



**E S P E**  
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO  
CAMINO A LA EXCELENCIA

## **CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN**

### **Proyecto de tesis de grado:**

**TEMA: “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO DE CONTROL AVANZADO APLICADO A UN PROCESO DE PRESIÓN, UTILIZANDO UN CONTROLADOR DE AUTOMATIZACIÓN PROGRAMABLE PARA EL LABORATORIO DE REDES INDUSTRIALES Y CONTROL DE PROCESOS DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA.”**

#### **Autores:**

**CURAY FLORES SEGUNDO DAVID  
VACA GUILCAMAIGUA ANDREA ELIZABETH**

#### **Directora:**

---

**ING. LLANOS JACQUELINE.**

#### **Codirector:**

**ING. PILATASIG MARCO.**

**LATACUNGA-ECUADOR**

**ENERO 2015**

**“SIEMPRE PARECE IMPOSIBLE HASTA  
QUE LO LOGRAS”**



# AGENDA

Introducción.

Antecedentes.

Objetivos.

Conceptos básicos.

Metodología para el desarrollo del proyecto.

Resultados obtenidos.

Conclusiones.

Recomendaciones.

# INTRODUCCIÓN

## CONTROL AUTOMÁTICO



Avance

Ingeniería

ciencia

Importancia



Procesos  
Modernos

Industriales

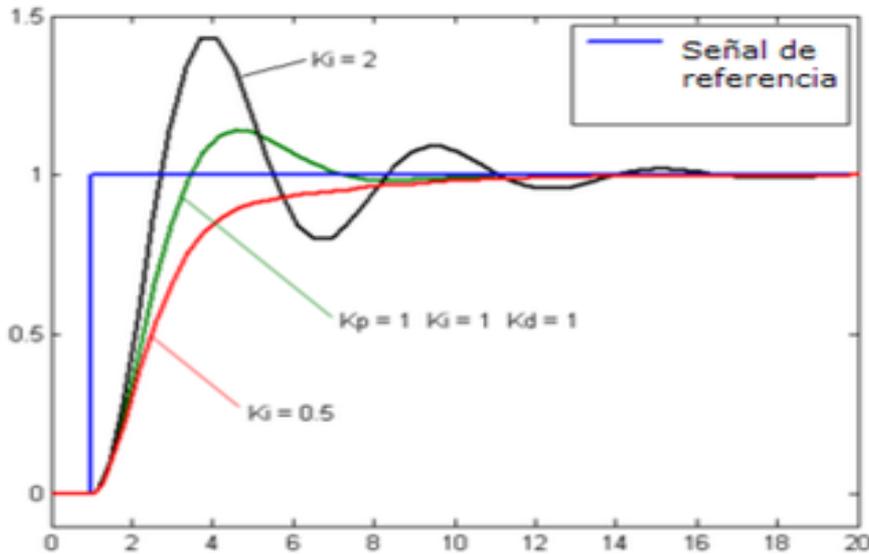
Fabricación

Mejorar y  
simplificar

Productividad

Trabajo

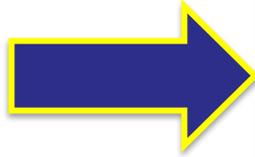
# ANTECEDENTES



Maximizar producción

# ANTECEDENTES

El desarrollo e implementación de controladores avanzados en Ecuador no es común



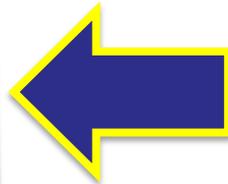
Este proyecto busca



Industriales



Equipos



Académicos

# OBJETIVOS

## Objetivo general.

Diseñar e implementar un algoritmo de control avanzado aplicado a un proceso de presión, utilizando un controlador de automatización programable para el Laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga.

# OBJETIVOS

## Objetivos específicos.

Modelar la planta de presión del Laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos.

Diseñar por simulación el algoritmo de control avanzado para la planta de presión.

Implementar el algoritmo de control avanzado en el Controlador de Automatización Programable.

Comparar el algoritmo de control avanzado frente a un control tradicional (PID).

# CONCEPTOS BÁSICOS

Control Avanzado

El control avanzado describe el diseño de una infraestructura de un sistema de ingeniería.

Cuando existen procesos con un mayor grado de complejidad



Estrategias de control.

Sin embargo

Escaso nivel de formación

Sistema de diferente naturaleza

Académico



Industrial

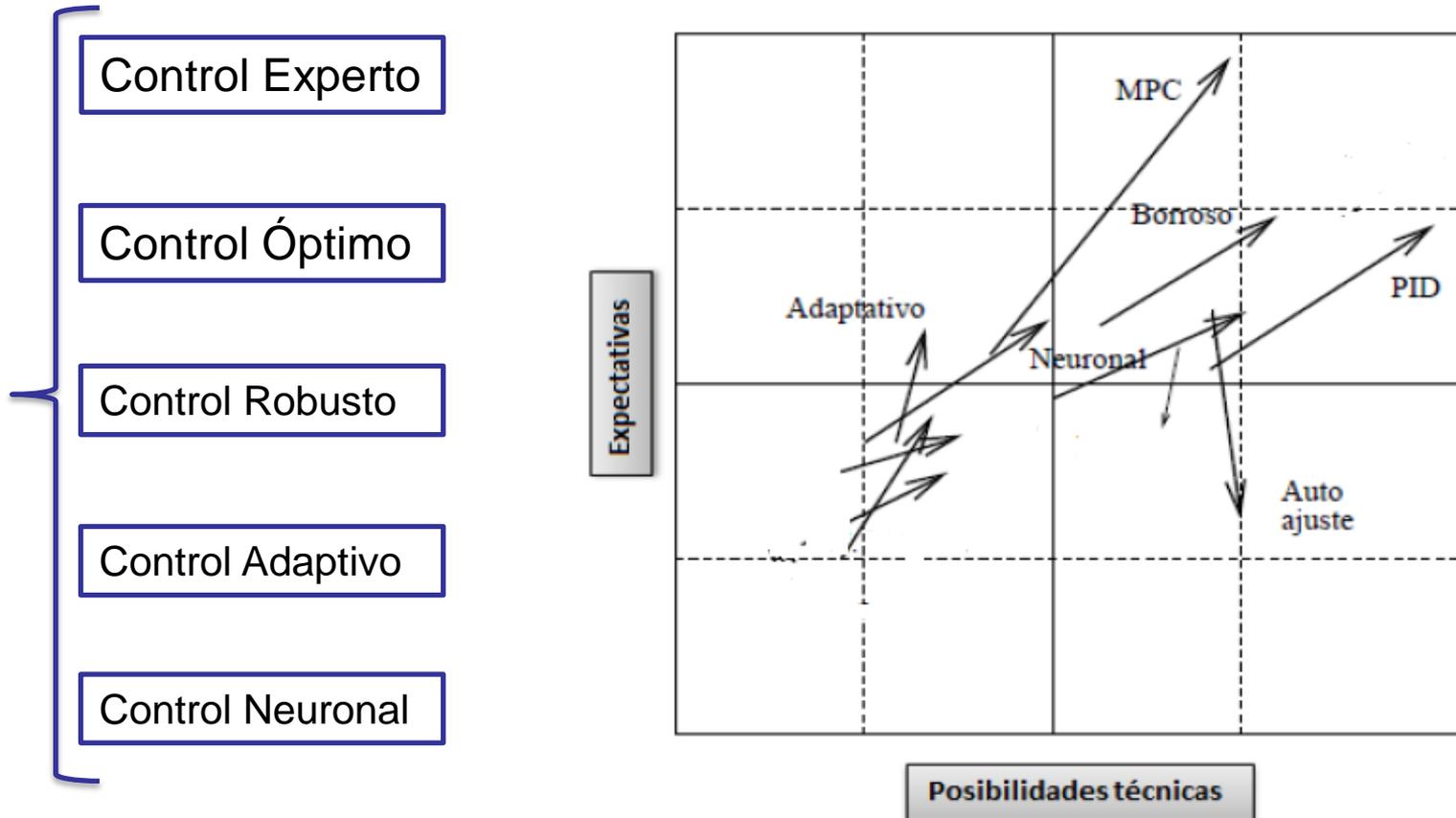


**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# CONCEPTOS BÁSICOS

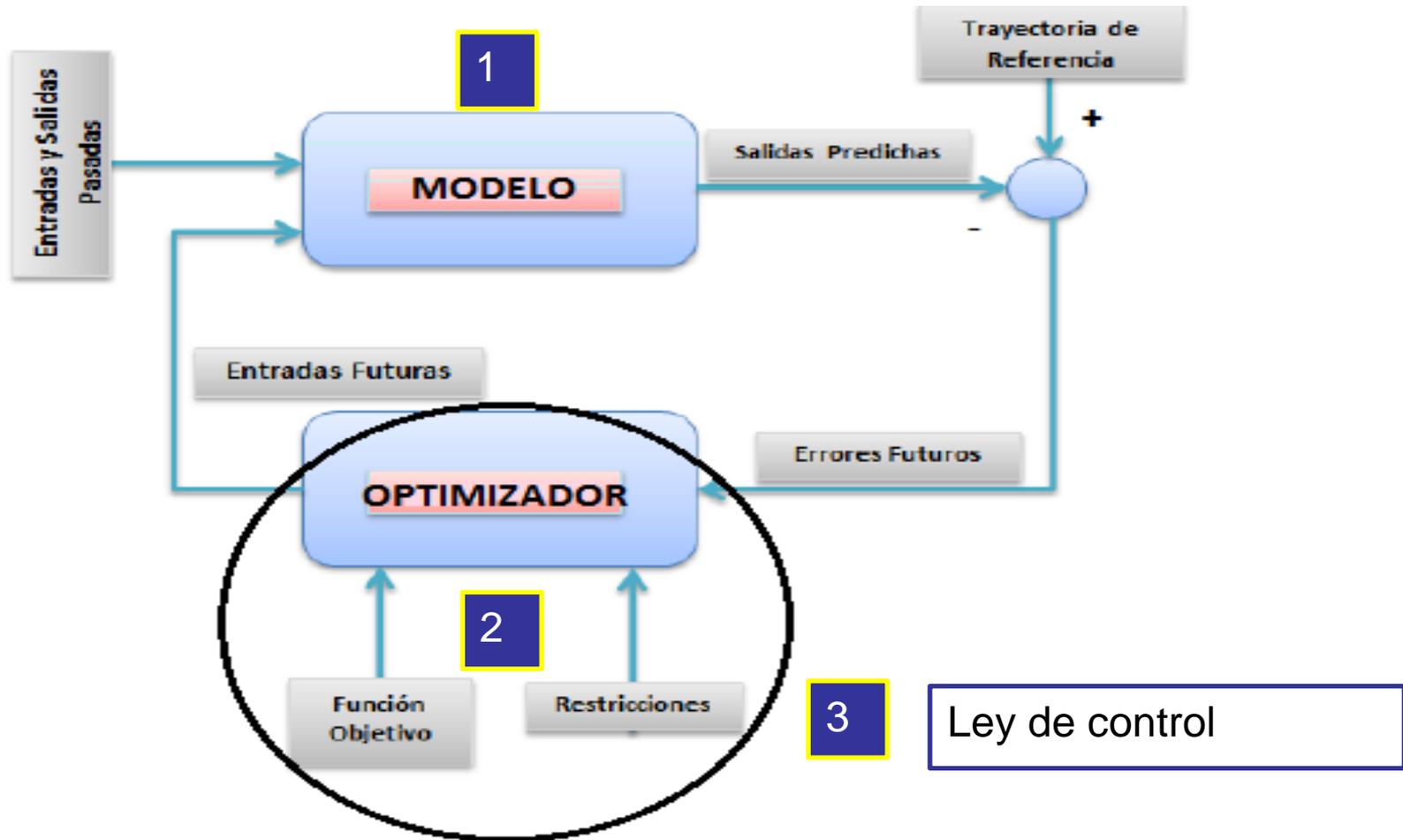
## Control avanzado

A continuación, se hace referencia a los controles más importantes en cuanto a la utilización y aplicación industrial:



# CONCEPTOS BÁSICOS

## Model Predictive Control (MPC)



# METODOLOGÍA DEL DESARROLLO DEL PROYECTO

MODELACIÓN DE LA PLANTA DE PRESIÓN



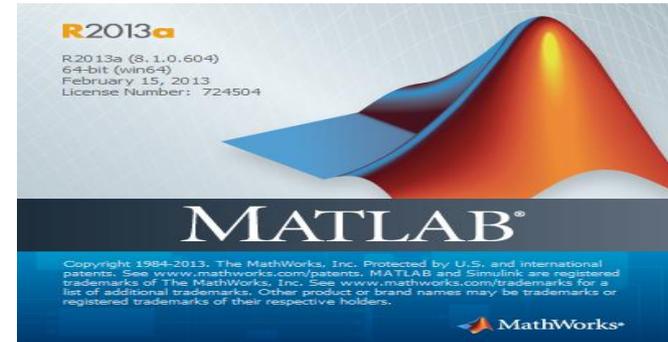
SIMULACIÓN DEL CONTROLADOR MPC



IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR MPC

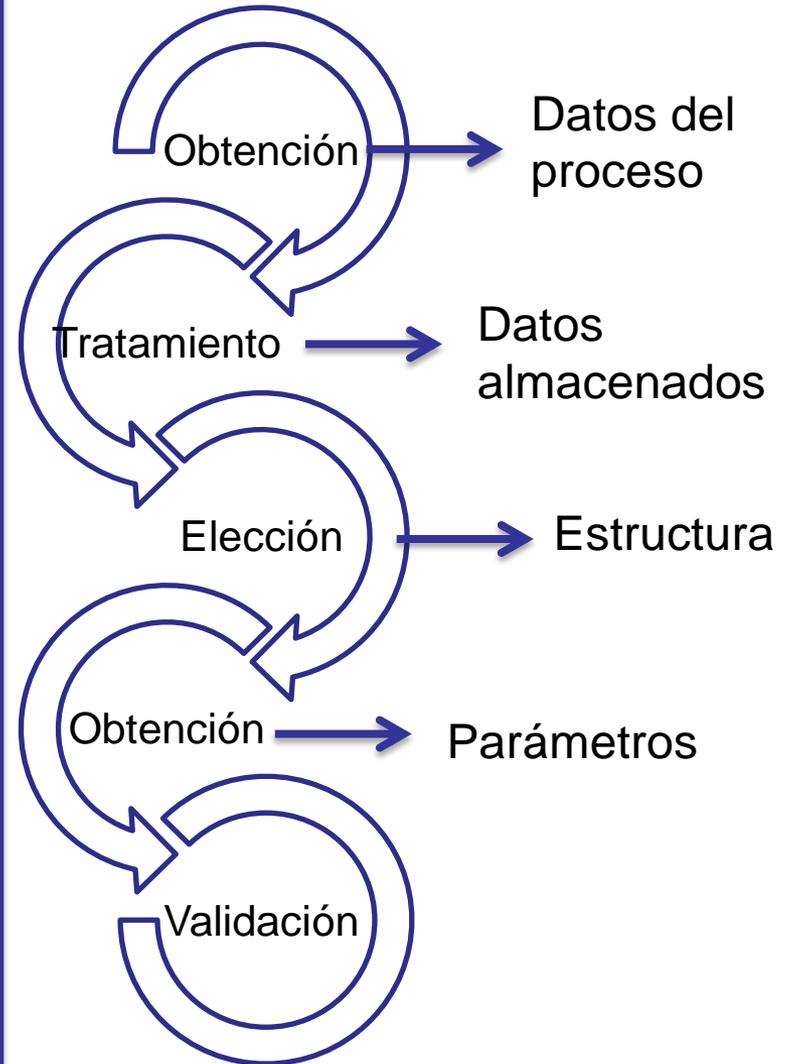
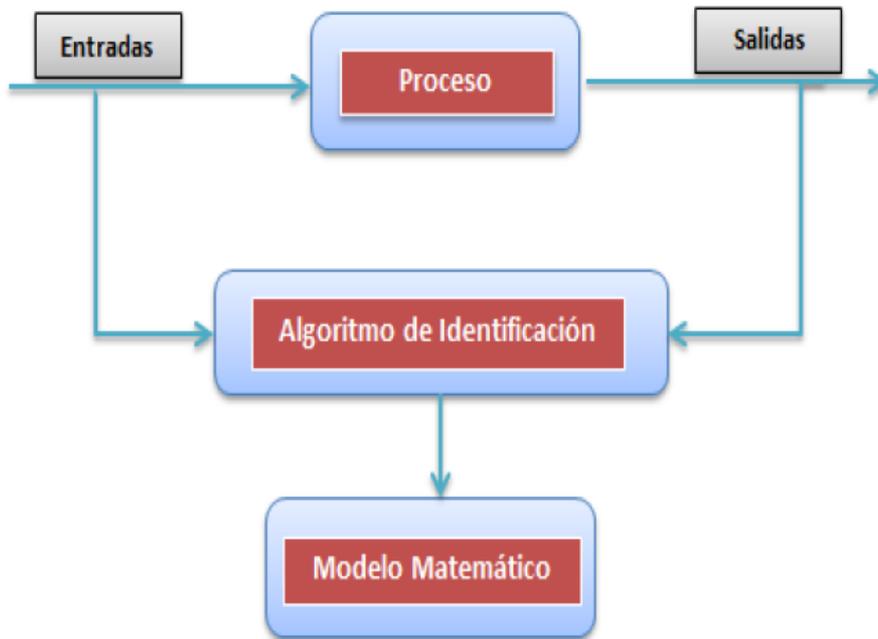


COMPARACIÓN DE CONTROLADORES PID vs. MPC



## Modelamiento

Identificación de  
Sistemas



## Modelamiento-Obtención de datos

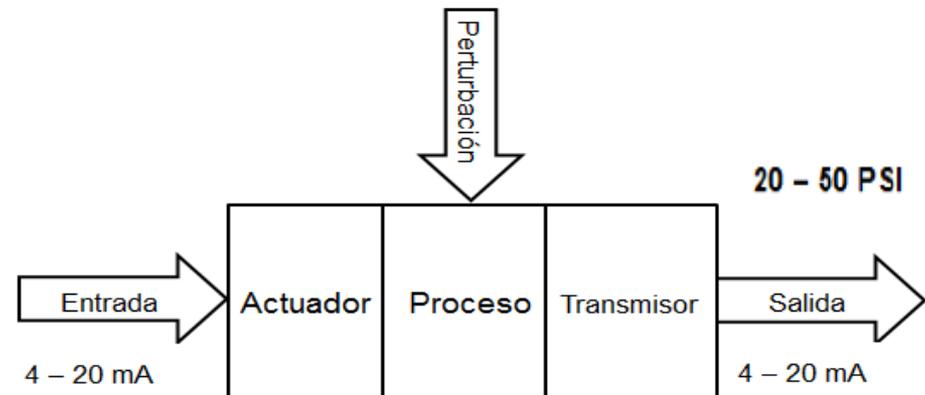
Se debe definir las señales a medir, el periodo de muestreo a utilizar, el tipo de entrada más adecuada, el número de datos a almacenar.



Señales a medir

Entrada: Conversor I/P (Válvula de control)

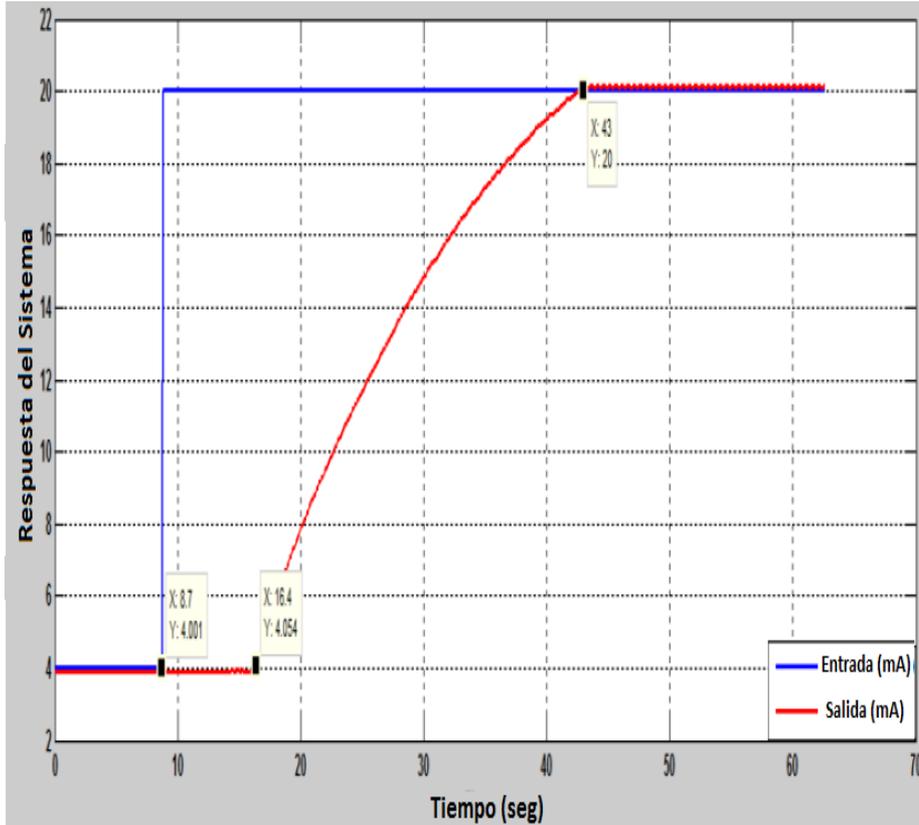
Salida: Transmisor de presión.



