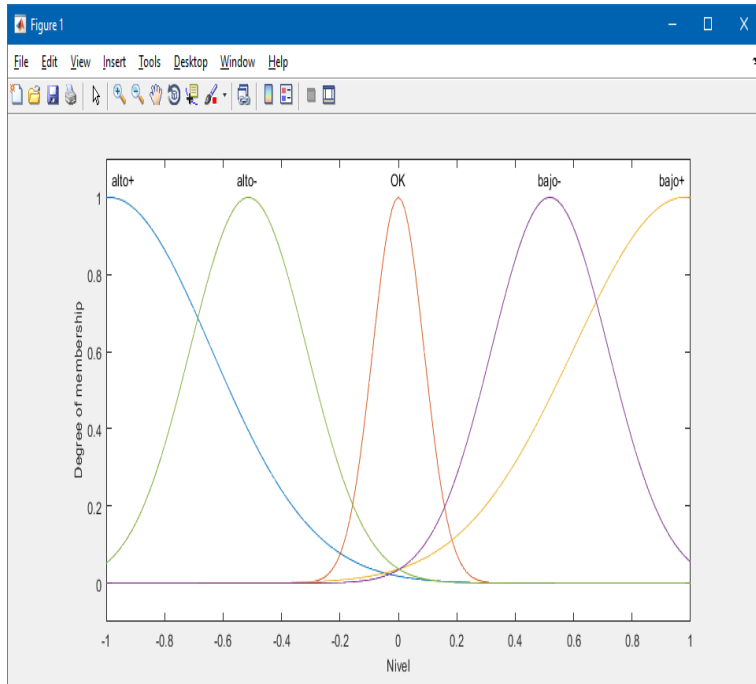
## Diseño del control difuso





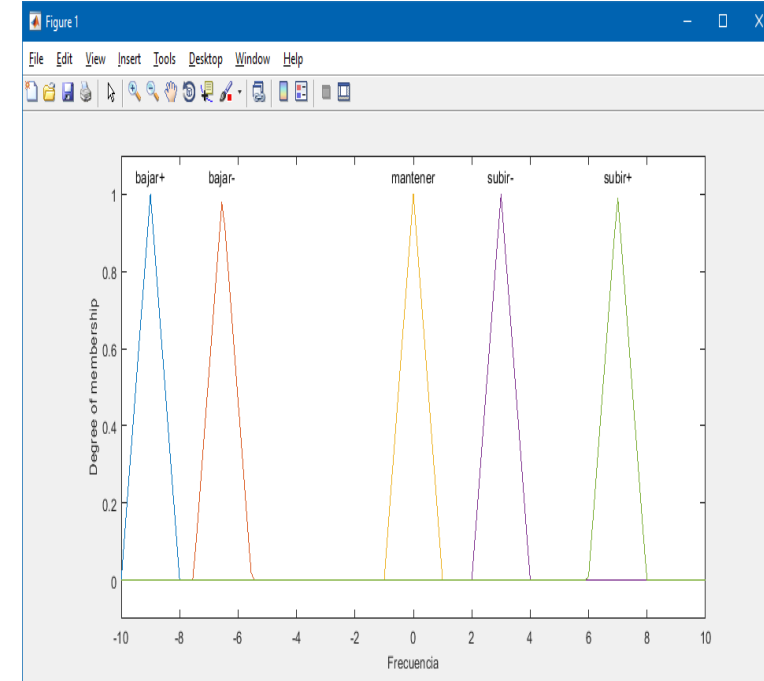
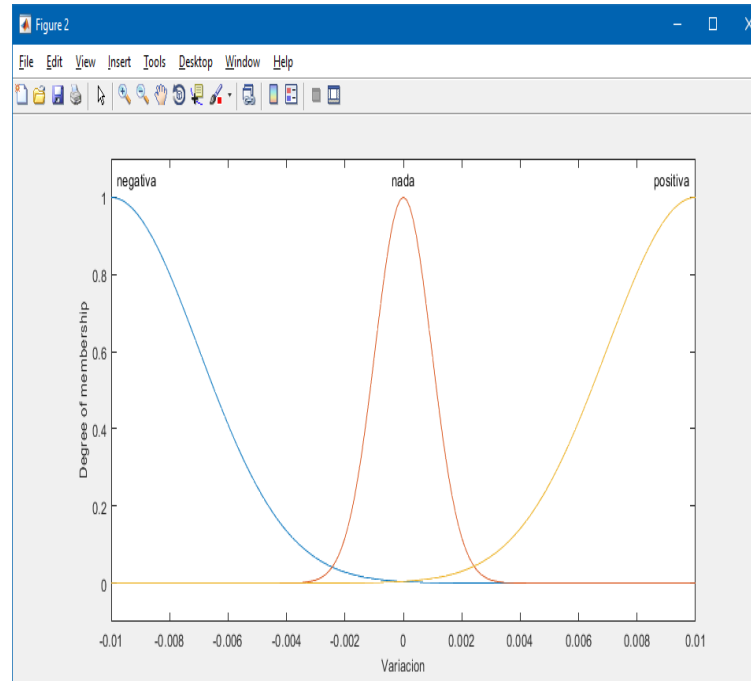
# Diseño de la Propuesta

## Funciones de Membresía



error

variación

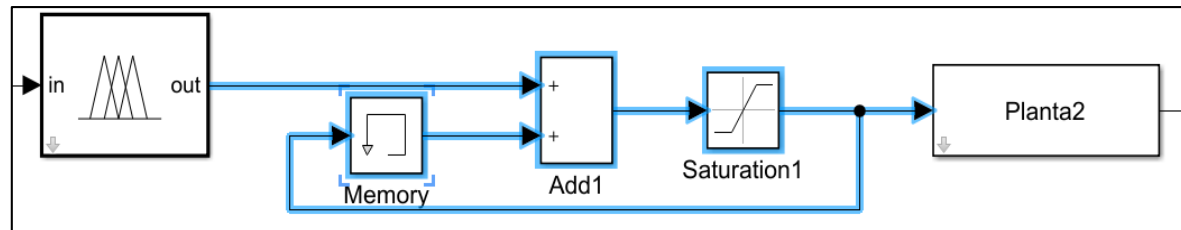
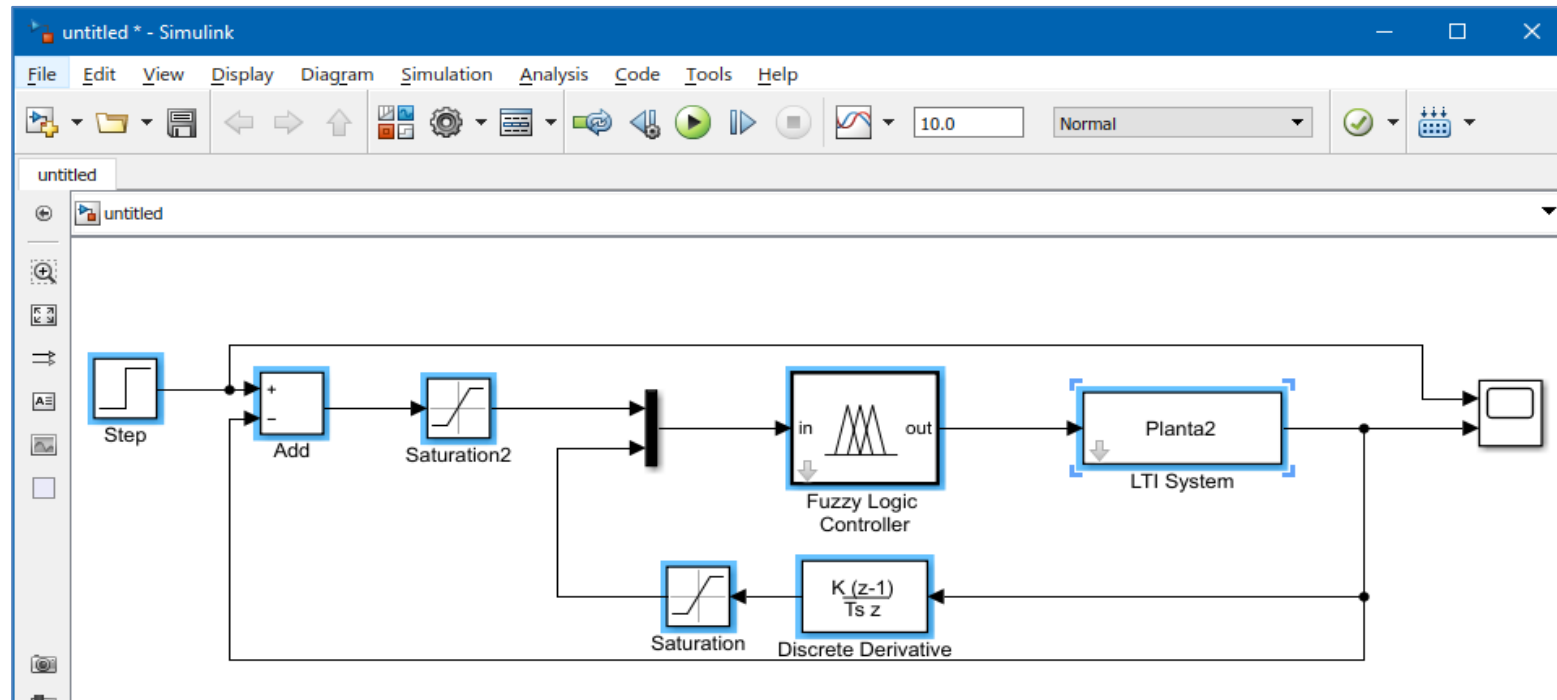


