



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS

INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO DE CONTROL PREDICTIVO MULTIVARIABLE DE TEMPERATURA Y NIVEL PARA LA ESTACIÓN DE CONTROL DE PROCESOS FESTO EN EL LABORATORIO DE MECATRÓNICA

## INGENIERÍA MECATRÓNICA

**Autores:** Diego Bolaños Paredes  
Luis Mayorga Miranda

**Director:** Ing. Marco Singaña  
**Codirector:** Ing. Wilson Travez

# AGENDA

INTRODUCCIÓN

ANTECEDENTES

OBJETIVOS

CONCEPTOS BÁSICOS

METODOLOGÍA DEL DESARROLLO DEL PROYECTO

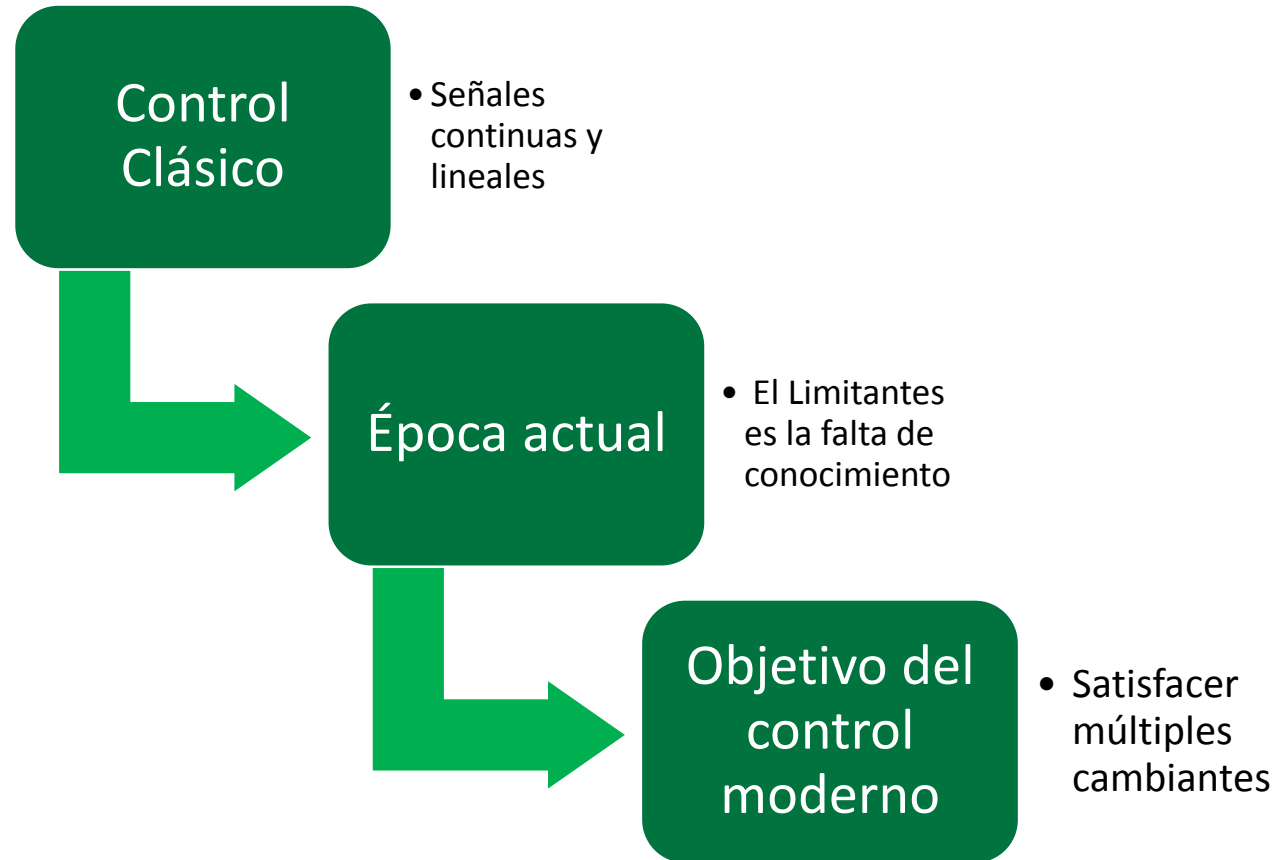
ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES



# INTRODUCCIÓN



# ANTECEDENTES

Variables  
dependientes

No  
representan  
sistemas  
dinámicos  
complejos

El punto de  
Ajuste está  
lejos



# OBJETIVOS

## GENERAL

- Diseñar e implementar un algoritmo de control predictivo multivariable de temperatura y nivel para en la estación de control de procesos FESTO en el Laboratorio de Mecatrónica.



# OBJETIVOS

## ESPECÍFICOS

- Investigar y extraer información necesaria sobre controladores avanzados y sus elementos básicos.
- Realizar el modelamiento de la planta
- Determinar la función objetivo para optimizar la planta.
- Establecer los límites y restricciones de la planta
- Diseñar un algoritmo de control predictivo multivariable
- Implementar el algoritmo de control predictivo usando el dispositivo NI myRIO.
- Verificar el correcto funcionamiento de la planta.
- Comparar con otro controlador tradicional.

# CONCEPTOS BÁSICOS

Control avanzado



modifica las condiciones de operación, a través de un modelo matemático que lo describa en forma bastante aproximada.



Útil cuando existen procesos con mayor grado de complejidad.

# CONCEPTOS BÁSICOS

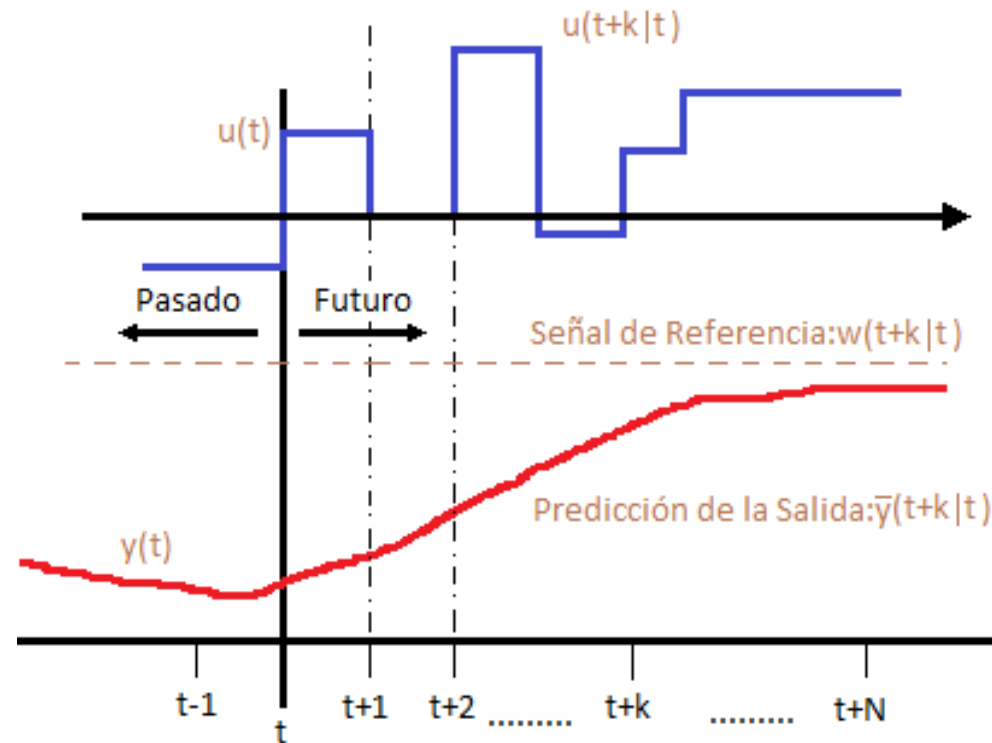
## Control Predictivo Basado en Modelo (MPC)

El sistema utiliza un modelo matemático del proceso para predecir el comportamiento del sistema en el futuro frente a posibles acciones de control a aplicar.