# METODOLOGÍA DEL DESARROLLO DEL PROYECTO

## Modelamiento-Obtención de datos-Periodo de muestreo

Dinámica del sistema

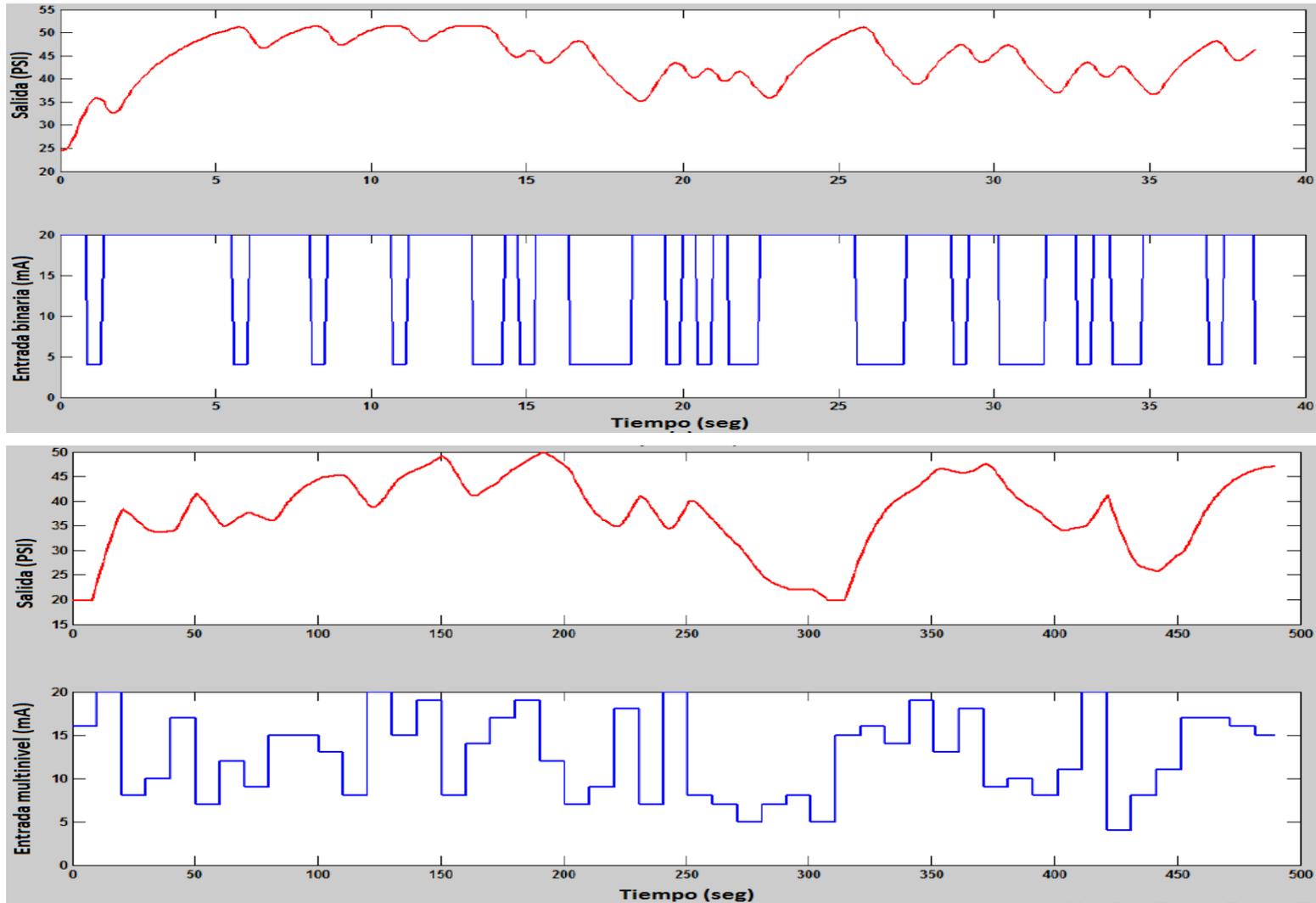


Tiempo muerto del sistema

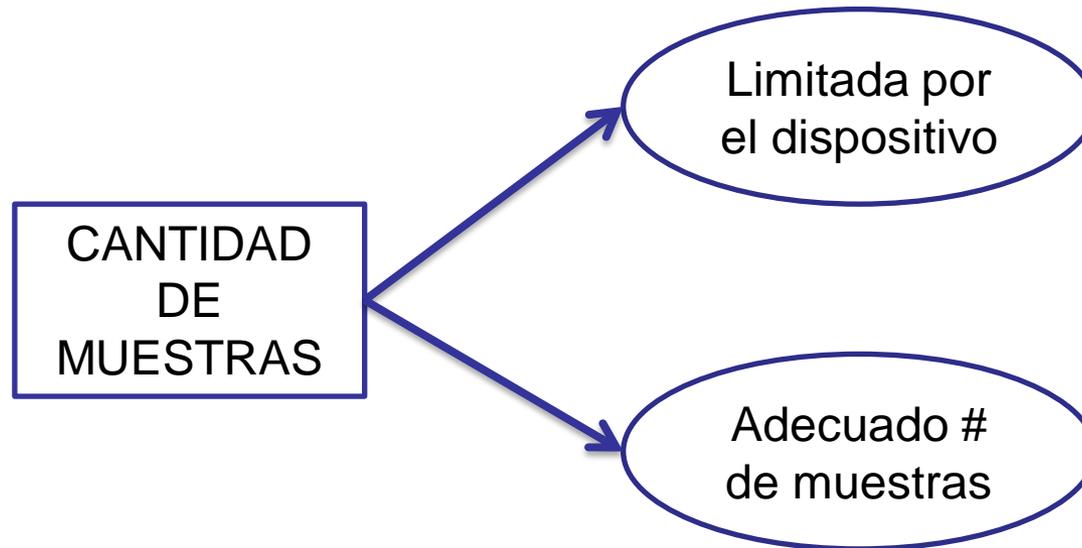
| Valor inicial (mA) | Valor final (mA) | Tiempo muerto (s) |
|--------------------|------------------|-------------------|
| 4                  | 20               | 0.5               |
| 20                 | 4                | 0.5               |
| 4                  | 12               | 0.2               |
| 12                 | 20               | 0.1               |
| 20                 | 12               | 0.2               |
| 12                 | 4                | 0.1               |
| Máximo             |                  | 0.5               |

$T_s = 0.1$  seg.  $\rightarrow$  realizado un promedio de 5 muestras

## Modelamiento-Obtención de datos-Tipo de entrada



## Modelamiento-Obtención de datos-Numero de muestras



$$\#muestras = t_{\text{Cambio}} * 100 * \frac{1}{T_s} .$$

$$\#muestras = 4 \text{ seg} * 100 * \frac{1}{0.1\text{seg}} \cong 4000 \text{ muestras}$$

## Modelamiento-Tratamiento de datos

| Entrada | Salida |   |   |
|---------|--------|---|---|
| 20      | 31,4   | → | Residuos o basura en la memoria.                  |
| 20      | 12,5   | } | Datos erróneos debido a Hardware.                 |
| 20      | 12,5   |   |   |
| 20      | 12,5   |   |   |
| 20      | 12,5   |   |   |
| 20      | 12,5   |   |   |
| 20      | 12,5   |   |   |
| 20      | 12,5   |   |   |
| 20      | 12,5   |   |   |
| 20      | 12,5   |   |   |
| 20      | 12,5   |   |   |
| 20      | 13,9   |   |   |
| 20      | 15,4   |   |   |
| 20      | 16,8   |   |   |
| 20      | 18,3   |   |   |
| 20      | 20     | } | Datos válidos para la identificación del sistema. |
| 20      | 20     |   |   |
| 20      | 20,1   |   |   |
| 20      | 20,3   |   |   |
| 20      | 20,4   |   |   |
| 20      | 20,6   |   |   |
| 20      | 20,6   |   |   |
| 20      | 20,8   |   |   |
| 20      | 20,8   |   |   |
| 20      | 21     |   |   |
| 20      | 21,1   |   |   |

## Modelamiento-Uso MATLAB

Ingreso de muestras

System Identification Tool - MODELOS

File Options Window Help

Import data

Operations

Preprocess

Working Data

Estimate -->

To Workspace To LTI Viewer

Trash

Import models

Modelos del sistema

Modelo1 Modelo2 Modelo3 Modelo4

Modelo5 Modelo6

Model Views

Model output Transient resp Nonlinear ARX

Model reside Frequency resp Hamm-Wiener

Zeros and poles

Noise spectrum

Muestra8 Validation Data

Data views

Time plot

Data spectra

Frequency function

Elección y obtención

Validación

## Modelamiento-Estructura del modelo

**Polynomial and State Space Models**

Structure: State Space: n

Orders: 4

Equation:  $x_{new} = Ax + Bu + Ke; y = Cx + Du + e$

Method:  PEM  N4SID

Domain:  Continuous  Discrete (0.1 seconds)