frecuencia



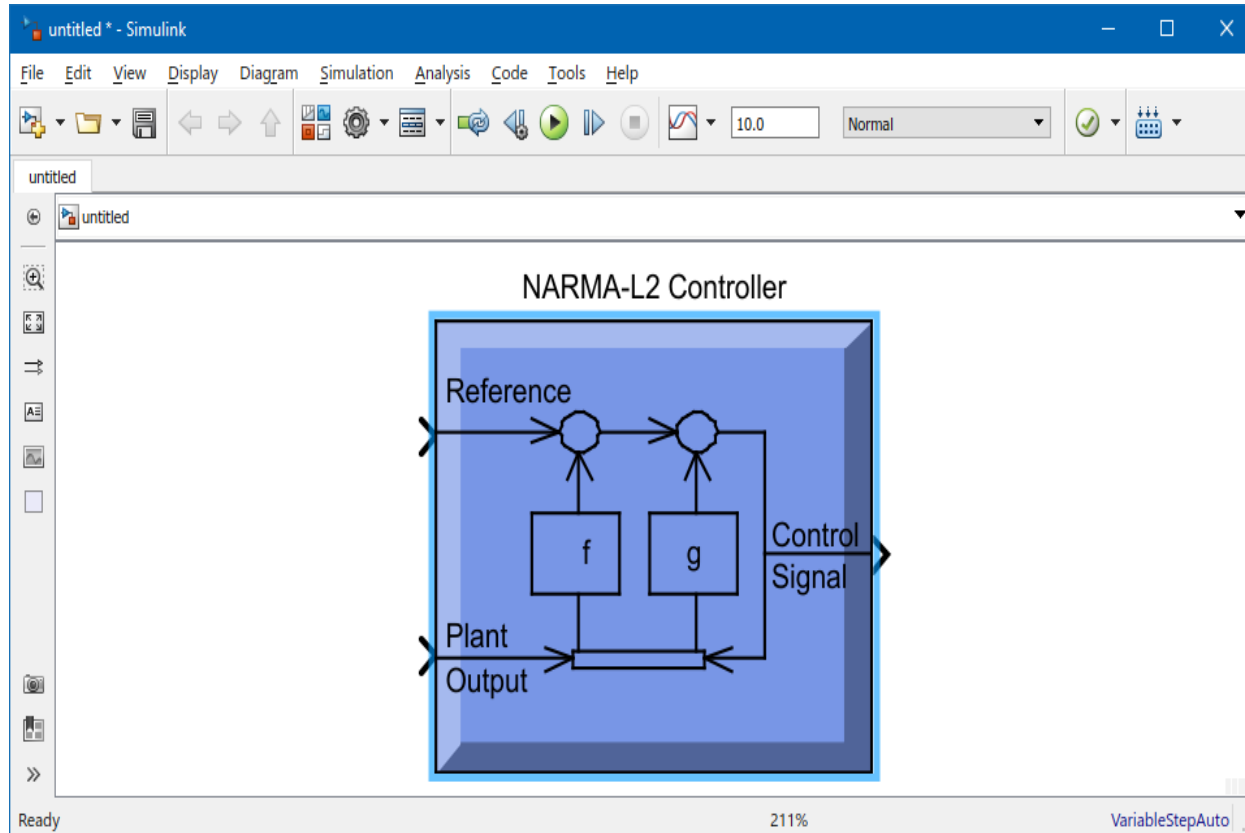
# Diseño de la Propuesta

## Controlador Difuso



# Diseño de la Propuesta

## Diseño Control Neuronal



The window displays the configuration for the "Plant Identification - NARMA-L2" process. It is divided into three main sections: Network Architecture, Training Data, and Training Parameters.