# CONCEPTOS BÁSICOS

## Estrategia de control

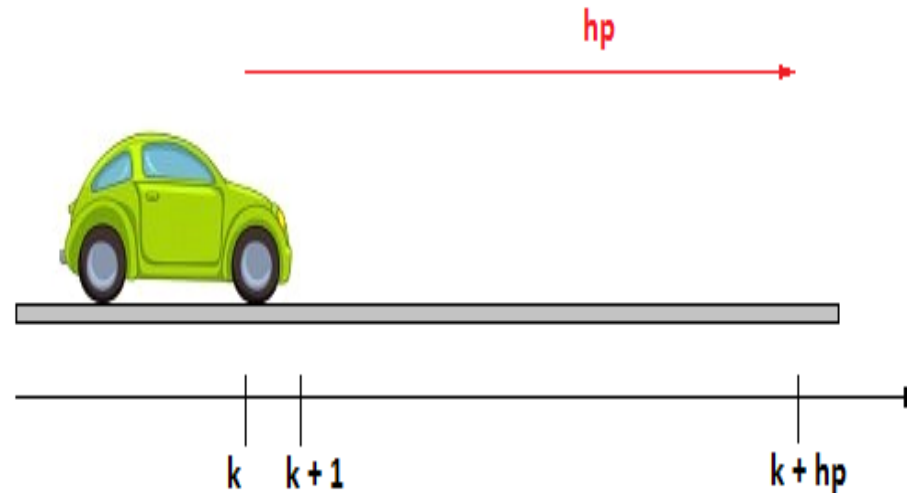


# CONCEPTOS BÁSICOS

## Control Predictivo Basado en Modelo (MPC)

$k$  = instante inicial de tiempo

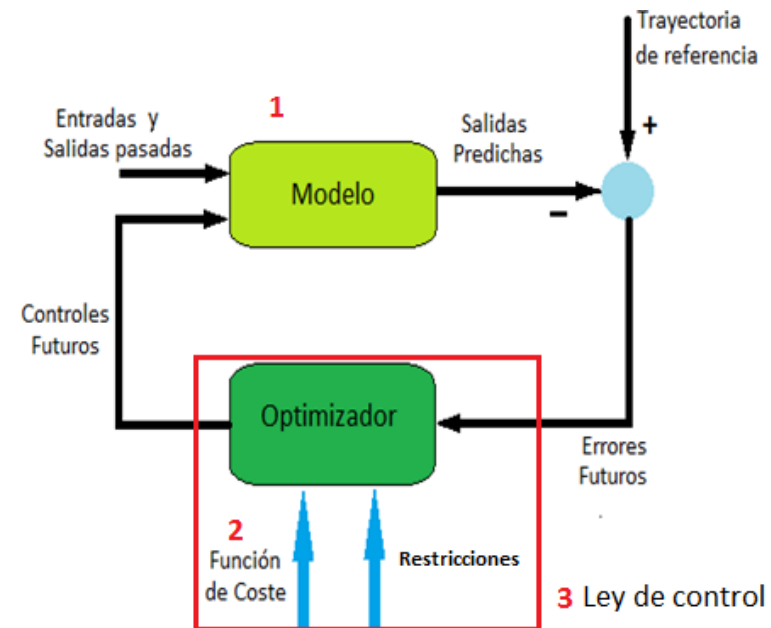
$h_p$  = horizonte de tiempo finito



# CONCEPTOS BÁSICOS

## Elementos del MPC

- 1 Modelo de la Predicción
- 2 Función Objetivo
- 3 Ley de Control



# CONCEPTOS BÁSICOS

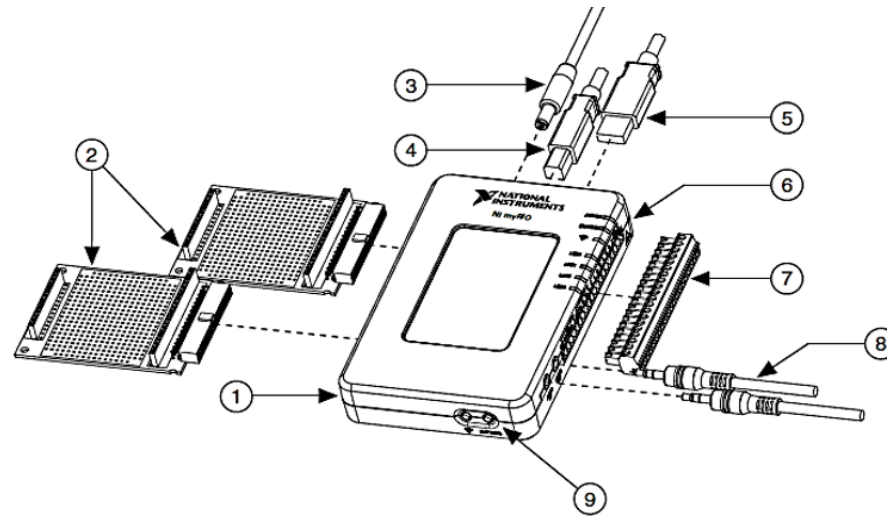
## Función Objetivo o de Coste

$$\begin{aligned} J(k) = & \sum_{i=N_w}^{N_p} [\hat{y}(k+i|k) - r(k+i|k)]^T \cdot Q \cdot [\hat{y}(k+i|k) - r(k+i|k)] \\ & + \sum_{i=0}^{N_c-1} [\Delta u^T(k+i|k) \cdot R \cdot \Delta u(k+i|k)] \\ & + \sum_{i=N_w}^{N_p} [u(k+i|k) - s(k+i|k)]^T \cdot N \cdot [u(k+i|k) - s(k+i|k)] \end{aligned}$$



# METODOLOGÍA DEL DESARROLLO DEL PROYECTO

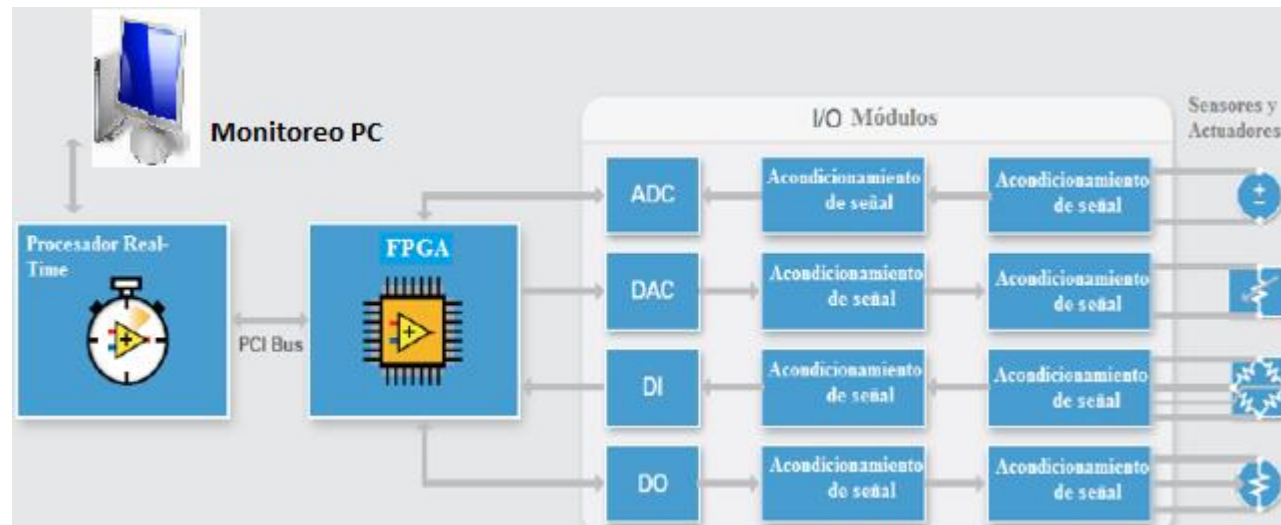
## Tarjeta NI myRIO -1900



- |                                   |                                       |
|-----------------------------------|---------------------------------------|
| 1 NI my RIO-1900                  | 6 LEDs                                |
| 2 Puerto de Expansión myRIO (MXP) | 7 Puerto de Minisistema de Conectores |
| 3 Cable de Alimentación           | 8 Cables de entrada y salida se audio |
| 4 Cable del Dispositivo USB       | 9 Botón0                              |
| 5 Cable del Servidor USB          |                                       |

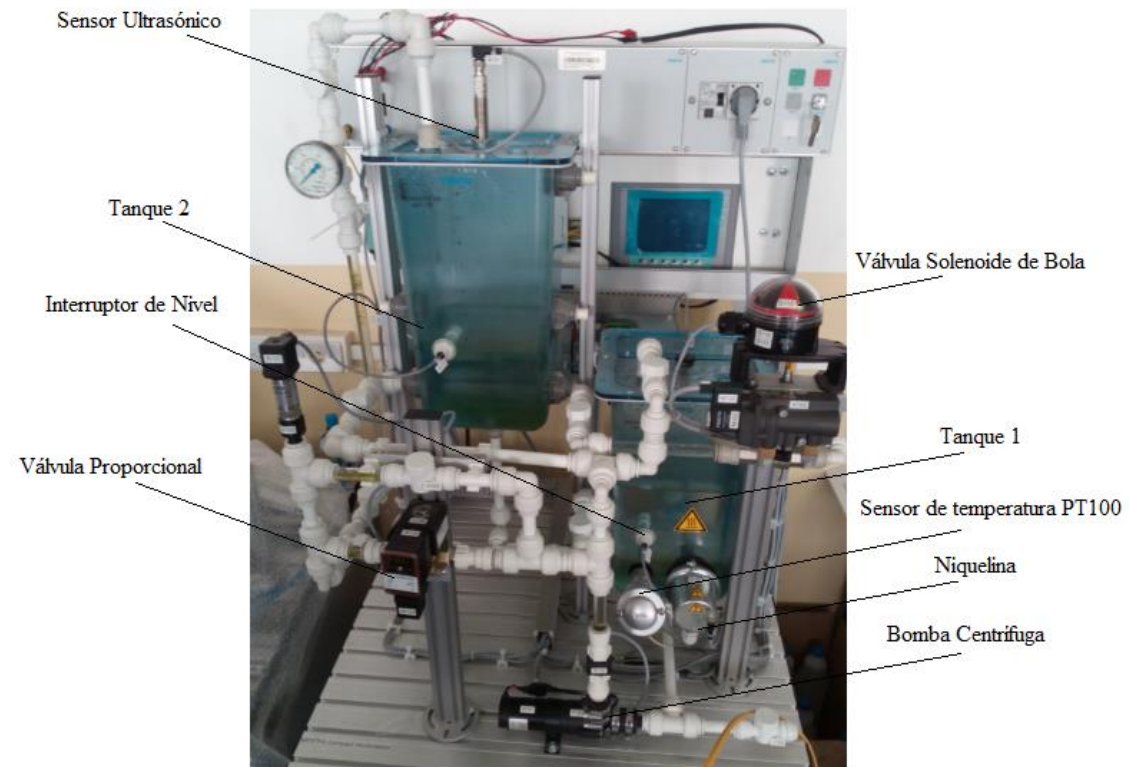
# METODOLOGÍA DEL DESARROLLO DEL PROYECTO

## Arquitectura de la tarjeta



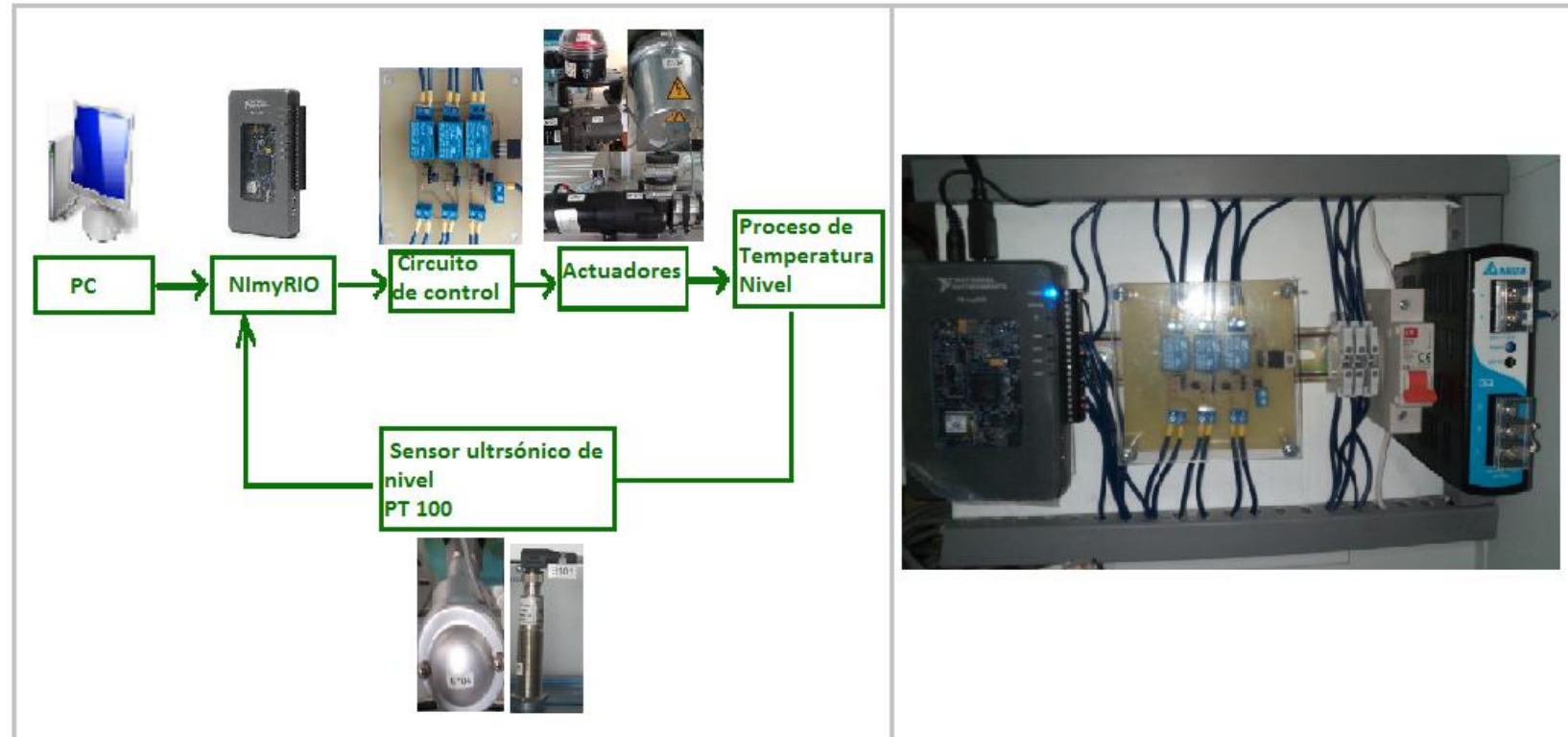
# METODOLOGÍA DEL DESARROLLO DEL PROYECTO