Feedthrough: false

Form: Free

Input delay: 0

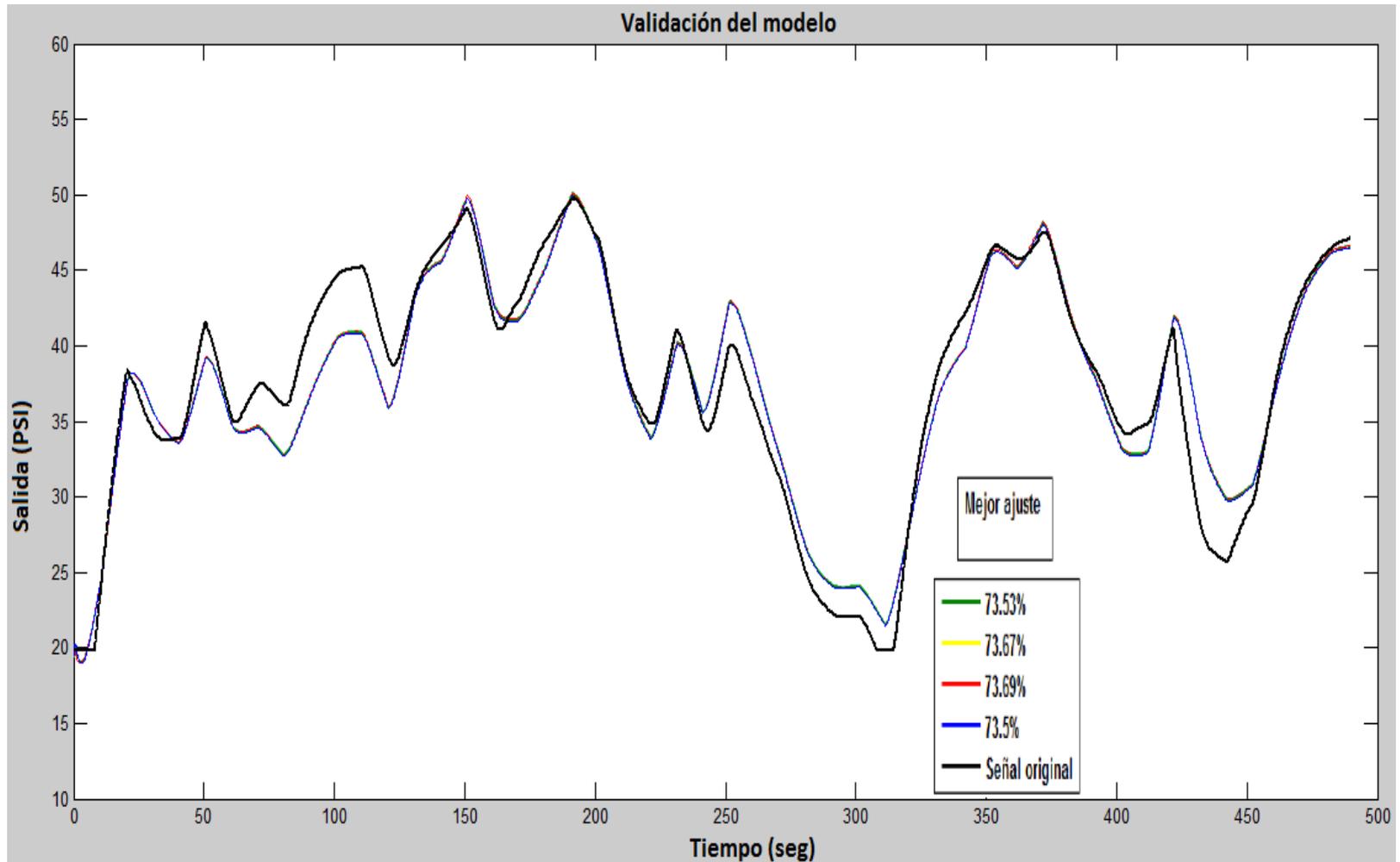
Name: n4s4

Focus: Prediction Initial state: Auto

Dist. model: Estimate K Covariance: Estimate

Display progress

## Modelamiento-Validación



## Modelamiento-Validación

| Datos     | Modelo Matemático | Porcentaje de ajuste (%) |
|-----------|-------------------|--------------------------|
| Muestra 1 | Modelo 1          | 66.76                    |
|           | Modelo 2          | 66.51                    |
|           | Modelo 3          | 37.29                    |
|           | Modelo 4          | 73.80                    |
|           | Modelo 5          | 74.02                    |
|           | Modelo 6          | <b>74.5</b>              |
| Muestra 2 | Modelo 1          | 72.50                    |
|           | Modelo 2          | 72.00                    |
|           | Modelo 3          | 73.50                    |
|           | Modelo 4          | 73.53                    |
|           | Modelo 5          | 73.67                    |
|           | Modelo 6          | <b>73.69</b>             |
| Muestra 3 | Modelo 1          | 33.09                    |
|           | Modelo 2          | 51.34                    |
|           | Modelo 3          | 36.37                    |
|           | Modelo 4          | 51.48                    |
|           | Modelo 5          | 51.58                    |
|           | Modelo 6          | <b>72.10</b>             |
| Muestra 4 | Modelo 1          | 69.61                    |
|           | Modelo 2          | 33.29                    |
|           | Modelo 3          | 70.00                    |
|           | Modelo 4          | 74.62                    |
|           | Modelo 5          | 79.19                    |
|           | Modelo 6          | <b>77.80</b>             |
| Muestra 5 | Modelo 1          | 52.55                    |
|           | Modelo 2          | 75.61                    |
|           | Modelo 3          | 79.00                    |
|           | Modelo 4          | 78.06                    |
|           | Modelo 5          | 75.82                    |
|           | Modelo 6          | <b>83.54</b>             |
| Muestra 6 | Modelo 1          | 31.99                    |
|           | Modelo 2          | 41.17                    |
|           | Modelo 3          | 51.60                    |
|           | Modelo 4          | 56.03                    |
|           | Modelo 5          | 55.25                    |
|           | Modelo 6          | <b>71.43</b>             |

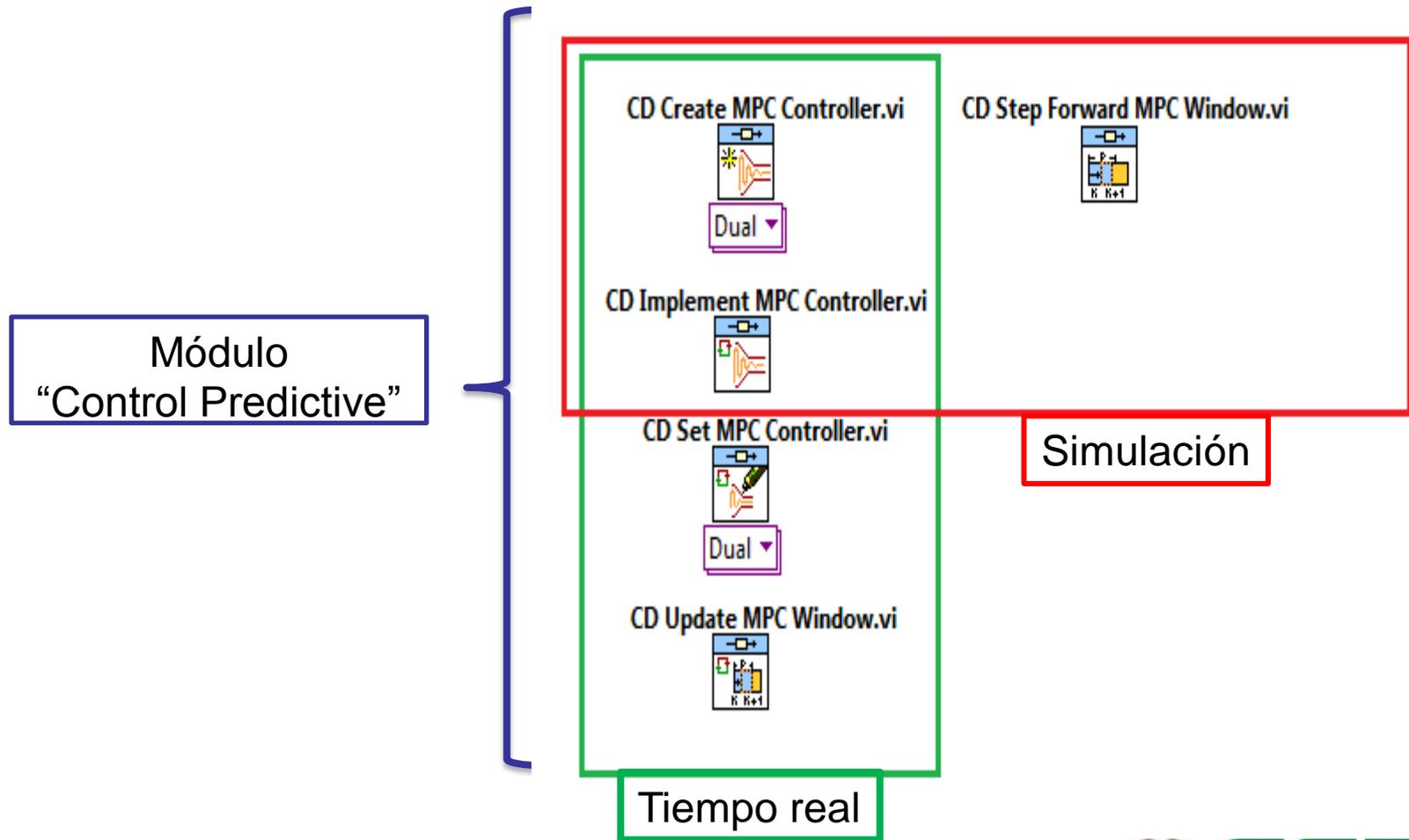
| Datos     | Modelo Matemático | Porcentaje de ajuste (%) |
|-----------|-------------------|--------------------------|
| Muestra 7 | Modelo 1          | 43.27                    |
|           | Modelo 2          | 59.84                    |
|           | Modelo 3          | 43.02                    |
|           | Modelo 4          | 73.76                    |
|           | Modelo 5          | 42.47                    |
|           | Modelo 6          | <b>80.11</b>             |
| Muestra 8 | Modelo 1          | 57.43                    |
|           | Modelo 2          | 56.07                    |
|           | Modelo 3          | 71.43                    |
|           | Modelo 4          | 66.58                    |
|           | Modelo 5          | 64.57                    |
|           | Modelo 6          | <b>67.31</b>             |

### Ecuación de Espacio de Estados

$$\mathbf{x}(k+1) = \begin{bmatrix} 0,997 & -0,00192 & 0,001094 & -0,0006972 & 0,0006194 \\ 0,0128 & 0,9767 & 0,1694 & -0,03913 & 0,1486 \\ -0,00171 & -0,001156 & 0,8249 & 0,828 & 0,07047 \\ -0,00196 & -0,008509 & -0,2021 & 0,4866 & 0,8741 \\ 0,0002688 & -0,08174 & 0,08783 & -0,2249 & -0,08174 \end{bmatrix} \mathbf{x}(k) + \begin{bmatrix} 6,53E-7 \\ -0,0003218 \\ -0,001092 \\ 0,0006197 \\ 0,0006769 \end{bmatrix} \mathbf{u}(k)$$

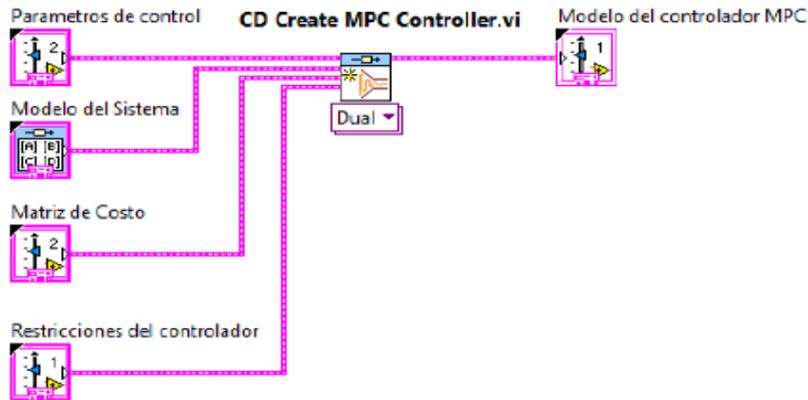
$$\mathbf{y}(k) = \begin{bmatrix} 1216 & -0,4435 & -0,6928 & 0,7518 & -0,7255 \end{bmatrix} \mathbf{x}(k) + \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} \mathbf{u}(k)$$

## Simulación-Módulo del control Predictivo



## Simulación-Módulo del control Predictivo

### Create MPC



### Parametros de Control

|                    |                                     |
|--------------------|-------------------------------------|
| Prediction Horizon | Control Horizon                     |
| 150                | 1                                   |
| Initial Window     | Integral Action?                    |
| 0                  | <input checked="" type="checkbox"/> |

### Restricciones del control

|                |               |
|----------------|---------------|
| u min init     | u min final   |
| 4,00<br>0,00   | 0,00<br>0,00  |
| u max init     | u max final   |
| 0,00<br>0,00   | 30,00<br>0,00 |
| y min init     | y min final   |
| 20,00<br>0,00  | 0,00<br>0,00  |
| y max init     | y max final   |
| 0,00<br>0,00   | 50,00<br>0,00 |
| du min init    | du min final  |
| -750,0<br>0,00 | 0,00<br>0,00  |
| du max init    | du max final  |
| 0,00<br>0,00   | 0,50<br>0,00  |

### Matriz de Costo

#### Output Error Weightings

|   |        |      |
|---|--------|------|
| 0 | 100,00 | 0,00 |
| 0 | 0,00   | 0,00 |

#### Control Action Change Weightings

|   |       |      |
|---|-------|------|
| 0 | 25,00 | 0,00 |
| 0 | 0,00  | 0,00 |