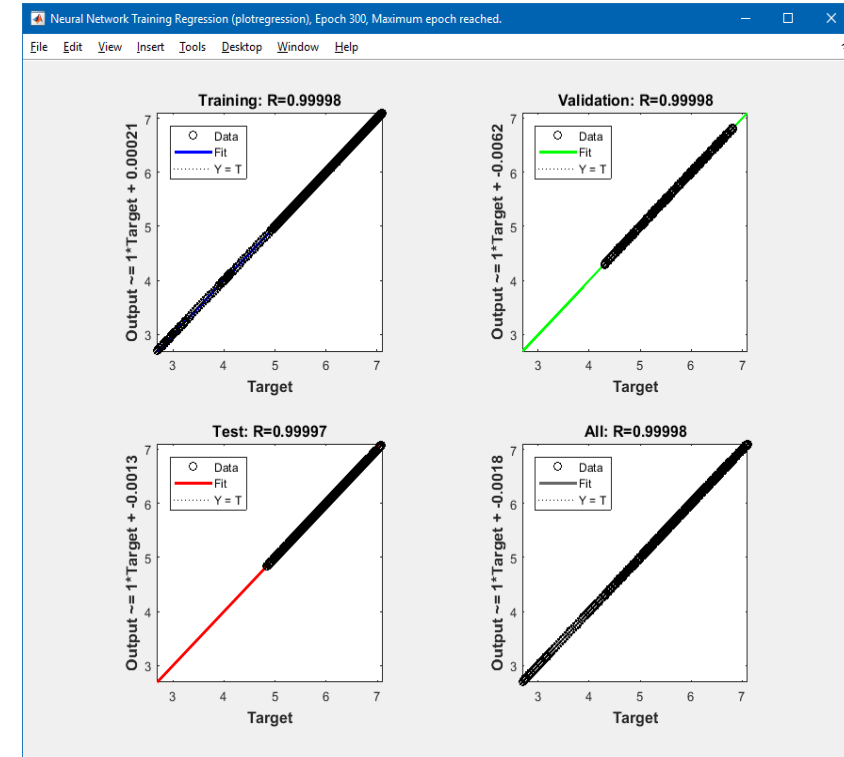
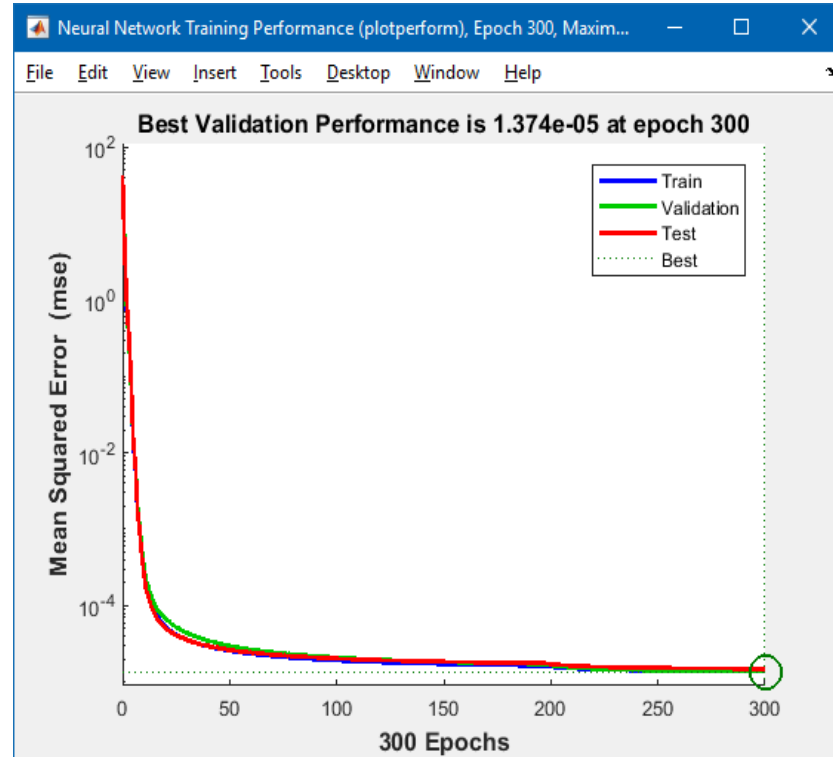
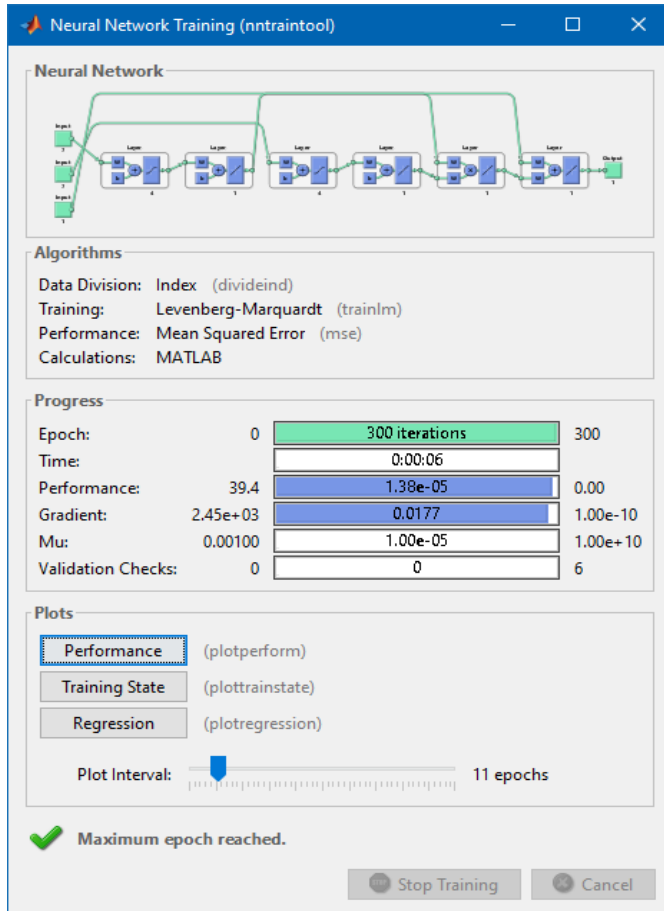
- Network Architecture:** Includes fields for "Size of Hidden Layer", "Sampling Interval (sec)", "No. Delayed Plant Inputs", and "No. Delayed Plant Outputs". There is a checkbox for "Normalize Training Data".
- Training Data:** Includes fields for "Training Samples", "Maximum Plant Input", "Minimum Plant Input", "Maximum Interval Value (sec)", and "Minimum Interval Value (sec)". There are also fields for "Maximum Plant Output" and "Minimum Plant Output", and a "Simulink Plant Model" field