## Planta de Procesos FESTO



# METODOLOGÍA DEL DESARROLLO DEL PROYECTO

## Implementación del Hardware





# METODOLOGÍA DEL DESARROLLO DEL PROYECTO



Modelamiento de la planta de procesos

Simulación del controlador MPC

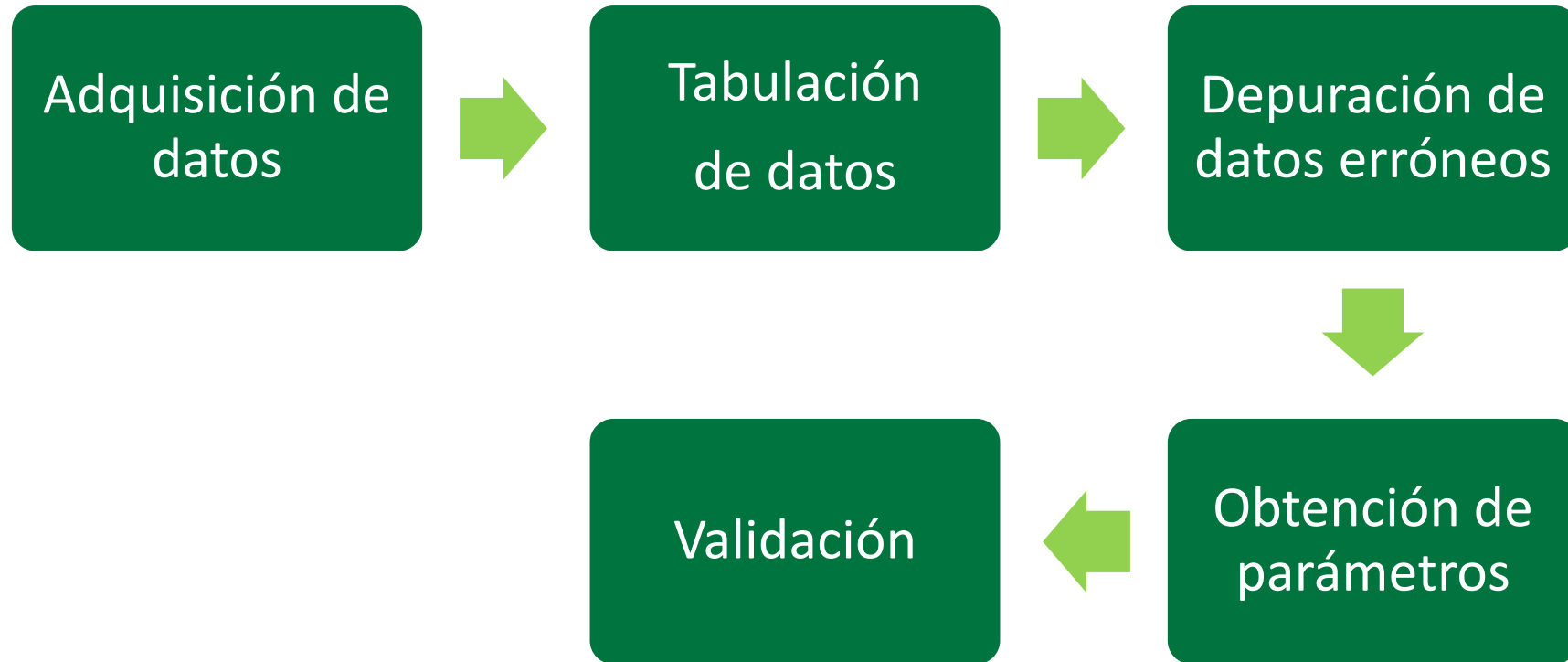
Implementación del controlador MPC

Comparación de controladores MPC vs PID



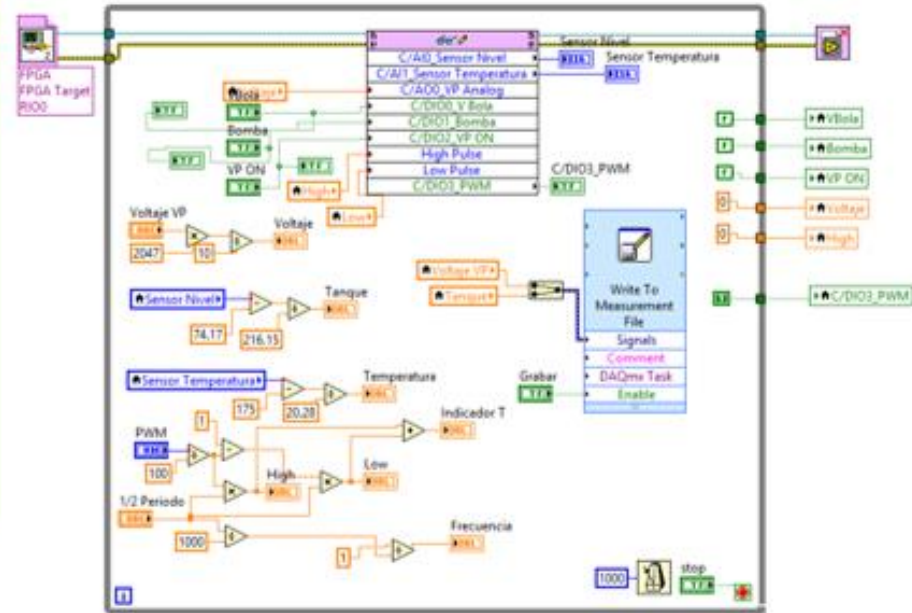
# METODOLOGÍA DEL DESARROLLO DEL PROYECTO

## Modelamiento



# METODOLOGÍA DEL DESARROLLO DEL PROYECTO

## Adquisición de Datos



# METODOLOGÍA DEL DESARROLLO DEL PROYECTO

## Tabulación y depuración de datos erróneos

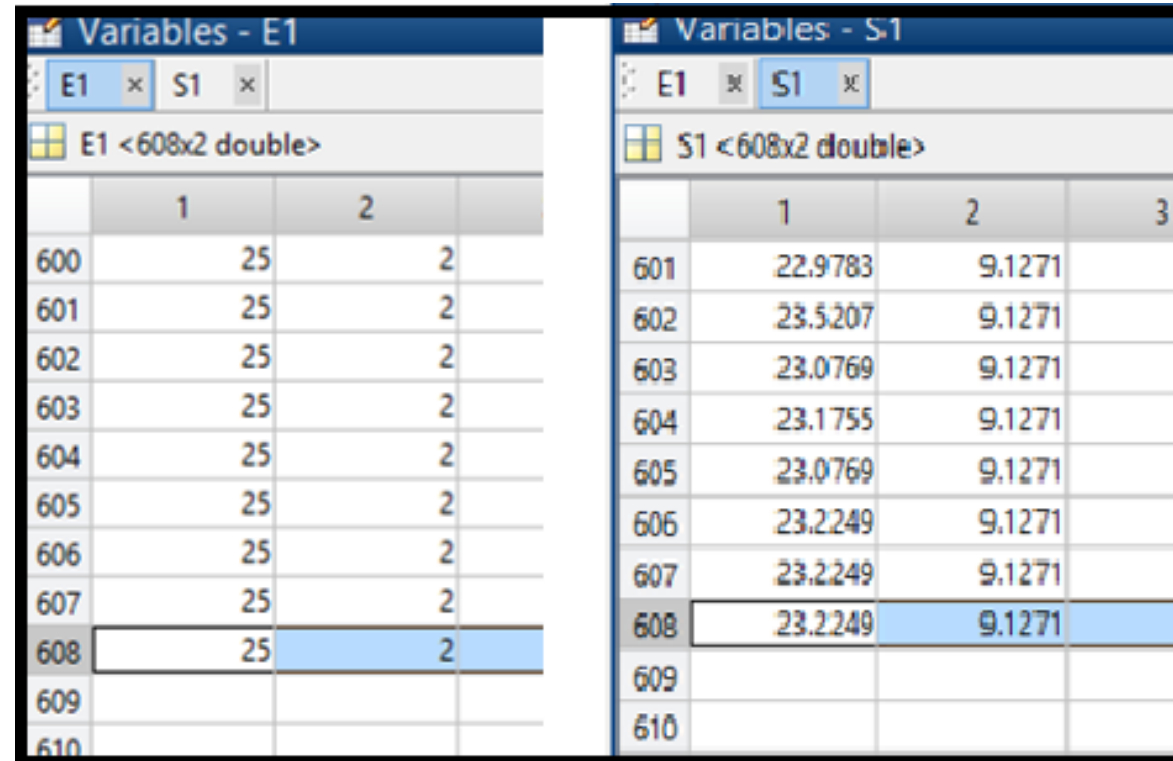
Tiempo	Voltaje	Nivel tanque lt	Tiempo	% PWM	Tempe. °C
0	2	1.220588	0	0	16.814596
0	2	1.248901	0.999494	0	16.814596
0	2	1.220588	2.000011	0	16.814596
1.000506	2	1.257599	2.99969	25	16.814596
2.000027	2	1.289984	3.999186	25	16.765286
3.000672	2	1.211335	4.999691	25	16.863905
4.000037	2	1.234467	5.999199	25	16.863905
5.000279	2	1.24372	6.999705	25	16.666667
5.999796	2	1.336248	7.999222	25	16.765286
7.000314	2	1.382512	8.999732	25	16.765286
7.999822	2	1.451908	9.999241	25	16.715976
9.000333	2	1.498173	10.999766	25	16.814596
9.99984	2	1.414897	11.999264	25	16.913215
11.000349	2	1.419523	12.999768	25	16.863905