#### Control Action Error Weightings

|   |      |      |
|---|------|------|
| 0 | 0,00 | 0,00 |
| 0 | 0,00 | 0,00 |

### Modelo Espacio de Estados

|                           |               |
|---------------------------|---------------|
| Model name                | Sampling Time |
| Modelo_Presión            | 100m          |
| A                         | B             |
| 1    -0    0              | 6,53E-7    0  |
| 0,01    0,98    0,17      | -0    0       |
| -0    -0    0,82          | -0    0       |
| C                         | D             |
| 1,22E+3    -0,44    -0,69 | 0    0        |
| 0    0    0               | 0    0        |

## Simulación-Módulo del control Predictivo-**Función objetivo**

$$\begin{aligned} J(k) = & \sum_{i=Nw}^{Np} [\bar{y}(k+i|k) - r(k+i|k)]^T \cdot \mathbf{Q} \cdot [\bar{y}(k+i|k) - r(k+i|k)] \\ & + \sum_{i=0}^{Nc-1} [\Delta u^T(k+i|k) \cdot \mathbf{R} \cdot \Delta u(k+i|k)] \\ & + \sum_{i=Nw}^{Np} [u(k+i|k) - s(k+i|k)]^T \cdot \mathbf{N} \cdot [u(k+i|k) - s(k+i|k)] \end{aligned}$$

Sujeto a:

$$u_{min} \leq u(t) \leq u_{max}$$

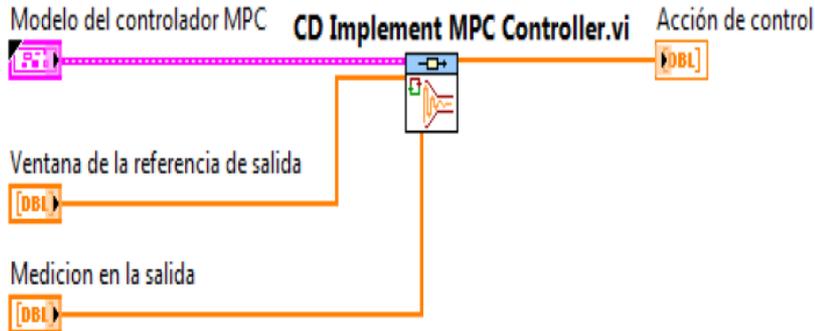
$$\Delta u_{min} \leq \Delta u \leq \Delta u_{max}$$

$$y_{min} \leq y \leq y_{max}$$

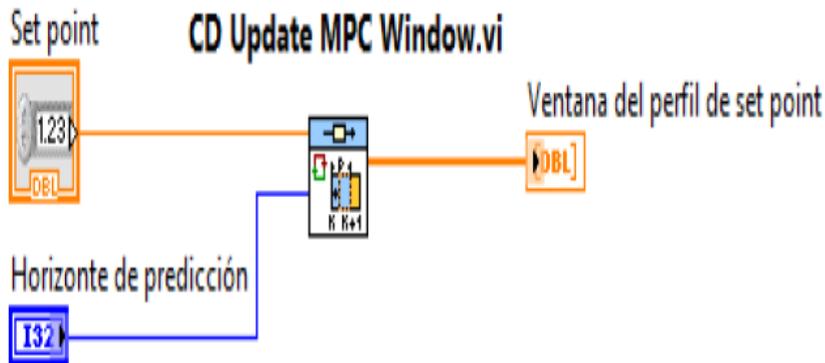
# METODOLOGÍA DEL DESARROLLO DEL PROYECTO

## Simulación-Módulo del control Predictivo

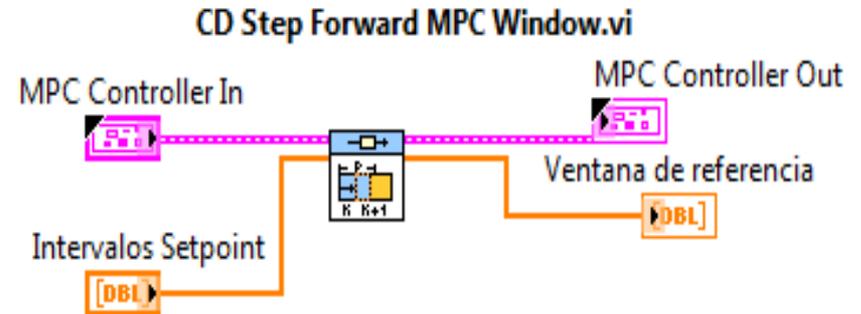
### Implement MPC



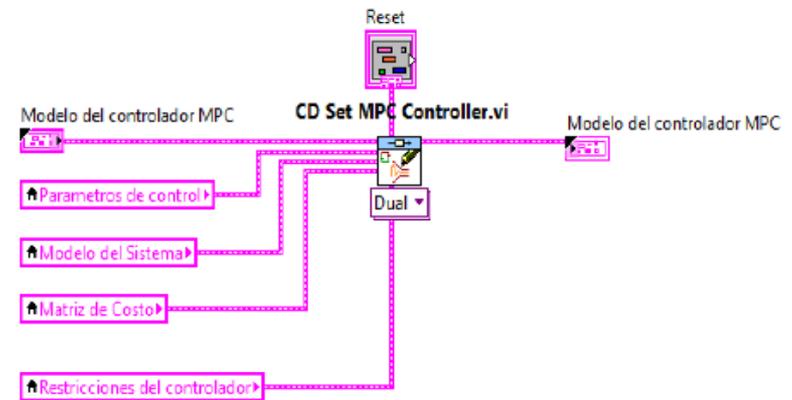
### Update MPC



### Step MPC



### Set MPC Controller

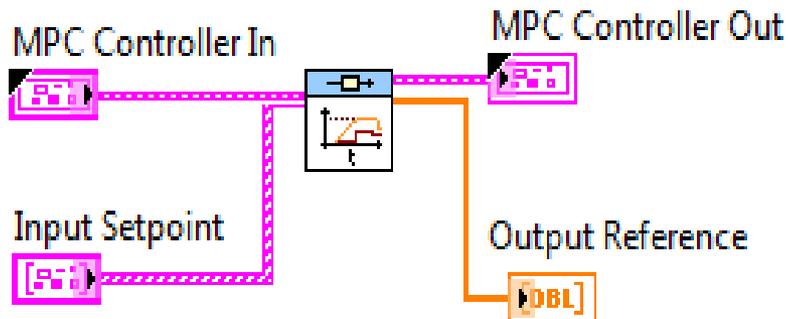


# METODOLOGÍA DEL DESARROLLO DEL PROYECTO

## Simulación-Módulo del control Predictivo- **subVI. adicionales**

### Profiles for MPC

CD Generate Time Profiles for MPC Simulation.vi

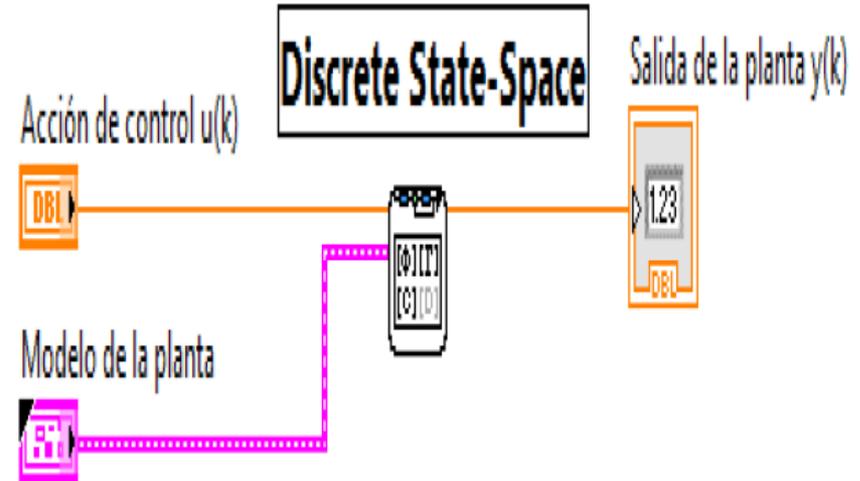


Setpoint

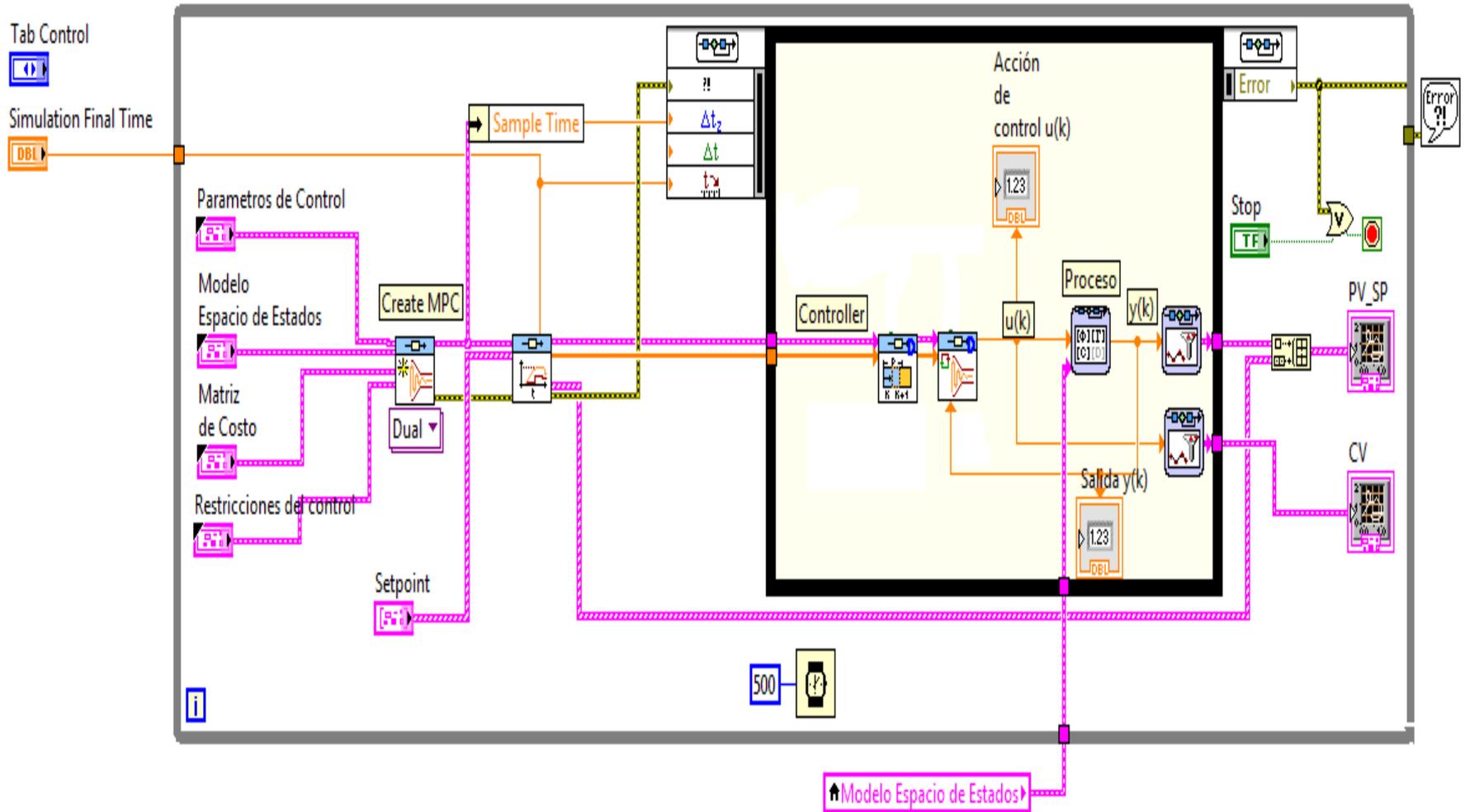
| Profile  |           |
|----------|-----------|
| time (s) | Reference |
| 0,000    | 20,00     |
| 50,000   | 35,00     |
| 100,000  | 50,00     |
| 150,000  | 30,00     |

### Discrete State-Space

Permite simular el comportamiento de la planta real, para este caso representa la dinámica de la planta de presión.