with a "Browse" button. Buttons for "Generate Training Data", "Import Data", and "Export Data" are present.
- Training Parameters:** Includes a "Training Epochs" field, a "Training Function" dropdown menu (set to "trainlm"), and checkboxes for "Use Current Weights", "Use Validation Data", and "Use Testing Data". Buttons for "Train Network", "OK", "Cancel", and "Apply" are present.

A blue banner at the bottom of the window reads: "Generate or import data before training the neural network plant."



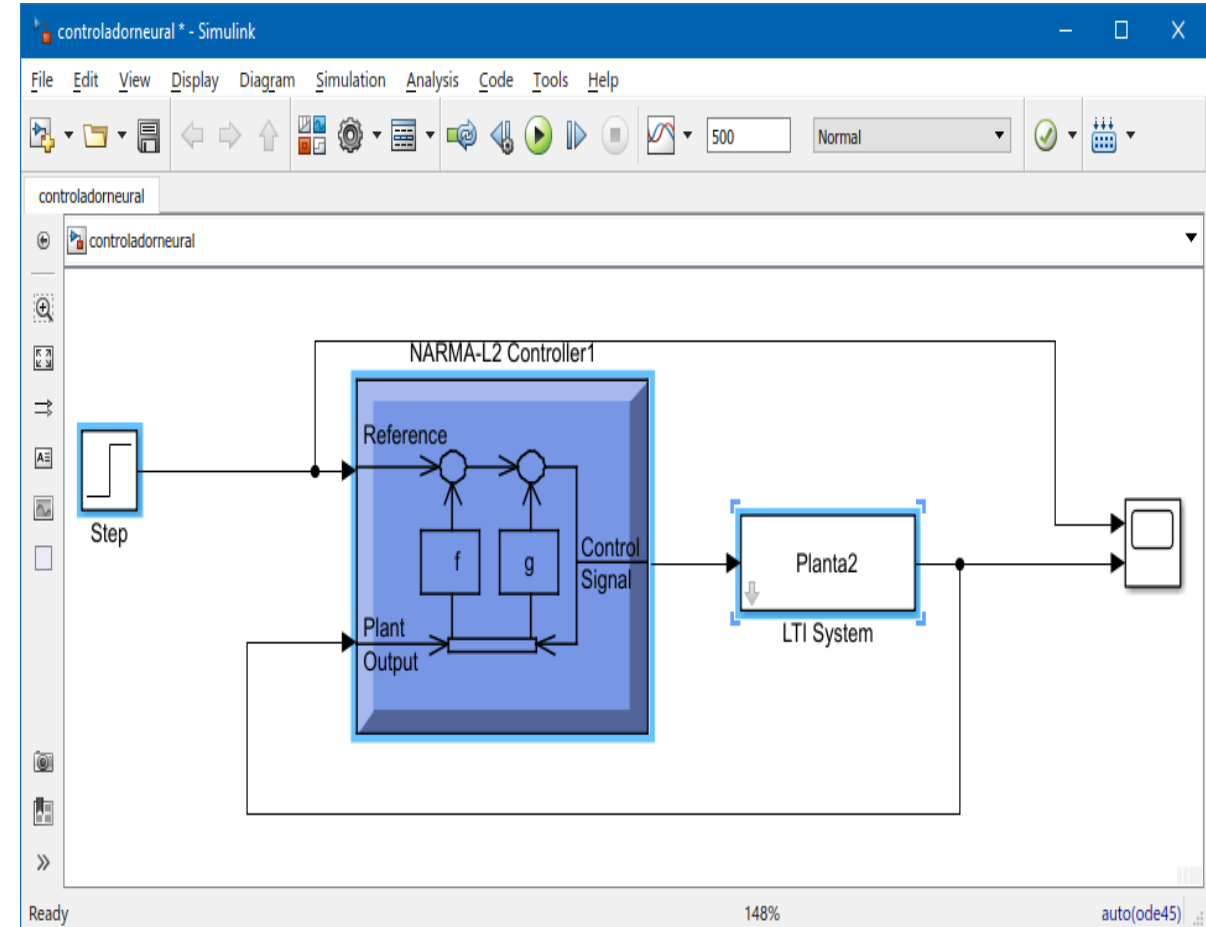
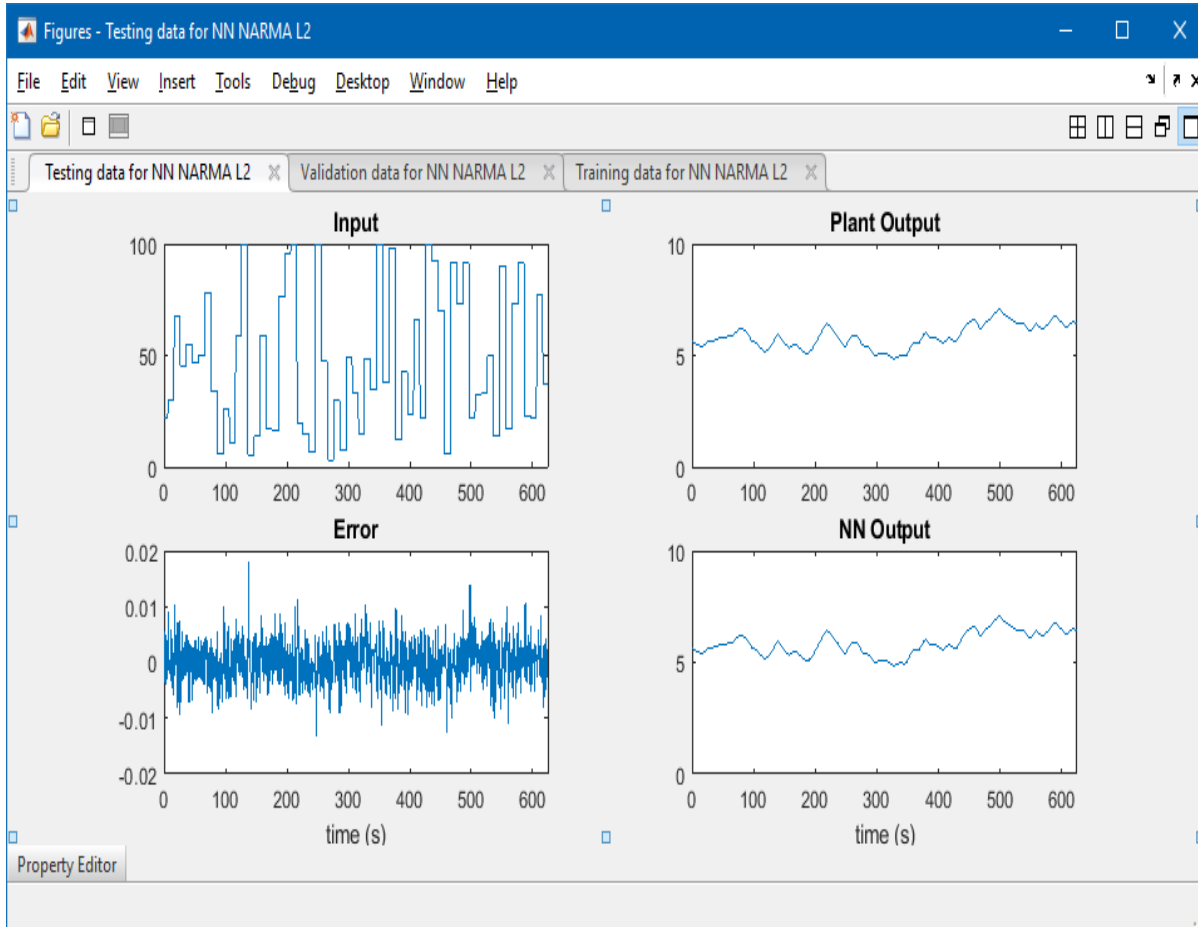
# Diseño de la Propuesta