- Residuos o basura de la memoria
- Datos erróneos debido a hardware
- Datos válidos para la identificación de sistemas



# METODOLOGÍA DEL DESARROLLO DEL PROYECTO

## Ingreso de datos a Matlab



The image displays two side-by-side screenshots of the MATLAB Variables window. The left window, titled 'Variables - E1', shows a table with two columns labeled '1' and '2'. The data for variable E1 is as follows:

	1	2
600	25	2
601	25	2
602	25	2
603	25	2
604	25	2
605	25	2
606	25	2
607	25	2
608	25	2
609		
610		

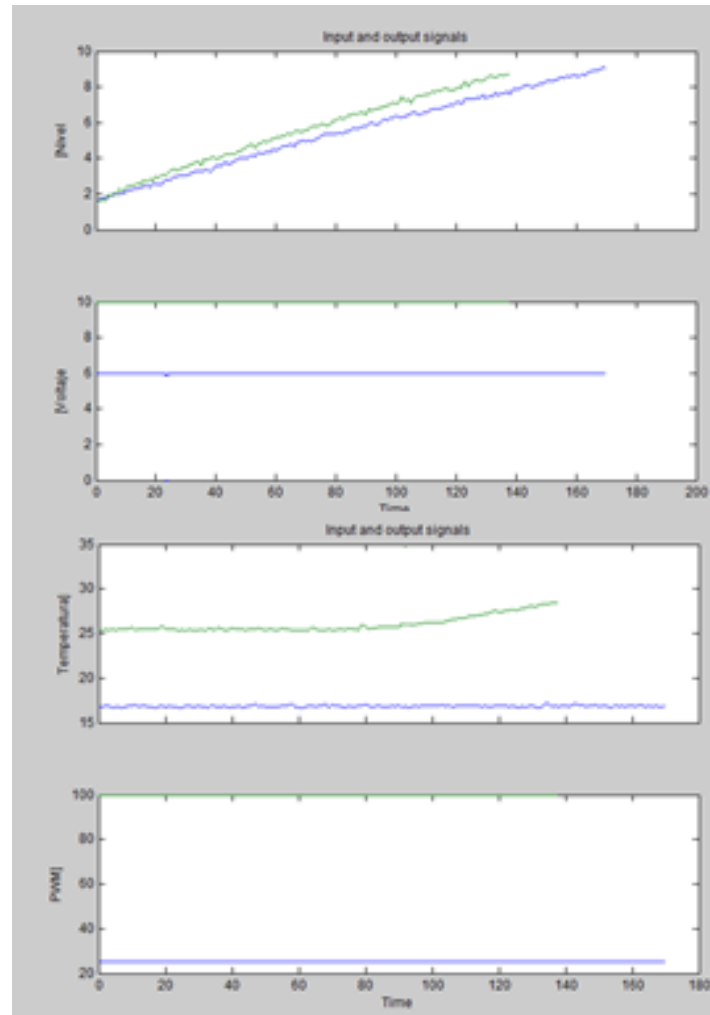
The right window, titled 'Variables - S1', shows a table with three columns labeled '1', '2', and '3'. The data for variable S1 is as follows:

	1	2	3
601	22.9783	9.1271	
602	23.5207	9.1271	
603	23.0769	9.1271	
604	23.1755	9.1271	
605	23.0769	9.1271	
606	23.2249	9.1271	
607	23.2249	9.1271	
608	23.2249	9.1271	
609			
610			



# METODOLOGÍA DEL DESARROLLO DEL PROYECTO

## Gráficas de los datos adquiridos



# METODOLOGÍA DEL DESARROLLO DEL PROYECTO

## Partes del Ident

The image shows the System Identification Tool (SIT) interface with several key components highlighted by red boxes and arrows:

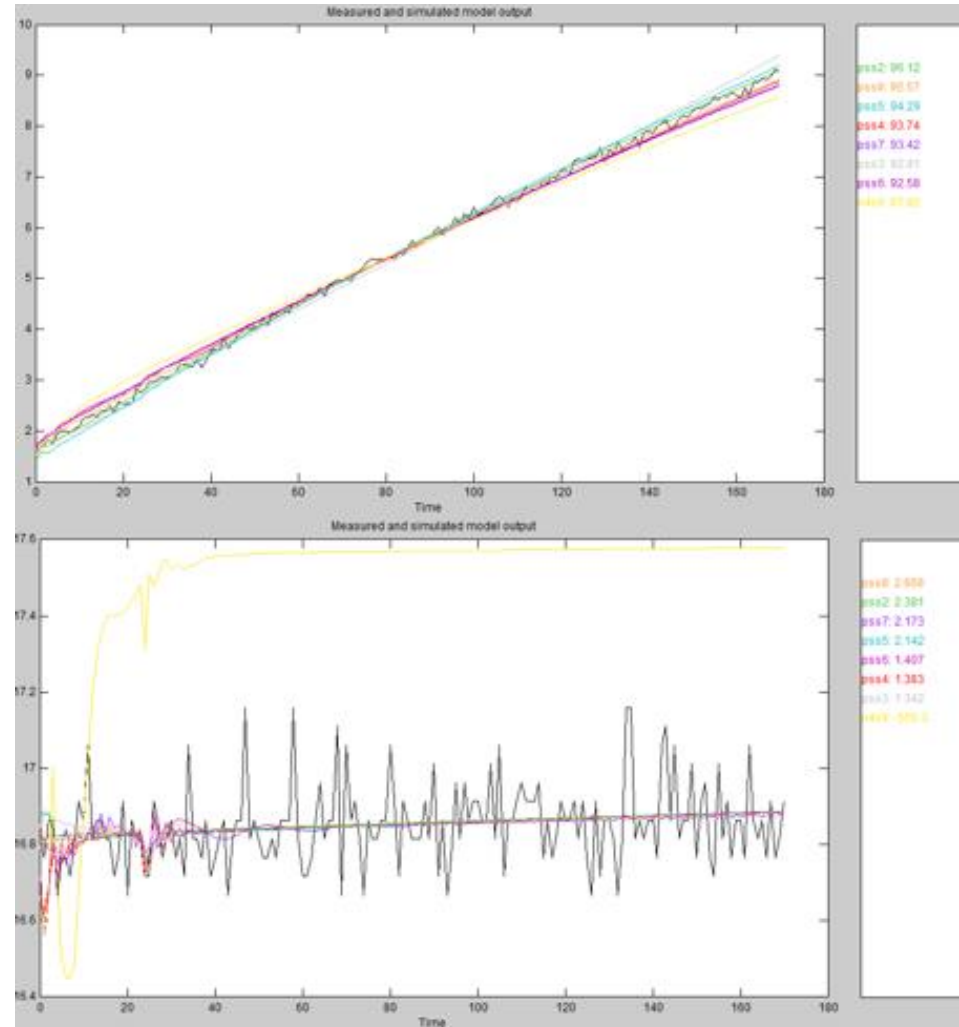
- Import data:** A table with one row labeled 'Datos1'. An arrow points to it from the text 'Ingreso de Muestras'.
- Import models:** A grid of nine plots labeled pss2 through pss9. An arrow points to it from the text 'Modelos del Sistema'.
- Estimate -->:** A dropdown menu. An arrow points to it from the text 'Selección del método de obtención del modelo'.
- Validation Data:** A box labeled 'Datos1' under the 'Validation Data' section. An arrow points to it from the text 'Validación'.

The right side of the image shows a 'Polynomial and State Space Mod...' dialog box with the following settings:

- Structure: State Space: n
- Orders: 2
- Equation:  $x_{new} = Ax + Bu + Ke; y = Cx + Du + e$
- Method:  PEM  N4SID
- Domain:  Continuous  Discrete ( 1 seconds)
- Feedthrough: false(1,2)
- Form: Free
- Input delay: zeros(2,1)
- Name: pss2
- Focus: Prediction Initial state: Auto
- Dist.model: Estimate K Covariance: Estimate
- Buttons: Estimate, Close, Help

# METODOLOGÍA DEL DESARROLLO DEL PROYECTO

## Validación





# METODOLOGÍA DEL DESARROLLO DEL PROYECTO

## Validación

Nivel		Temperatura	
Best Fits	Best Fits	Best Fits	Best Fits
pss7: -104.8	pss2: 96.12	pss7: -104.8	pss8: 2.868
pss8: -130.4	pss8: 95.57	pss8: -130.4	pss2: 2.381
pss2: -280.9	pss5: 94.29	pss2: -280.9	pss7: 2.173
pss5: -432.4	pss4: 93.74	pss5: -432.4	pss5: 2.142
pss6: -486.3	pss7: 93.42	pss6: -486.3	pss6: 1.407
pss4: -529.5	pss3: 92.81	pss4: -529.5	pss4: 1.383
pss3: -763.5	pss6: 92.58	pss3: -763.5	pss3: 1.342



# METODOLOGÍA DEL DESARROLLO DEL PROYECTO

## Matriz de Espacios de Estado

<b>NIVEL</b>	<b># Muestras</b>	<b>Temperatura</b>	<b># Muestras</b>
<b>2</b>	<b>608</b>	<b>25</b>	<b>3075</b>
<b>4</b>	<b>233</b>	<b>50</b>	<b>962</b>
<b>5</b>	<b>197</b>	<b>75</b>	<b>764</b>
<b>8</b>	<b>164</b>	<b>100</b>	<b>538</b>
<b>10</b>	<b>158</b>		



# METODOLOGÍA DEL DESARROLLO DEL PROYECTO

## Matriz de Espacios de Estado

Discrete-time identified state-space model:

$$x(t+T_s) = A x(t) + B u(t) + K e(t)$$

$$y(t) = C x(t) + D u(t) + e(t)$$

A =

	x1	x2	x3	x4
x1	0.9987	-0.004624	-0.006145	0.008147
x2	0.04224	-0.03411	-0.1023	-0.7525
x3	-0.01244	-0.1383	0.6585	0.3718
x4	-0.0305	0.8575	0.394	0.04822

B =

	[Voltaje	PWM]
x1	0.000172	-0.00847
x2	0.02765	0.5381
x3	-0.01668	-0.4433
x4	0.01524	0.635

C =

	x1	x2	x3	x4
[Nivel	-23.88	0.3531	0.1169	-0.01966
Temperatura]	-0.2811	0.09615	-0.5402	0.3888

D =

	[Voltaje	PWM]
[Nivel	0	0
Temperatura]	0	0



# METODOLOGÍA DEL DESARROLLO DEL PROYECTO

## Validación

### temperatura

Best Fits	Best Fits
pss2: 95.8	pss6: 85.71
pss3: 95.66	pss3: 76.13
pss5: 95.16	pss2: 76.05
pss8: 94.15	pss8: 74.13
pss6: 90.61	pss5: 74.05
pss9: 69.51	pss9: 31.09