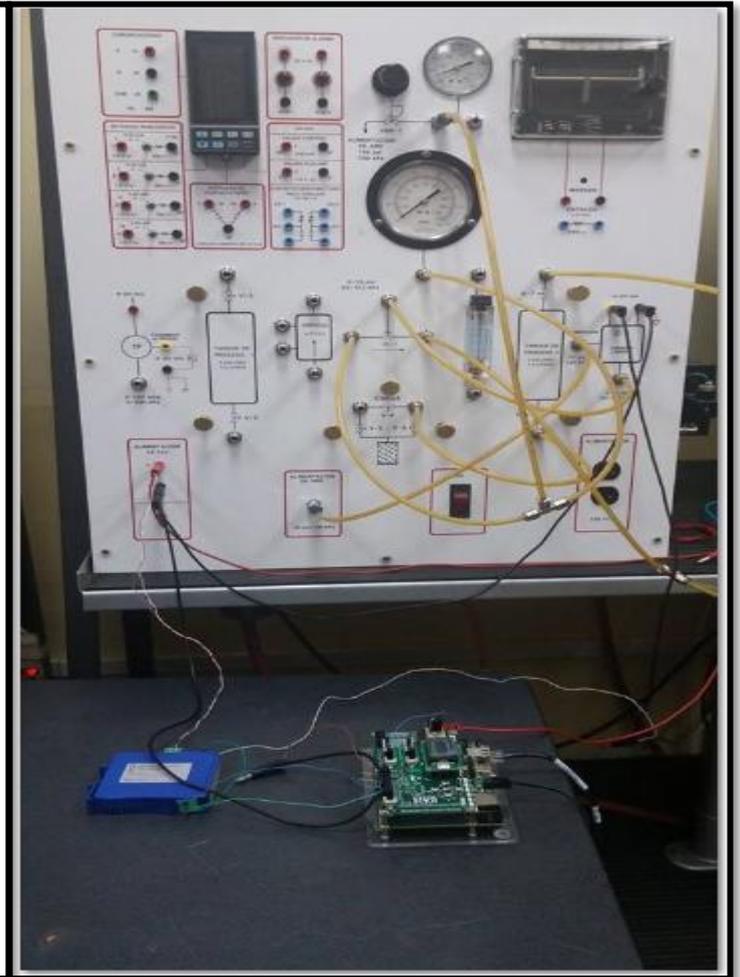
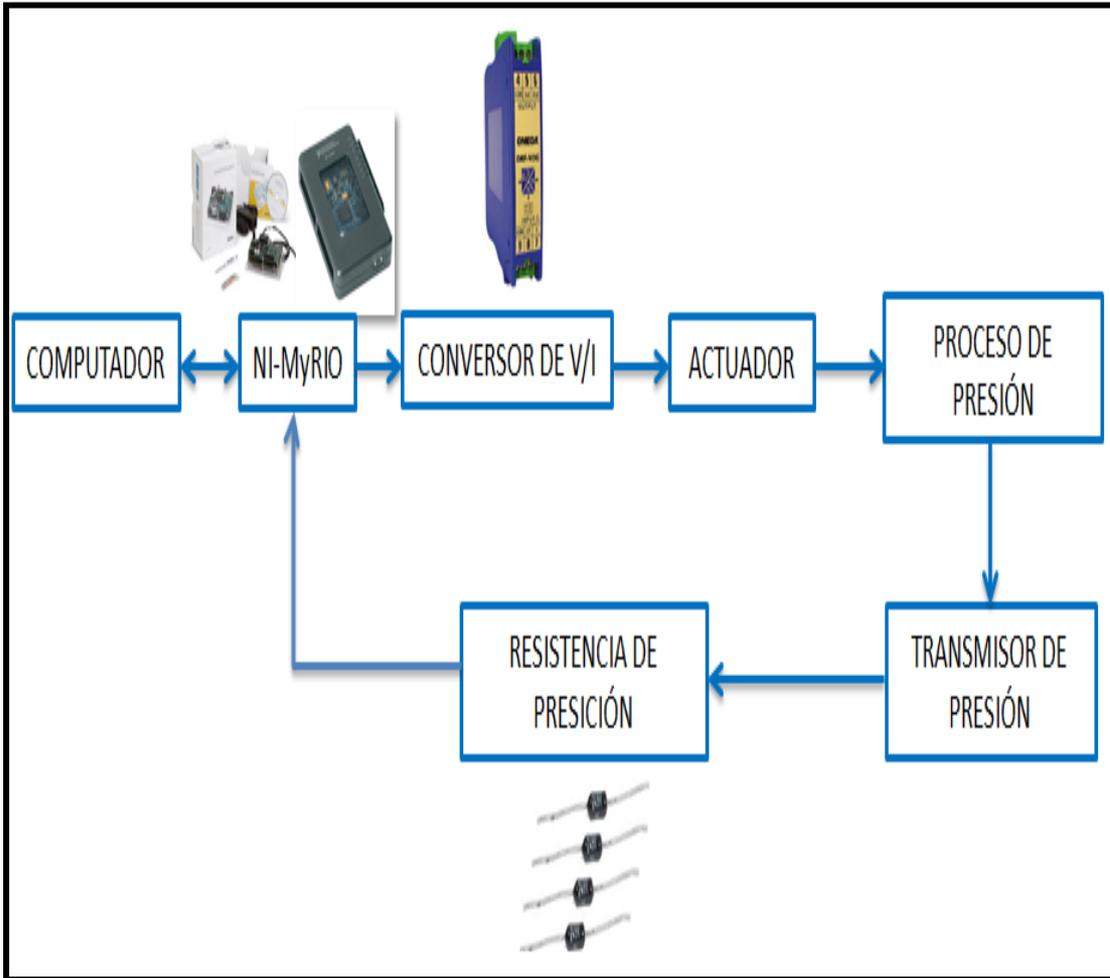


## Simulación-Módulo del control Predictivo- Programa



# METODOLOGÍA DEL DESARROLLO DEL PROYECTO

## Implementación-Controlador Predictivo- Hardware



## Implementación-Controlador Predictivo- Software

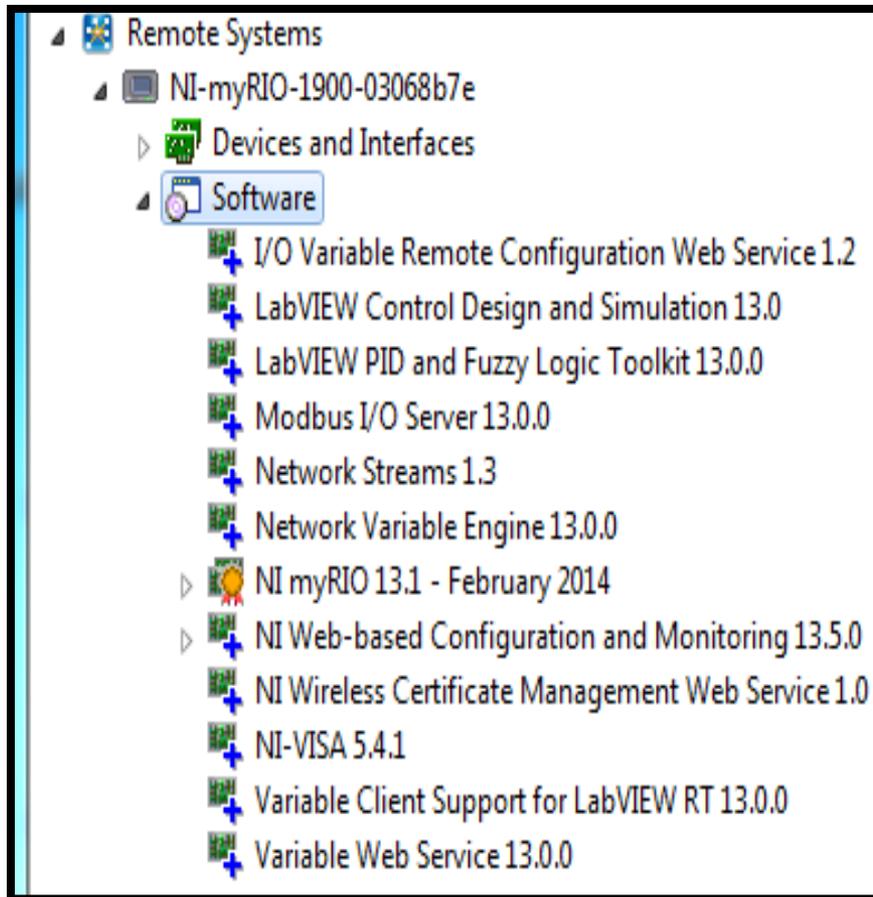


Figura (a)