## Entrenamiento de la Red Neuronal



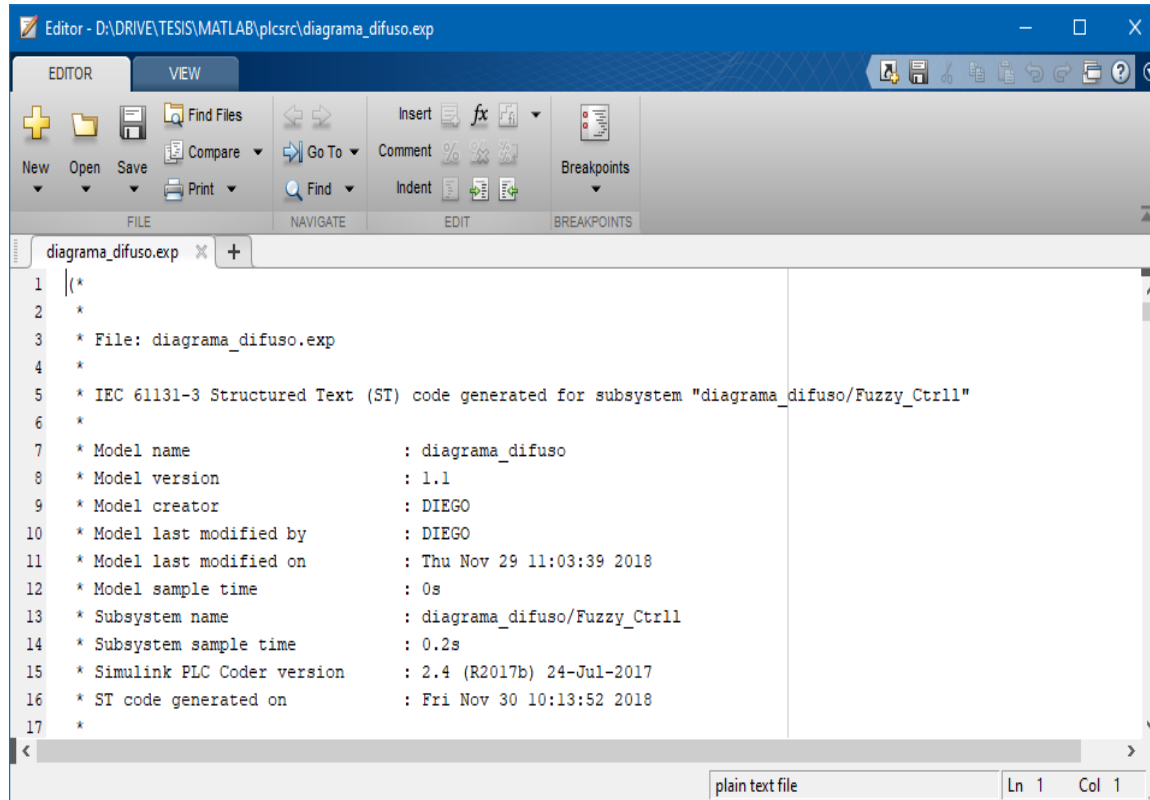
# Diseño de la Propuesta

## Resultados del controlador

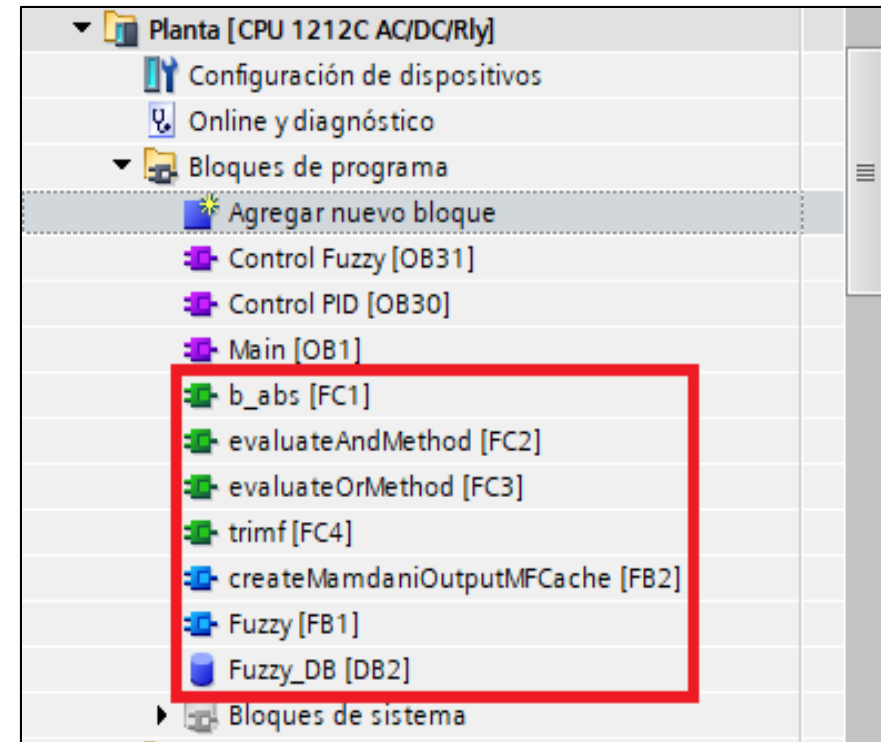


# Implementación del Sistema

## Exportación de los controladores hacia TIA PORTAL

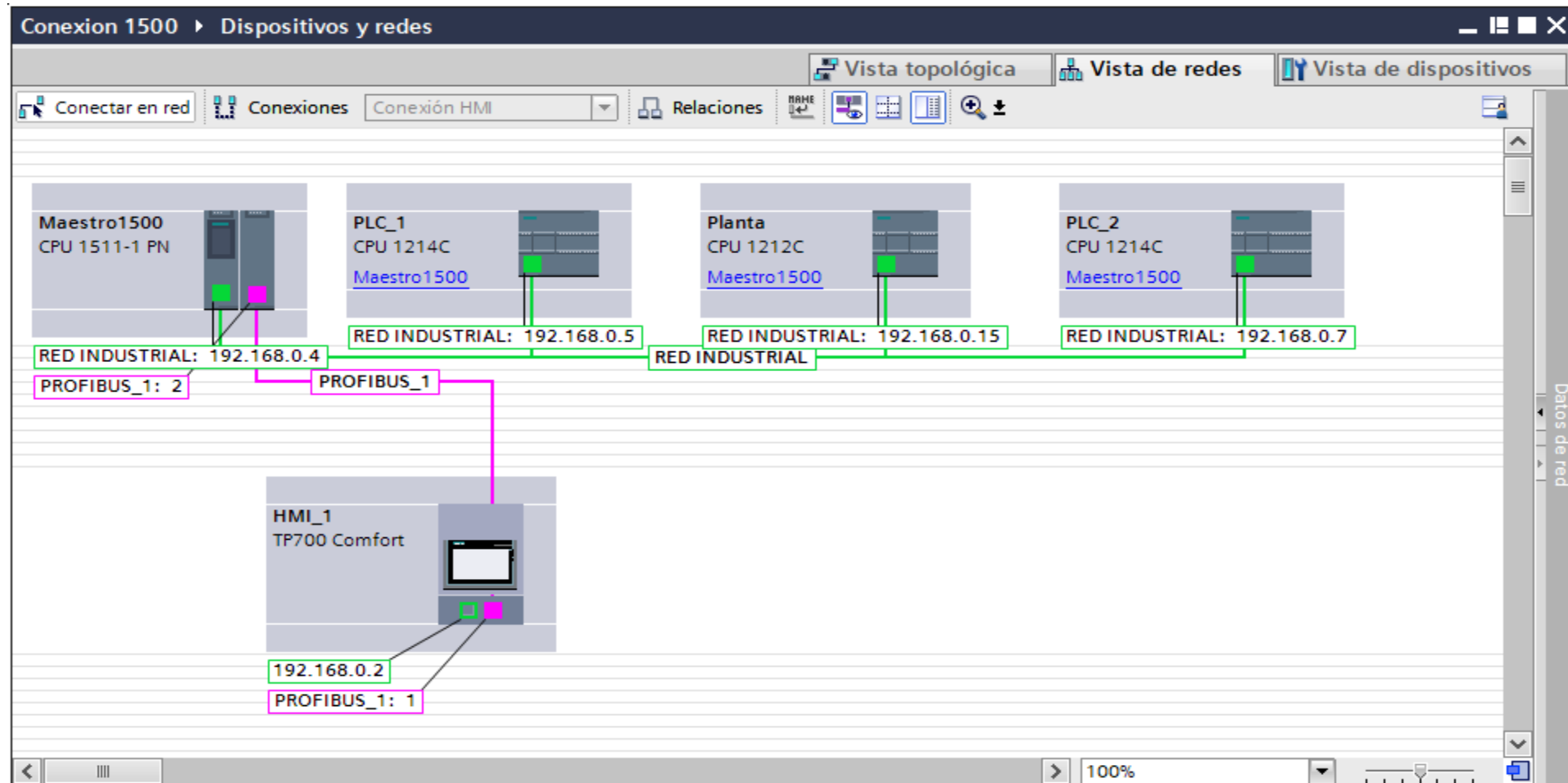


```
1 |(*
2 *
3 * File: diagrama_difuso.exp
4 *
5 * IEC 61131-3 Structured Text (ST) code generated for subsystem "diagrama_difuso/Fuzzy_Ctrl1"
6 *
7 * Model name           : diagrama_difuso
8 * Model version        : 1.1
9 * Model creator        : DIEGO
10 * Model last modified by : DIEGO
11 * Model last modified on : Thu Nov 29 11:03:39 2018
12 * Model sample time    : 0s
13 * Subsystem name       : diagrama_difuso/Fuzzy_Ctrl1
14 * Subsystem sample time : 0.2s
15 * Simulink PLC Coder version : 2.4 (R2017b) 24-Jul-2017
16 * ST code generated on   : Fri Nov 30 10:13:52 2018
17 *
```



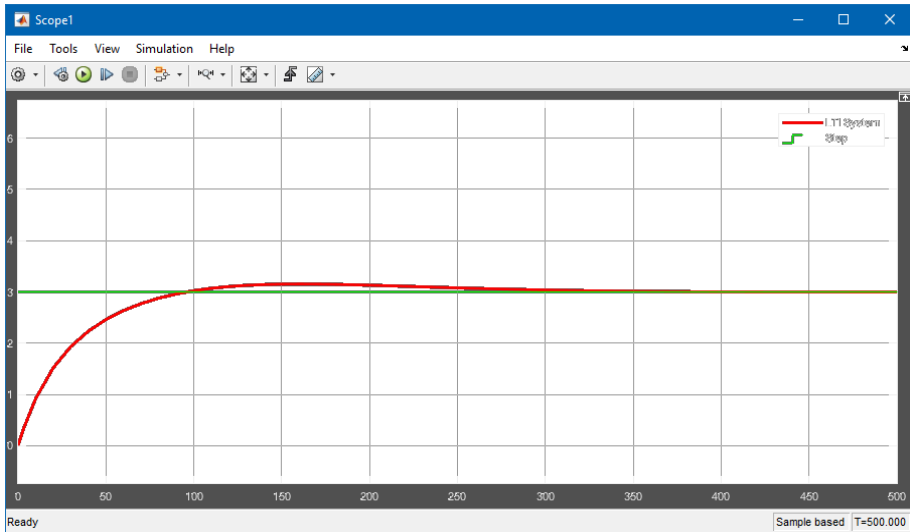
# Implementación del Sistema

## Red Industrial de la planta



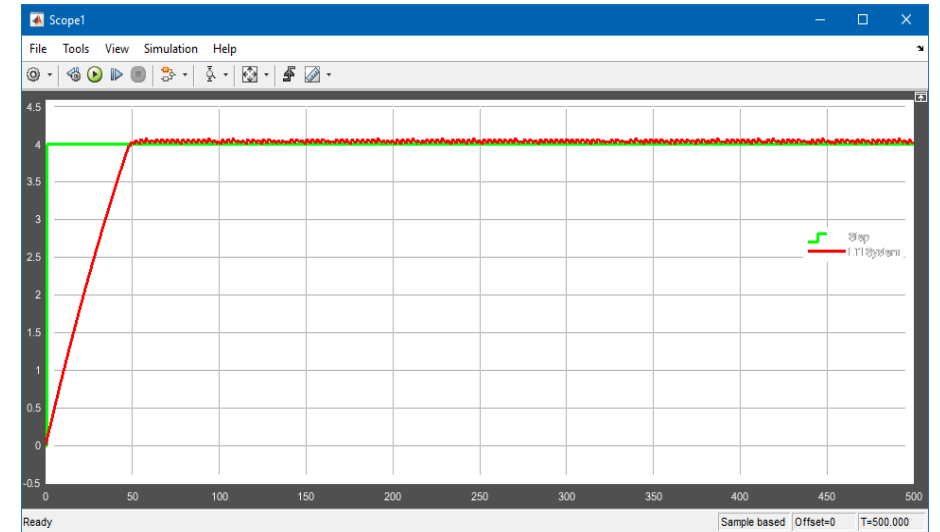
# Pruebas de funcionamiento

Prueba de funcionamiento de los controladores simulados.