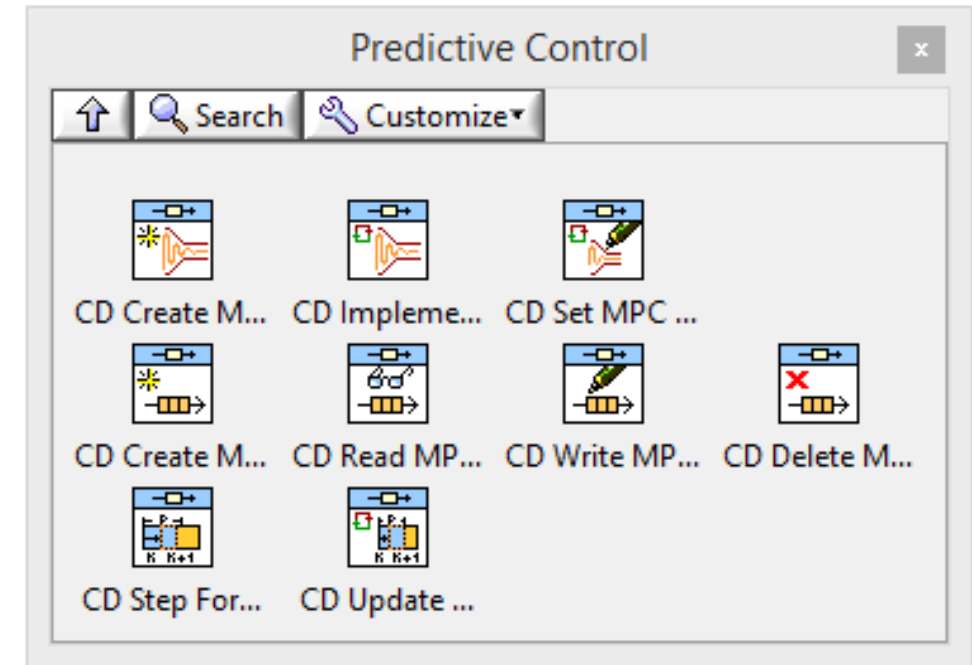
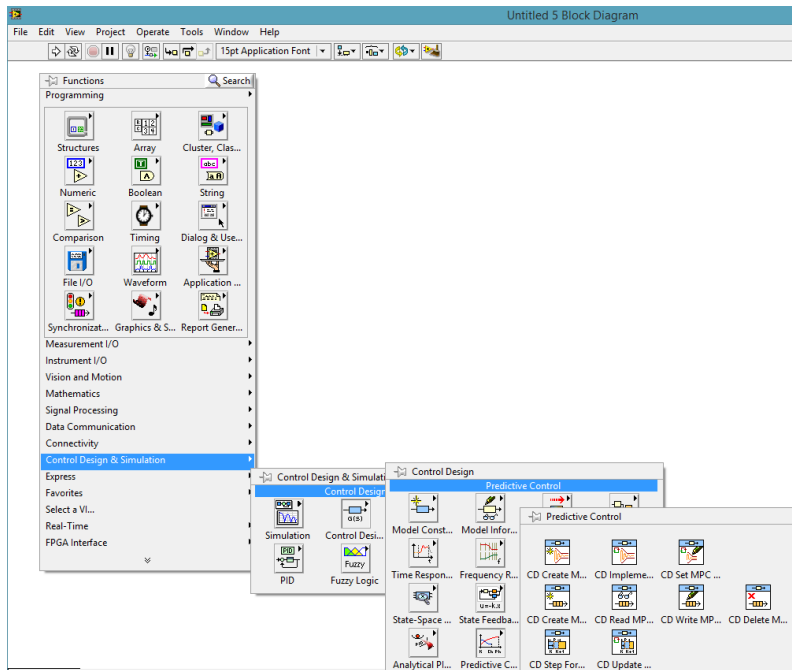
### Nivel

Best Fits	Best Fits
pss9: 92.46	pss10: 78.72
	pss9: 78.65
	pss3: 74.57
pss10: 90.17	pss8: 70.07
pss2: 89.08	
pss3: 89.03	
pss8: 84.93	



# METODOLOGÍA DEL DESARROLLO DEL PROYECTO

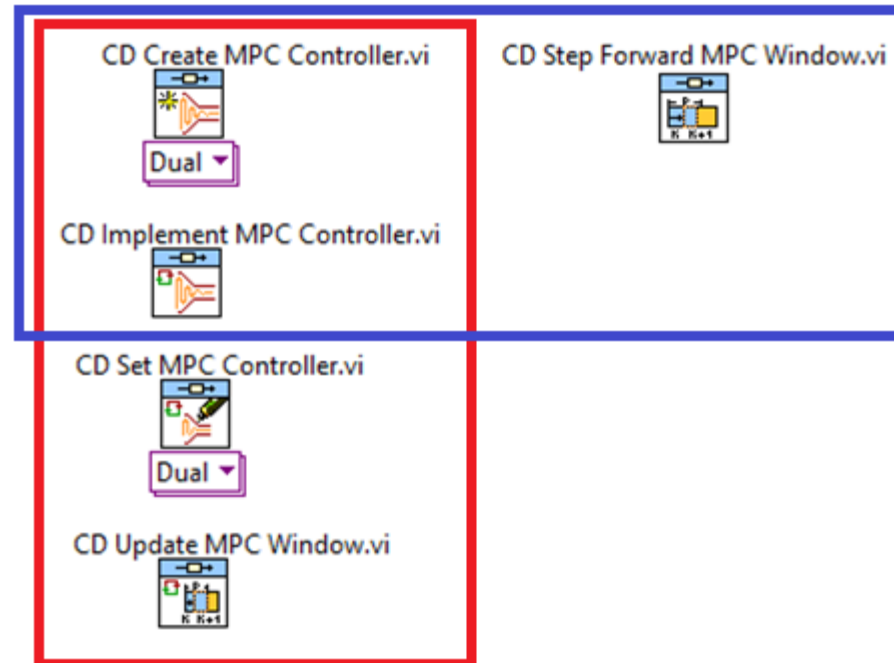
## Paleta en LabVIEW del controlador MPC



# METODOLOGÍA DEL DESARROLLO DEL PROYECTO

## Módulo de control predictivo

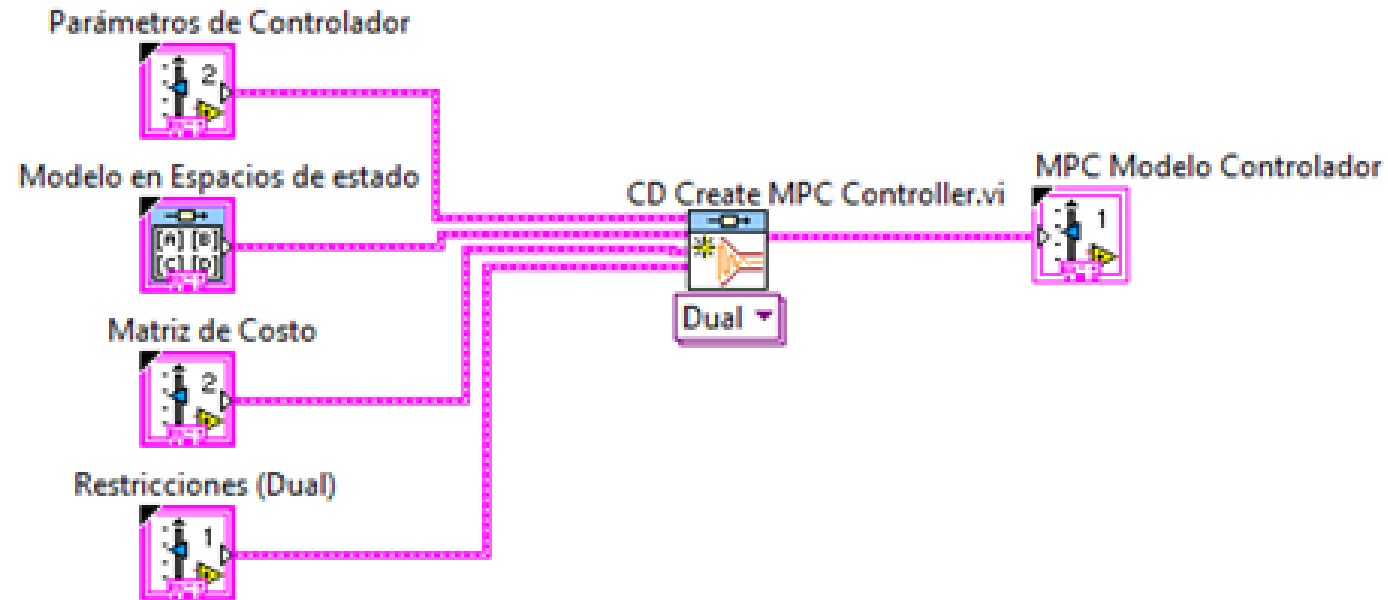
## Simulación



## Implementación

# METODOLOGÍA DEL DESARROLLO DEL PROYECTO

## Crear Modelo de Control Predictivo



# METODOLOGÍA DEL DESARROLLO DEL PROYECTO

## Elementos – CD Create MPC

**Parámetros de Controlador**

Prediction Horizon: 20  
Control Horizon: 1  
Initial Window: 0  
Integral Action?