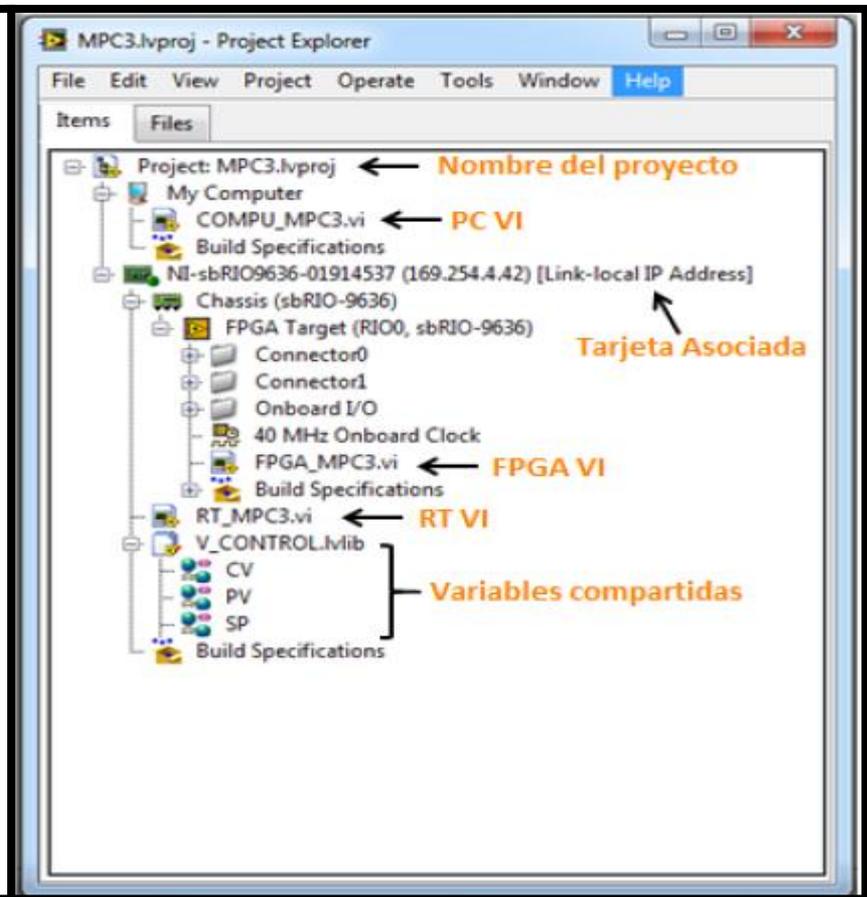
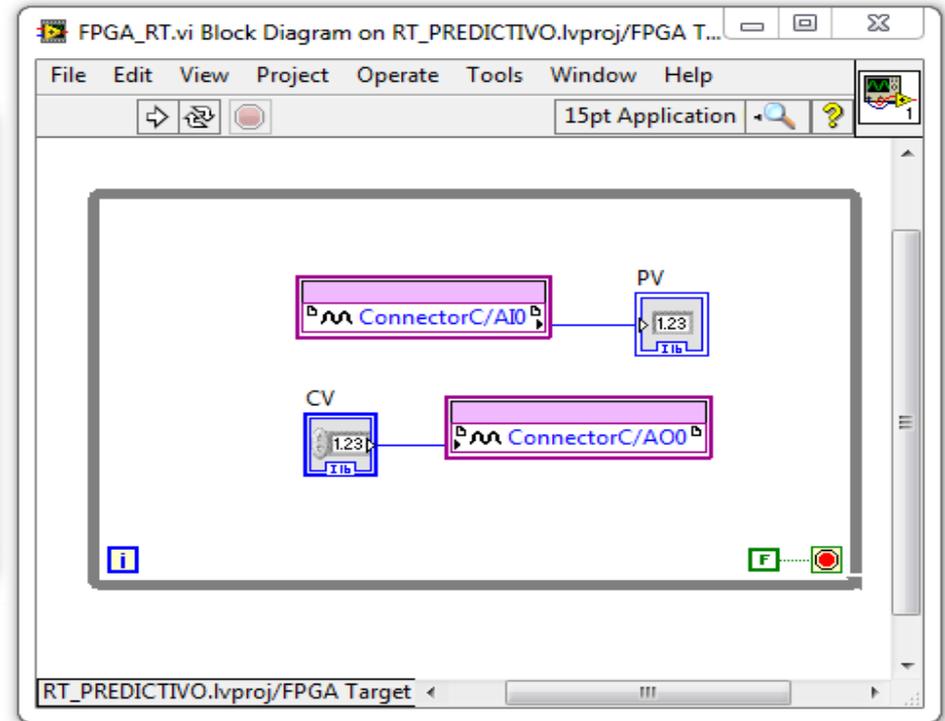


Figura (b)

# METODOLOGÍA DEL DESARROLLO DEL PROYECTO

## Implementación-Controlador Predictivo- Software-Programación FPGA



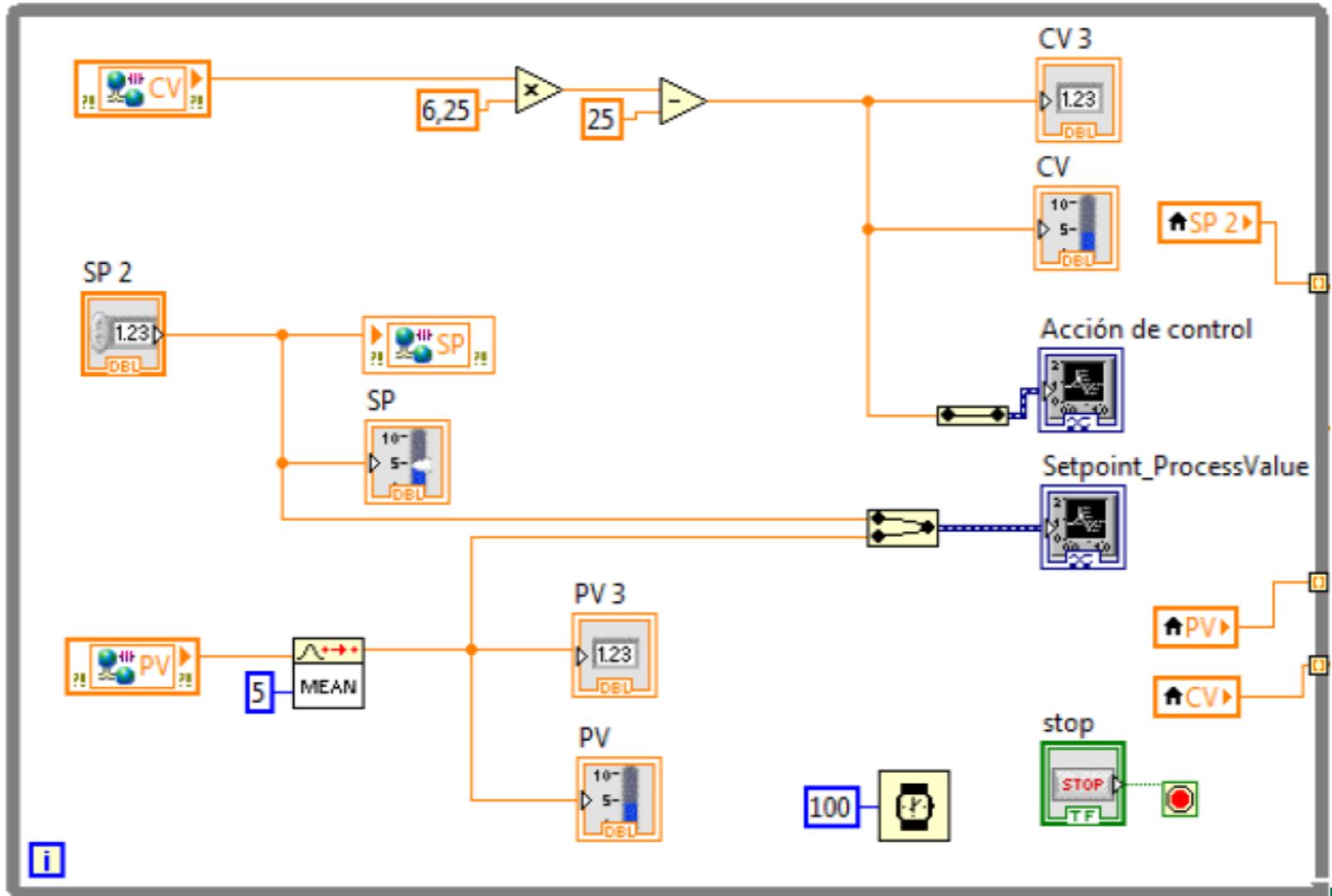
$$V = \#bits * 0,00483 \rightarrow \text{Entrada}$$

$$\#bits = \frac{V}{0,00483} \rightarrow \text{Salida}$$



# METODOLOGÍA DEL DESARROLLO DEL PROYECTO

Implementación-Controlador Predictivo- Software-Programación en la PC



# RESULTADOS OBTENIDOS

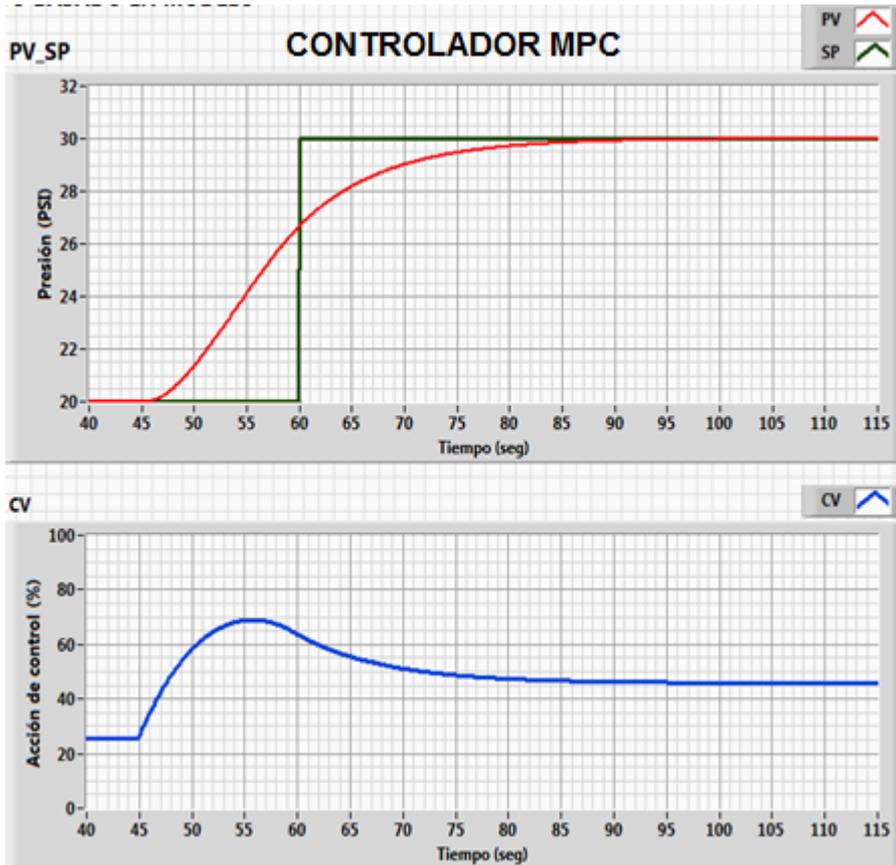
Simulación-Obtención de los parámetros adecuados para la sintonización de los controladores.

| Indicadores                     | Horizonte de Control |           |      |      |      |      |                          |
|---------------------------------|----------------------|-----------|------|------|------|------|--------------------------|
|                                 | 4                    | 20        | 50   | 100  | 150  | 200  | 250                      |
| Sobreimpulso (%)                | 1.56                 | 2.13      | 2.66 | 2.33 | 0.66 | 0.2  | Procesamiento muy grande |
| Tiempo de establecimiento (seg) | Inestable            | Inestable | 36.1 | 33.5 | 22.9 | 25.3 |                          |