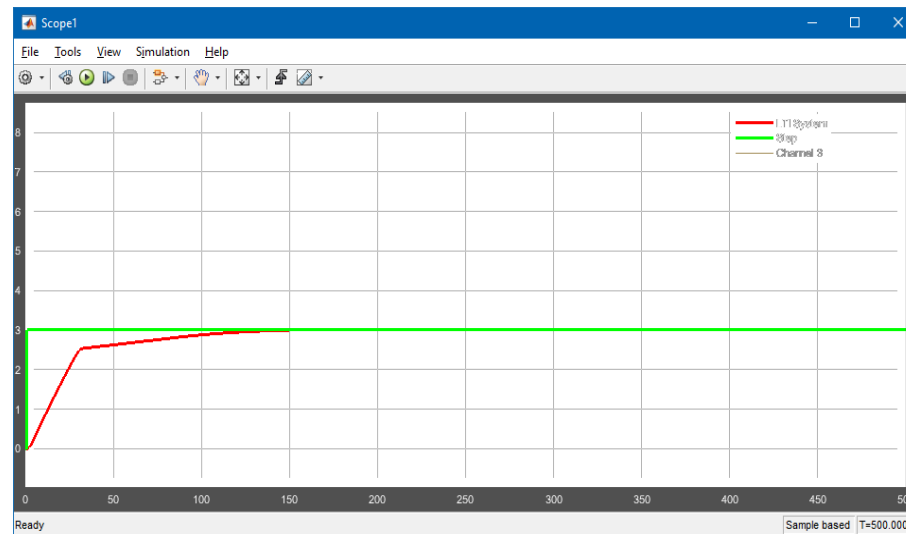


PID

difuso



neuronal

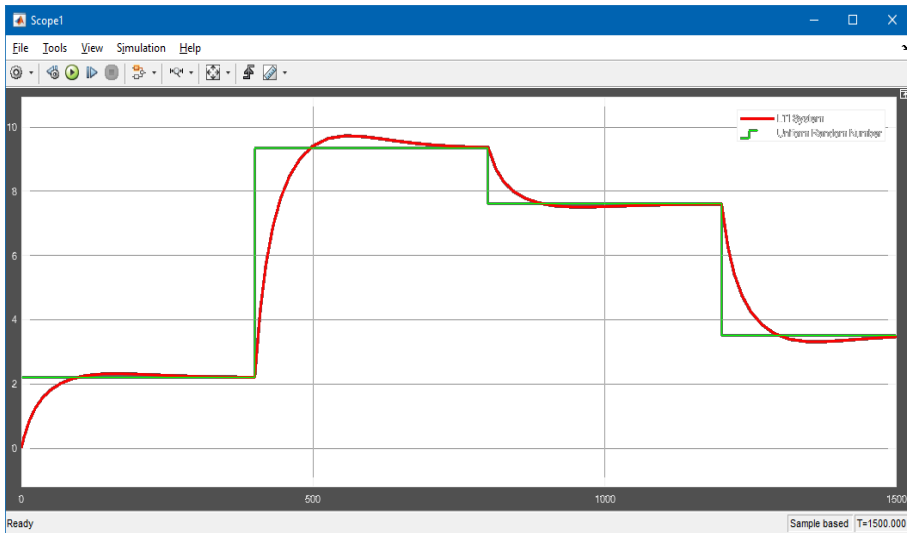


**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



# Pruebas de funcionamiento

Prueba de funcionamiento de los controladores simulados.