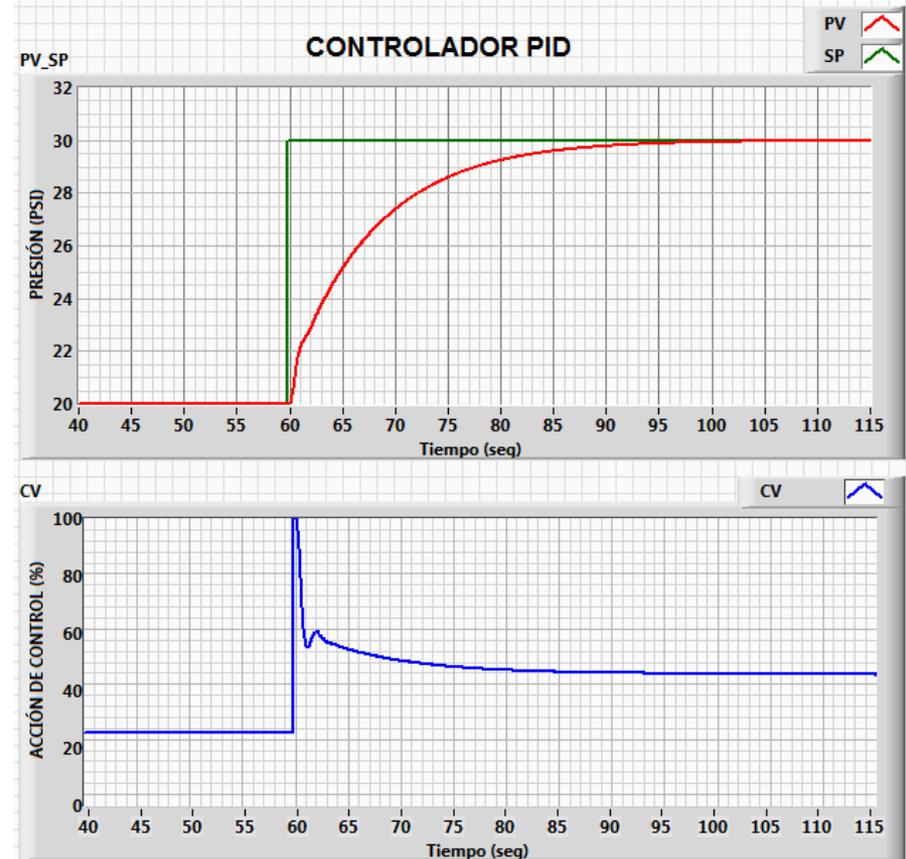
| MPC                     |                              |        |
|-------------------------|------------------------------|--------|
| Parámetros de control   | Horizonte de predicción (Hp) | 150    |
|                         | Horizonte de control (Hc)    | 1      |
| Matrices de ponderación | Q                            | 100    |
|                         | R                            | 25     |
| PID                     |                              |        |
| Ganancias               | Kc                           | 10.50  |
|                         | Ti                           | 0.14   |
|                         | Td                           | 0.0000 |

# RESULTADOS OBTENIDOS

## Simulación-Comparación-MPC vs. PID



Gráfica (a)



Gráfica (b)

# RESULTADOS OBTENIDOS

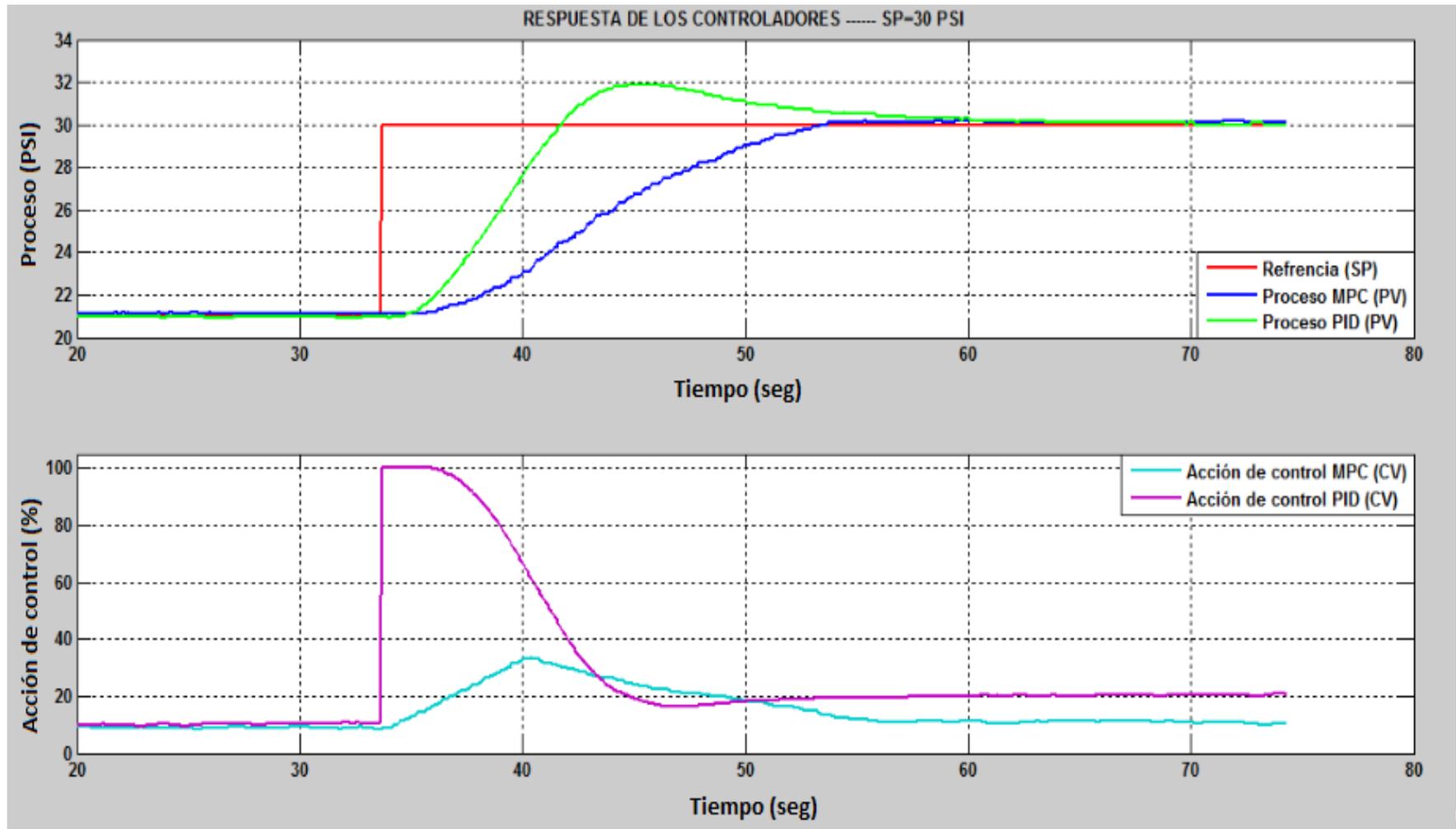
## Simulación-Comparación-Tabla MPC vs. PID

| Referencia<br>"SP" (PSI) | MPC              |                                | PID              |                                 |
|--------------------------|------------------|--------------------------------|------------------|---------------------------------|
|                          | Sobreimpulso (%) | Tiempo de establecimiento(seg) | Sobreimpulso (%) | Tiempo de establecimiento (seg) |
| 20-30                    | 0                | 42                             | 0                | 46                              |
| 30-40                    | 0                | 35                             | 0                | 36                              |
| 40-50                    | 0                | 40                             | 0                | 41                              |
| 20-50                    | 0                | 40                             | 0                | 44                              |
| 50-35                    | 0                | 35                             | 0                | 42                              |
| 35-20                    | 0                | 35                             | 0                | 40                              |
| Promedio                 | 0                | 37.8                           | 0                | 41.5                            |

| Referencia<br>"SP" (PSI) | MPC                      | PID                      |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
|                          | Acción de control (CV) % | Acción de control (CV) % |
| 20-30                    | 55.7                     | 87.5                     |
| 30-40                    | 76.9                     | 82.6                     |
| 40-50                    | 92                       | 92.3                     |
| 20-50                    | 92                       | 92.3                     |
| 50-35                    | 65.3                     | 76.9                     |
| 35-20                    | 63.4                     | 63.4                     |
| Promedio                 | 58                       | 82.5                     |

# RESULTADOS OBTENIDOS

## Tiempo real-Comparación-MPC vs. PID



# RESULTADOS OBTENIDOS

## Tiempo real-Comparación-Tabla MPC vs. PID

|                                   |                  | TIPO DE CONTROL |                                 |      |      |
|-----------------------------------|------------------|-----------------|---------------------------------|------|------|
|                                   |                  | MPC             | PID                             | MPC  | PID  |
| Indicadores<br>Referencia<br>"SP" | Sobreimpulso (%) |                 | Tiempo de establecimiento (seg) |      |      |
|                                   | 20_30            | 0.33            | 6.33                            | 20.1 | 28.6 |
| 30-40                             | 0                | 3               | 22.3                            | 28.2 |      |
| 40_50                             | 0                | 1.2             | 29.6                            | 50.4 |      |
| 20_50                             | 0                | 1.2             | 50,4                            | 61.5 |      |
| 50_35                             | 0                | 0               | 37.1                            | 28.4 |      |
| 35_20                             | 0                | 0               | 29,6                            | 30.8 |      |
| Promedio                          | 0.055            | 1.95            | 31.5                            | 37.9 |      |

|                          | MPC                      | PID                      |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Referencia<br>"SP" (PSI) | Acción de control (CV) % | Acción de control (CV) % |
| 20-30                    | 13                       | 22.5                     |
| 30-40                    | 20.5                     | 43.2                     |
| 40-50                    | 35.3                     | 71                       |
| 20-50                    | 67.3                     | 71                       |
| 50-35                    | 22.2                     | 40.4                     |
| 35-20                    | 8.5                      | 18.6                     |
| Promedio                 | 27.8                     | 44.45                    |

# CONCLUSIONES

- ❑ El controlador MPC no posee una **metodología para la sintonización**.
- ❑ El **modelo del proceso** debe contener la mayor información posible sobre la dinámica del sistema porque de esto depende el desempeño óptimo y precisión del controlador predictivo.
- ❑ El MPC implementado permite manejar **restricciones reales** del sistema los cuales son utilizados para el cálculo de la ley de control y así optimizar sus recursos.
- ❑ Se puede apreciar, de acuerdo a los resultados obtenidos, que el control MPC tiene mejor **comportamiento dinámico**, ya que presenta un tiempo establecimiento y Sobreimpulso menor que el control PID.
- ❑ Como todo controlador avanzando el MPC tiene la función de optimizar los recursos, en este caso permite optimizar el **rendimiento del actuador** el cual se ve reflejado en el porcentaje de acción de control utilizado para abrir y cerrar la válvula de control, permitiendo así extender la vida útil del actuador.
- ❑ Frente a **perturbaciones** ambos controladores responde de manera eficiente a la introducción de este tipo de señal.

# RECOMENDACIONES

- ❑ Debido a que la implementación de los controladores avanzados son escasos en la Universidad, se recomienda la investigación de este tipo de controlador (MPC) y entre otros para poder implementarlos en las plantas de procesos del Laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos con lo cual se logra conocimientos necesarios para el campo industrial.
- ❑ Antes de poner en ejecución al controlador, las restricciones mínimas del MPC deben estar en valores iniciales igual a cero, con esto se evita la confusión del controlador al creer que las restricciones se infringieron.
- ❑ Se recomienda activar el parámetro de acción integral del MPC debido a que dicho parámetro permite mejorar la diferencia existente entre la planta real y el modelo de la planta.

# INGENIERÍA ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN