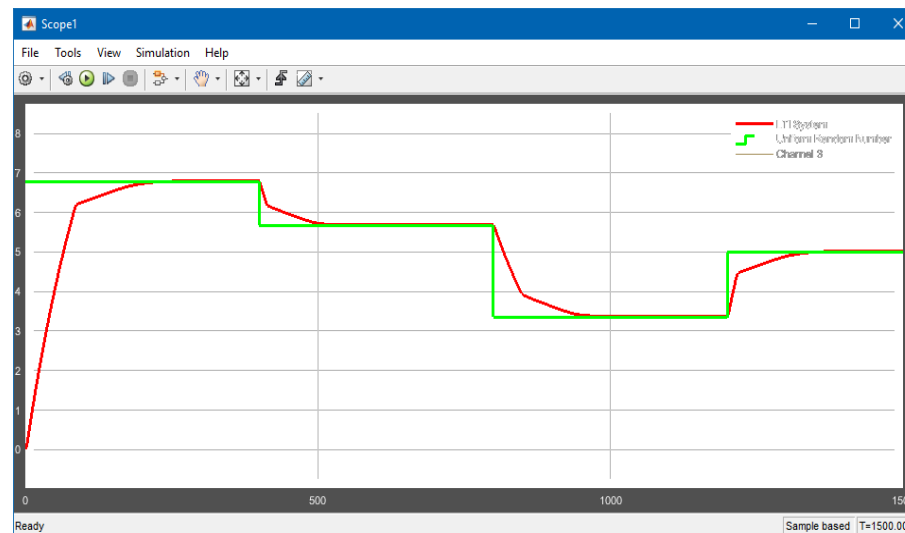


PID

difuso

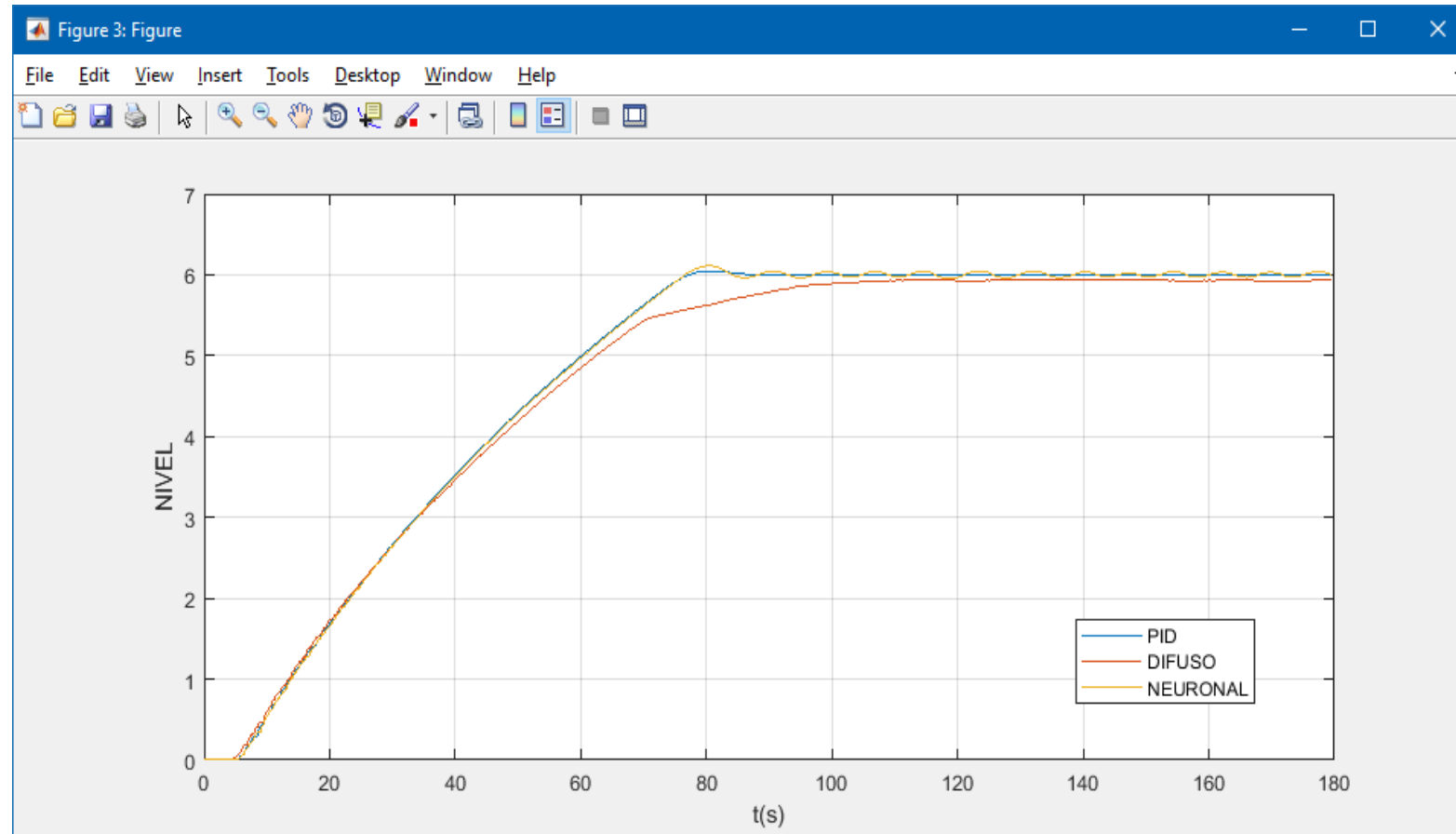


neuronal



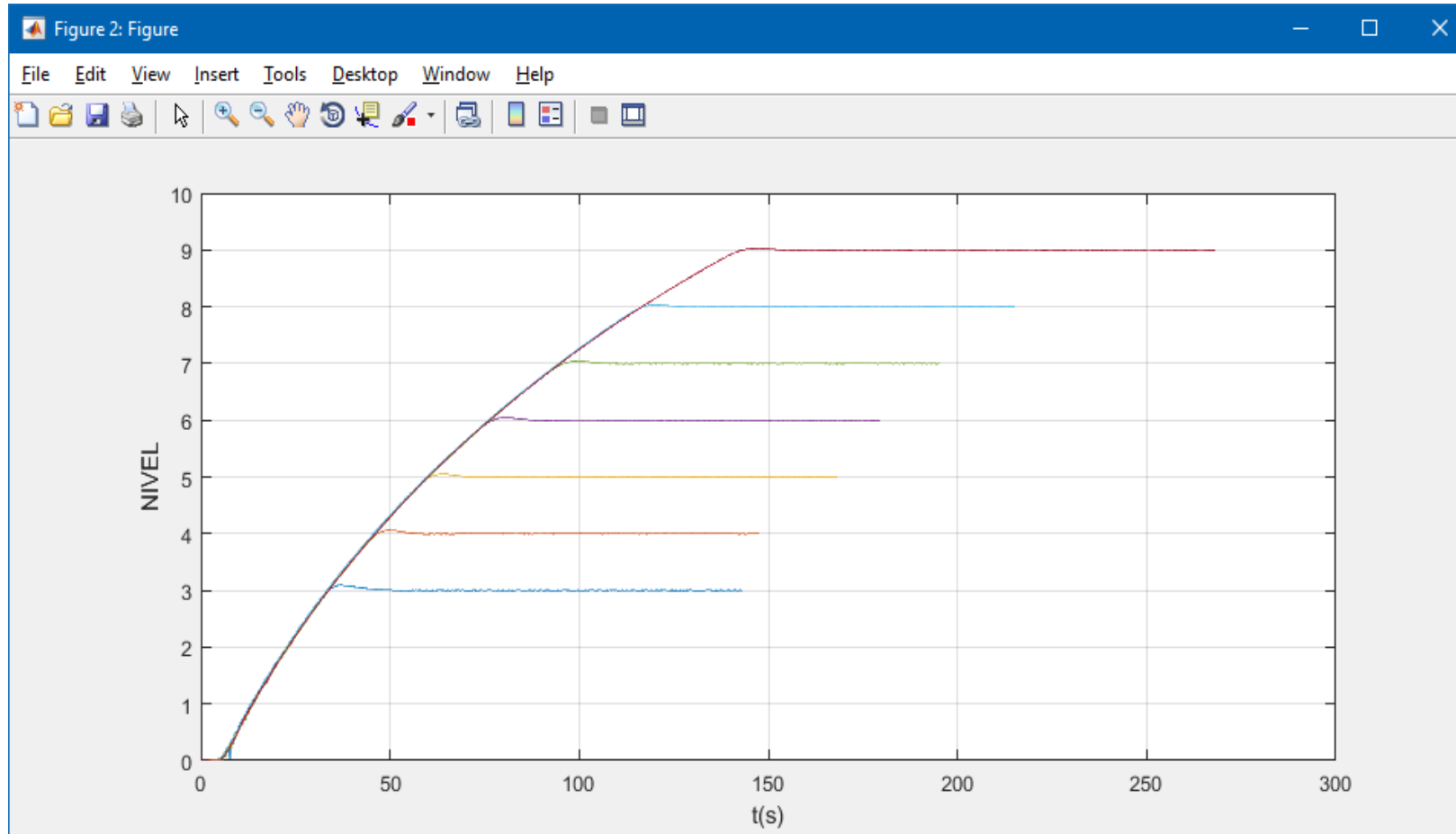
# Pruebas de funcionamiento

## Resultado de los controladores a una consigna fija



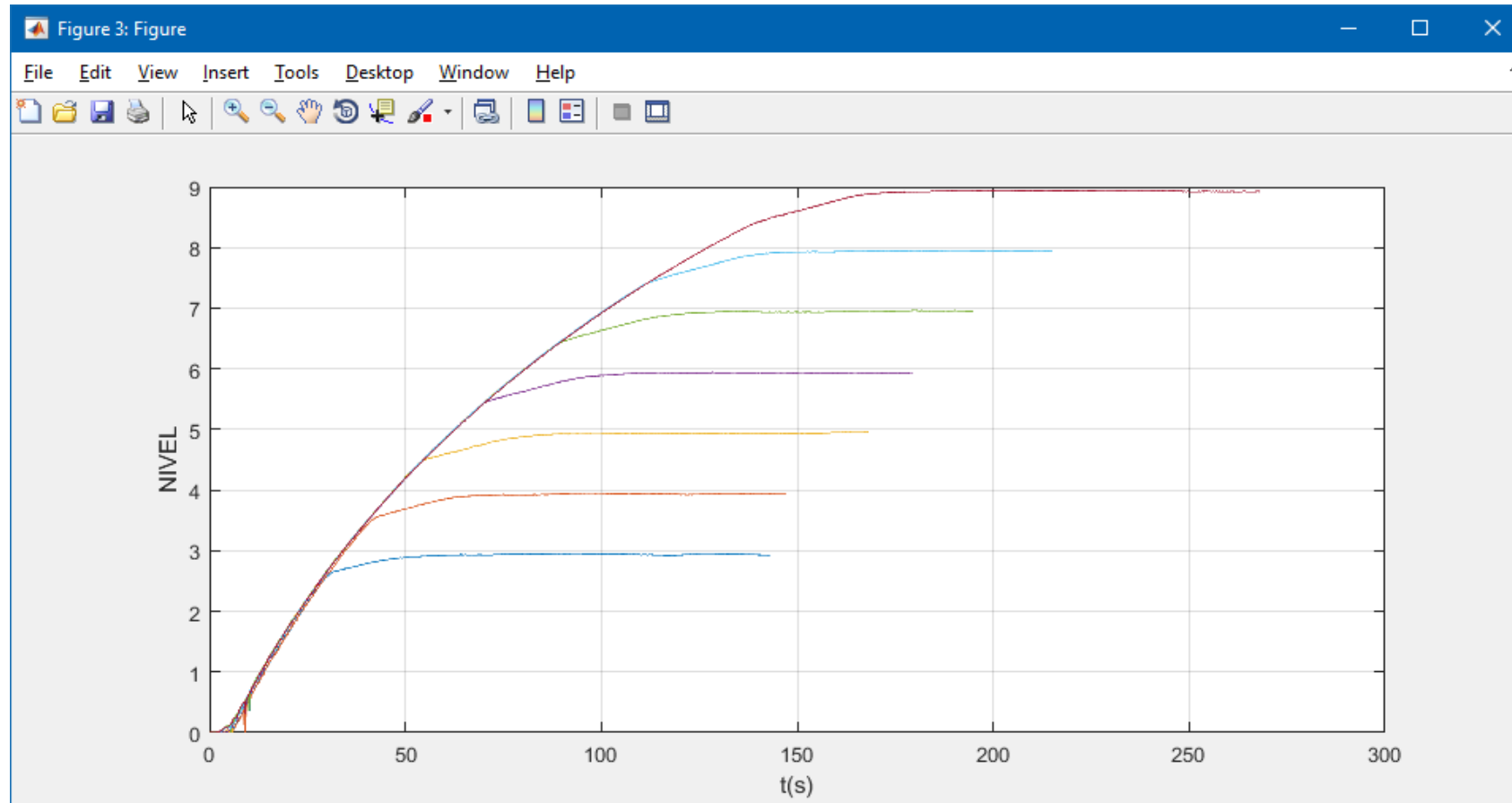
# Resultados

## Controlador PID implementado



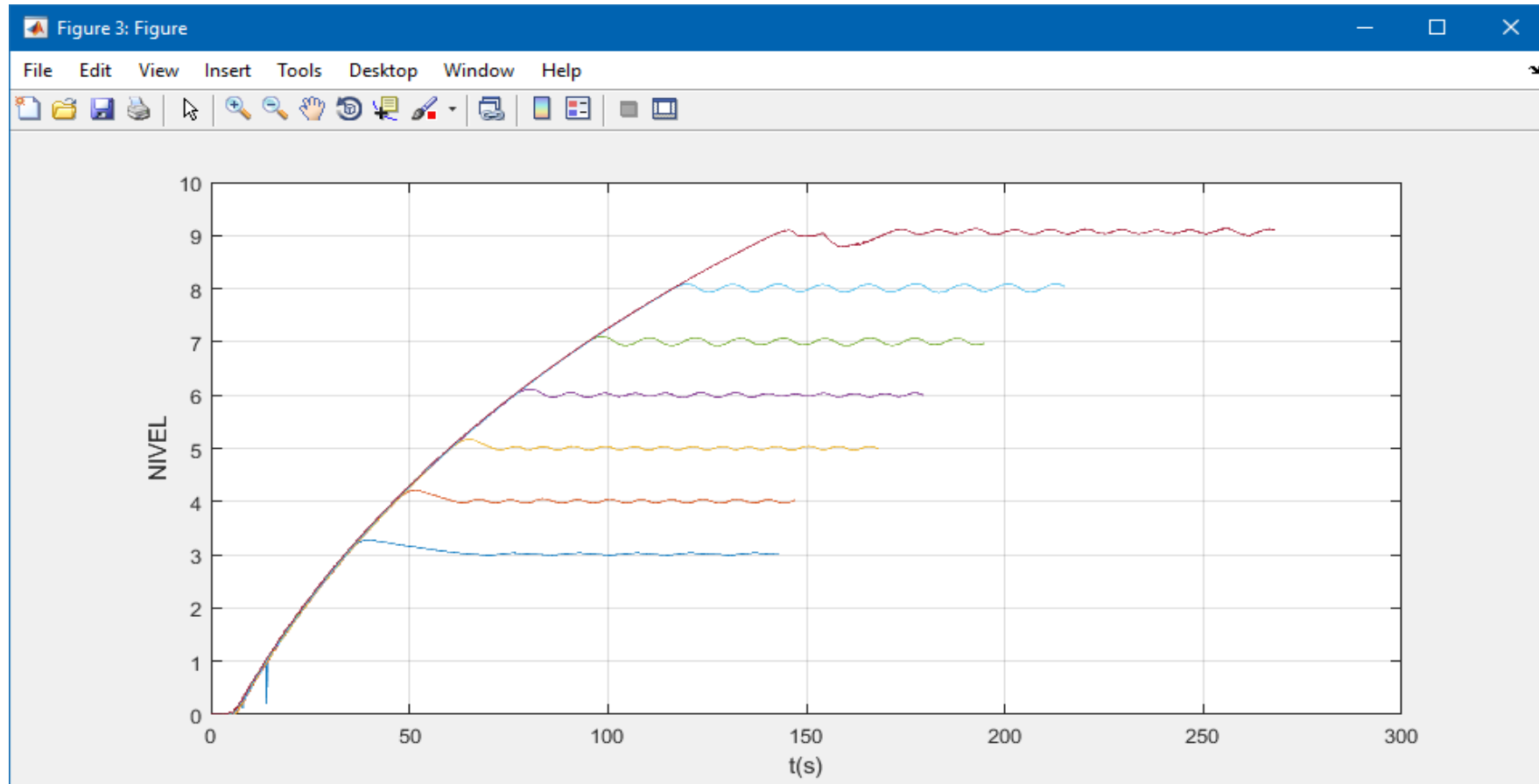
# Resultados

## Controlador Difuso implementado



# Resultados

## Controlador Neuronal implementado



# Conclusiones

- Los controladores PID basan su funcionamiento en la calibración y sintonización de los parámetros proporcional ( $k_p$ ), integral ( $k_i$ ) y derivativo ( $k_d$ ), además de trabajar en diferentes combinaciones utilizando estas tres funcionalidades según lo requiera el proceso a controlar, por lo cual es necesario un conocimiento profundo de éste para lograr una sintonía adecuada; el controlador difuso depende de las funciones de membresía asignadas a cada una de las variables del proceso junto con la serie de reglas de inferencia difusa para la obtención del valor de salida, además del hecho que para su desarrollo no se requiere un conocimiento matemático del modelo a controlar; mientras que el controlador neuronal depende de los valores de entrenamiento obtenidos del proceso, junto con la cantidad de neuronas dentro de las capas ocultas, que permite obtener un comportamiento similar al proceso.
- Cada uno de los controladores PID, difuso y neuronal, fueron desarrollados utilizando la herramienta matemática Matlab y Simulink, con ayuda de las Toolbox Control System, Fuzzy Logic, Deep Learning Toolbox y Simulink PLC Coder; los cuales nos permiten modelar el proceso a controlar, generar los controladores, configurarlos de una manera intuitiva y simularlos para verificar su correcto funcionamiento, además de facilitar el traslado de los mismos de un entorno de simulación a uno físico a través de la generación de código SCL para su implementación en un PLC, ahorrando tiempo de programación.



# Conclusiones

- En las mediciones realizadas a la variable de nivel de la planta industrial del Laboratorio de Hidrónica y Neutrónica, se observó que el control PID se adapta de manera aceptable al control del proceso, con un porcentaje de sobre impulso de 1.15%; por su parte el controlador difuso provocó dos tipos de pendiente de crecimiento de la variable: uno acelerado y cerca del valor de setpoint uno más lento, provocando una respuesta que no presenta porcentaje de sobre impulso, aunque su tiempo de establecimiento se aumenta; mientras que el controlador neuronal presentó un porcentaje de sobre impulso del 3.44%, con valores elevados a consignas bajas, pero a valores altos de setpoint, su porcentaje de sobre impulso y su tiempo de establecimiento mejoran a comparación del controlador PID. Finalmente, la principal ventaja que presentan los controles inteligentes (difuso y neuronal) es la posibilidad de trabajar con sistemas MIMO, lo cual no puede ser realizado con un control PID regular, como por ejemplo, el control de una válvula proporcional hidráulica.



# Recomendaciones

- Modificar las reglas de inferencia del control difuso, junto con el aumento de nuevas variables de entrada para modificar el comportamiento de controlador y adaptarlo para mejorar su respuesta hacia el proceso industrial, con el fin de reducir el error en estado estable de la variable, así como un tiempo de establecimiento más rápido.
- Utilizar mayores datos de muestreo en el control neuronal, en un rango de respuesta más amplio para la obtención del modelo más cercano al físico; además, el tipo de red neuronal utilizado es uno predefinido por el entorno de Simulink, así que queda la posibilidad de mejorar el desempeño del controlador modificando la arquitectura de la red neuronal para añadir más variables de entrada.
- Cada uno de los controladores tienen sus ventajas respecto a los otros, por lo cual se recomienda analizar formas híbridas de éstos, como los son un controlador Neuro-PID, donde las constantes del PID provienen de una red neuronal establecida; un controlador PID difuso donde las constantes provienen del proceso de inferencia difusa del sistema, o un controlador Neuro-Fuzzy, donde los parámetros de las funciones de membresía difusas se adaptan según la salida de una red neuronal.





**GRACIAS POR SU ATENCIÓN**



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