**Modelo en Espacios de estado**

Model name: Modelo de la Planta  
Sampling Time: 1

	A	B
0	0.33    0.04    -9.35	0    -0    442
0	0.67    0.25    0.97	0    0    0.26
0	-71.25    0.23    0.29	0    3.69    0.38

	C	D
0	0.26    255.6    20.36	0    0
0	0.28    120.73    400.7	0    0



# METODOLOGÍA DEL DESARROLLO DEL PROYECTO

## Elementos – CD Create MPC

**Matriz de Costo**

**Q** ←

Output Error Weightings		
0	10.00	0.00
0	0.00	0.00

**R** ←

Control Action Change Weightings		
0	1.00	0.00
0	0.00	0.00

**N** ←

Control Action Error Weightings		
0	0.00	0.00
0	0.00	0.00

Output Error Factors

0	0.00	0.00
---	------	------

Control Action Change Factors

0	0.00	0.00
---	------	------

Control Action Error Factors

0	0.00	0.00
---	------	------

**Restricciones (Dual)**

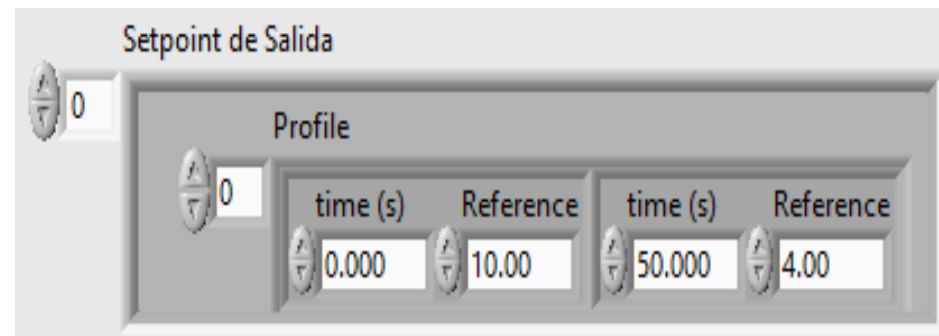
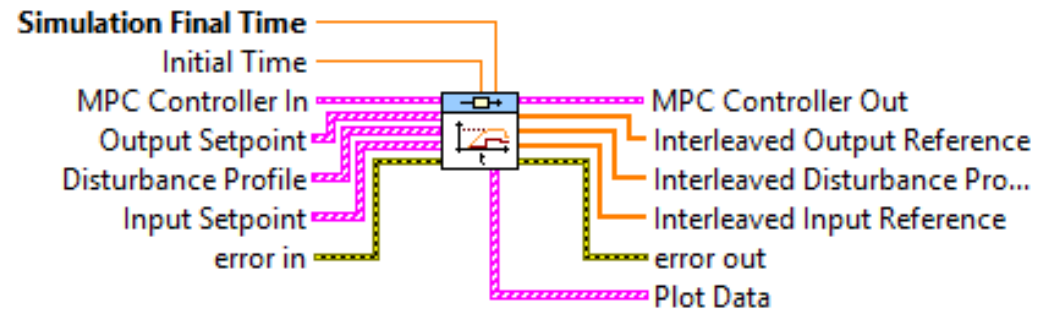
u min init		u min final		stopping criteria	
0	0.00	0	0.00	function tolerance	1E-8
	0.00		0.00	parameter tolerance	1E+6
u max init		u max final		gradient tolerance	1E+6
0	0.00	0	10.00	max iterations	10000
	0.00		0.00	max function calls	10000
y min init		y min final		max time (sec)	-1
0	0.00	0	0.00		
	0.00		0.00		
y max init		y max final			
0	0.00	0	9.00		
	0.00		0.00		
du min init		du min final			
0	0.00	0	-0.50		
	0.00		0.00		
du max init		du max final			
0	0.00	0	0.50		
	0.00		0.00		



# METODOLOGÍA DEL DESARROLLO DEL PROYECTO

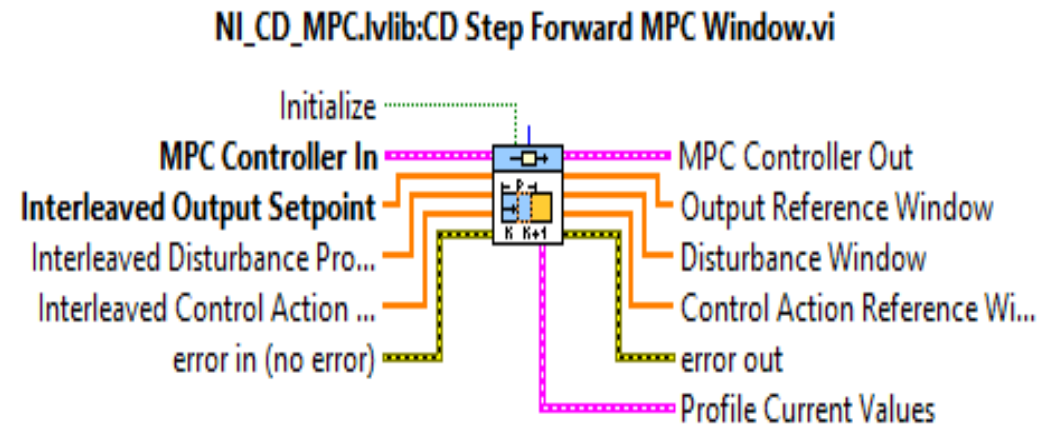
## Simulación – Generar Set Points por Tiempo

NI\_CD\_MPC.lvlib:CD Generate Time Profiles for MPC Simulation.vi



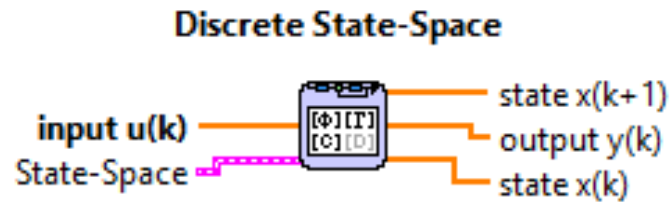
# METODOLOGÍA DEL DESARROLLO DEL PROYECTO

## Simulación – Adelanta Hp y Hc



# METODOLOGÍA DEL DESARROLLO DEL PROYECTO

## Simulación - Espacios de Estados Discreto



Discrete State-Space

Polymorphic instance: MIMO

Feedthrough: Indirect

SISO

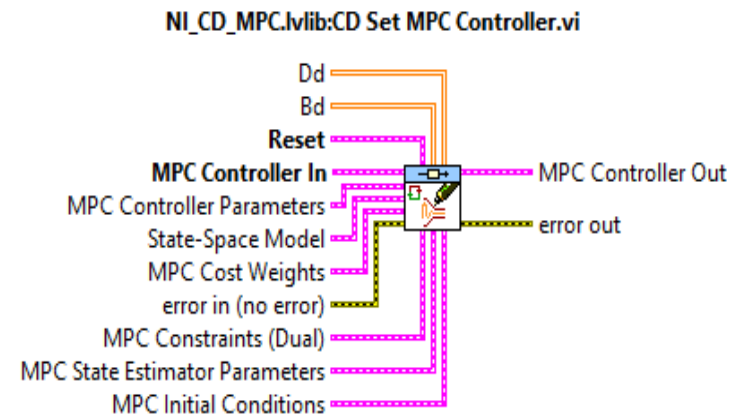
MIMO

Parameter Name	Value
State-Space	...
sample skew (s)	0.1
initial state (x0)	[0 0]
reset?	False
reset state (xr)	[0]



# METODOLOGÍA DEL DESARROLLO DEL PROYECTO

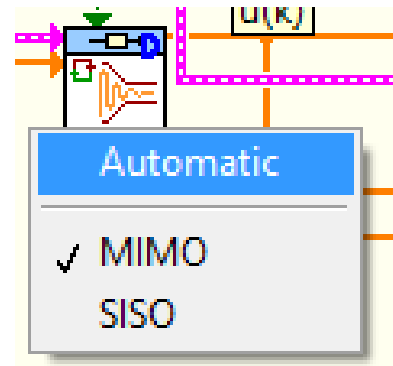
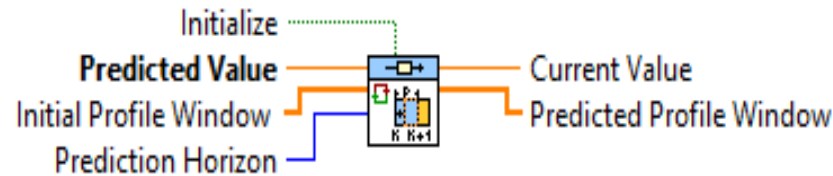
## Resetear Controlador MPC



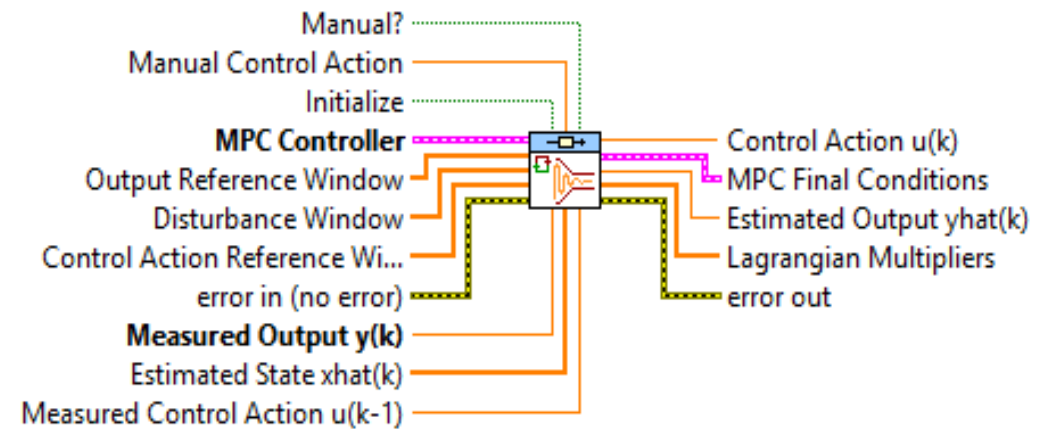
# METODOLOGÍA DEL DESARROLLO DEL PROYECTO

## Implementar Controlador MPC

NI\_CD\_MPC.lvlib:CD Update MPC Window.vi

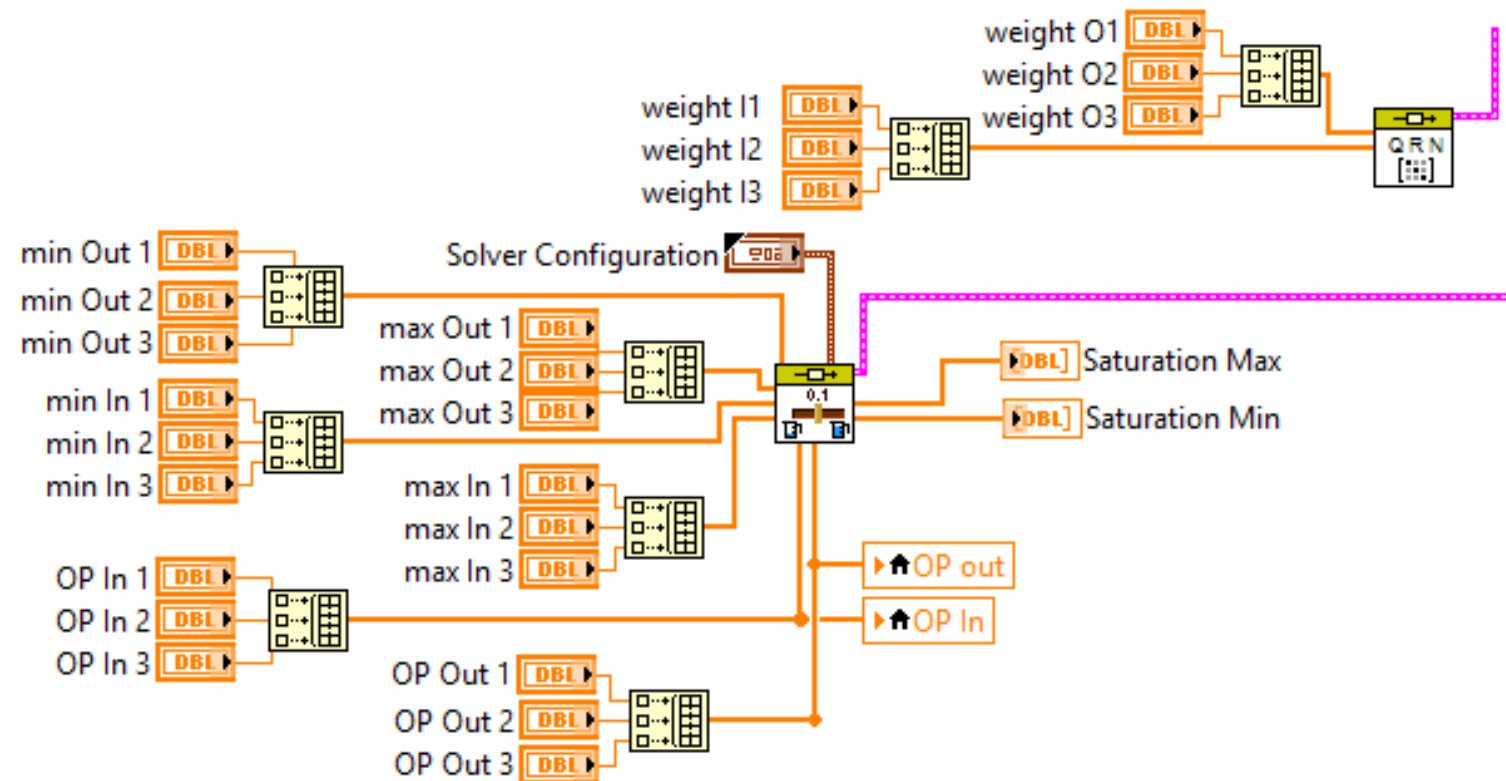


NI\_CD\_MPC.lvlib:CD Implement MPC Controller.vi



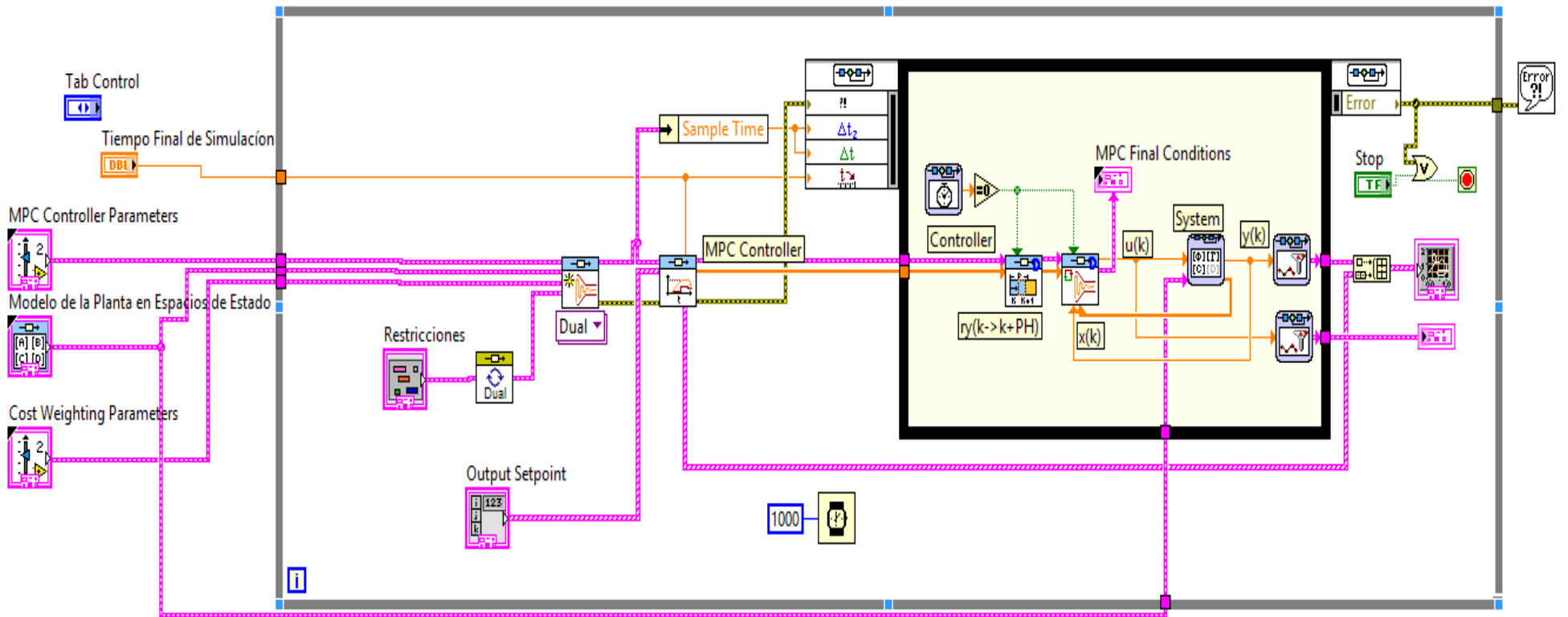
# METODOLOGÍA DEL DESARROLLO DEL PROYECTO

## Ingreso Costos y Restricciones



# METODOLOGÍA DEL DESARROLLO DEL PROYECTO

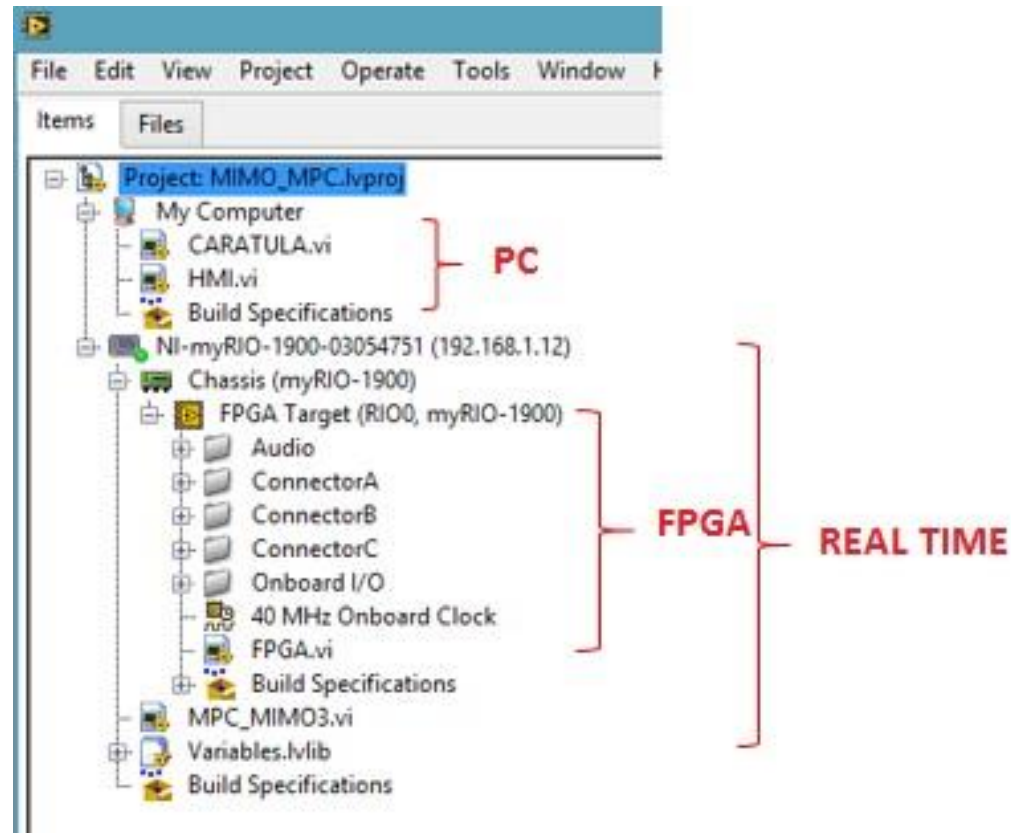
## Programa de simulación





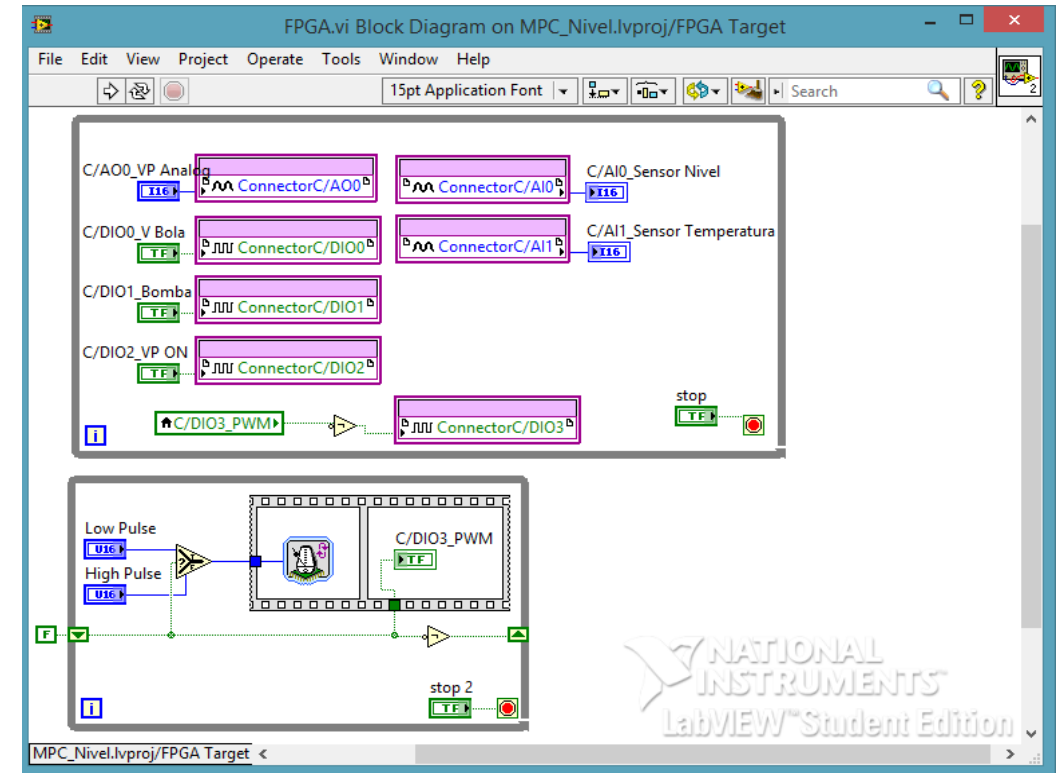
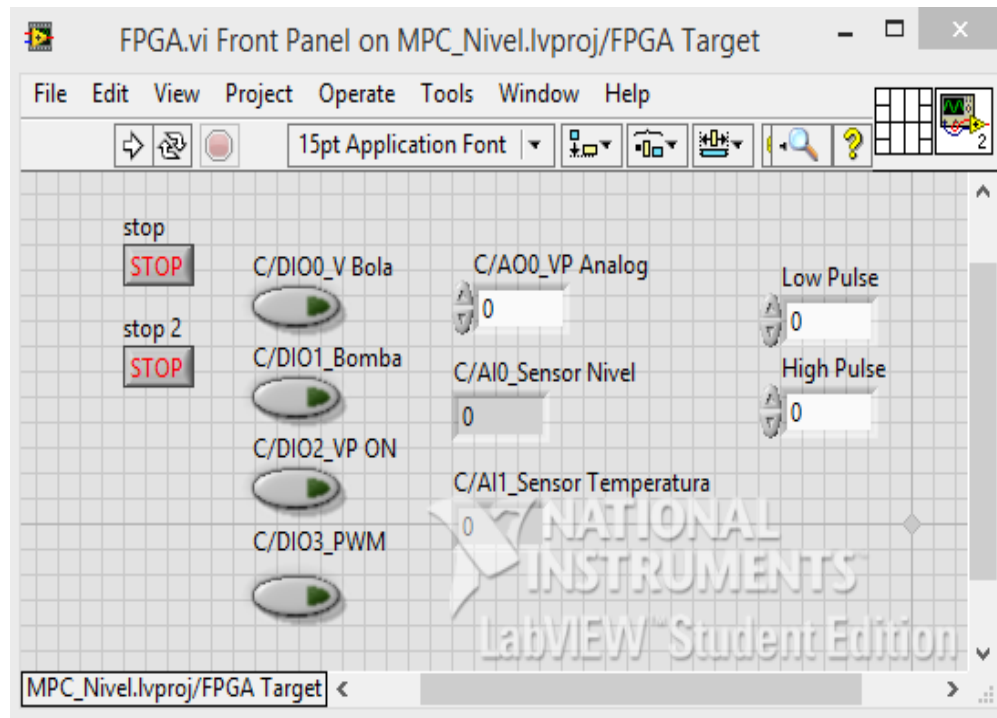
# METODOLOGÍA DEL DESARROLLO DEL PROYECTO

## Implementación del Software



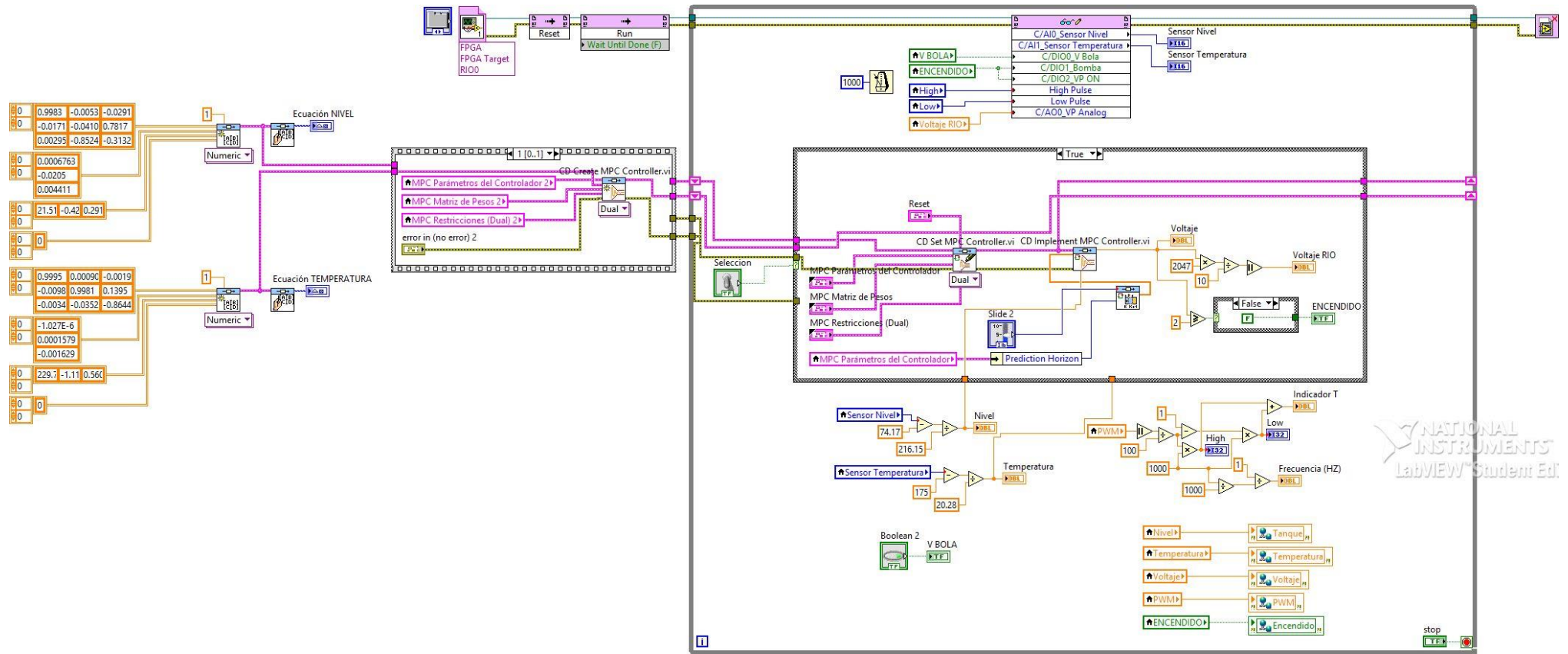
# METODOLOGÍA DEL DESARROLLO DEL PROYECTO

## Programación FPGA



# METODOLOGÍA DEL DESARROLLO DEL PROYECTO

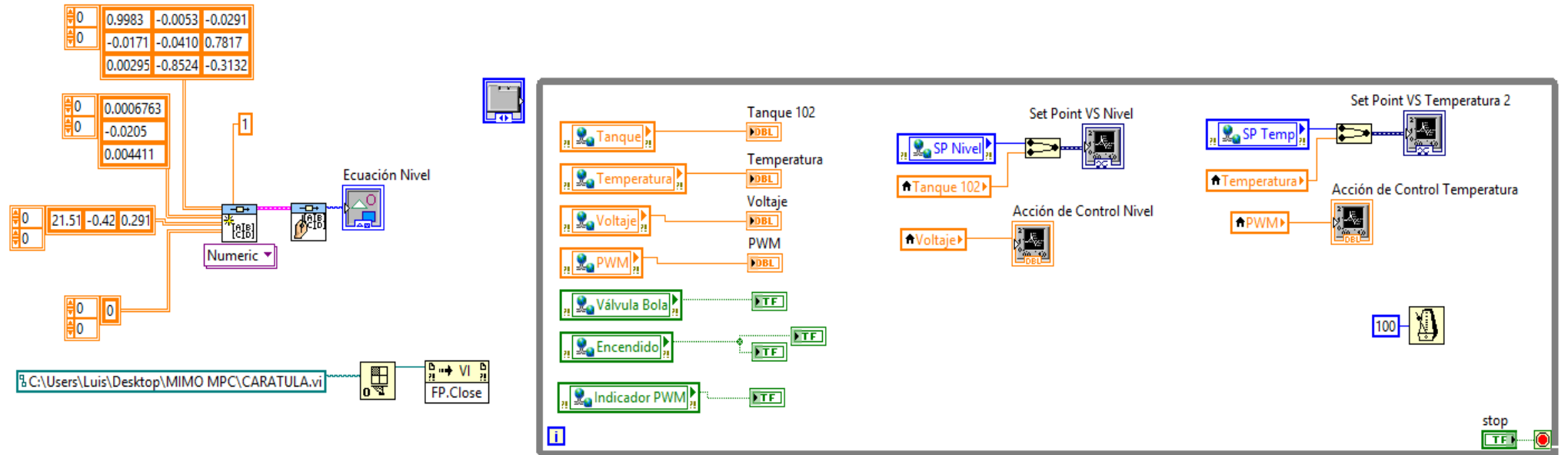
## Programación en RT



NATIONAL INSTRUMENTS  
LabVIEW Student Ed.

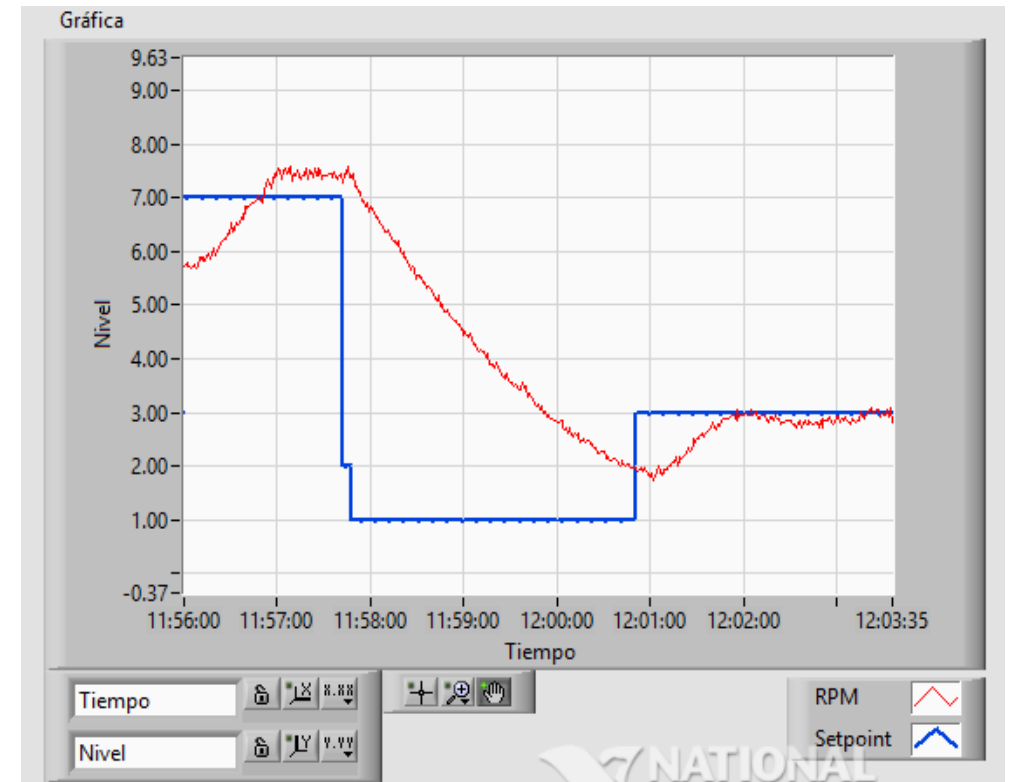
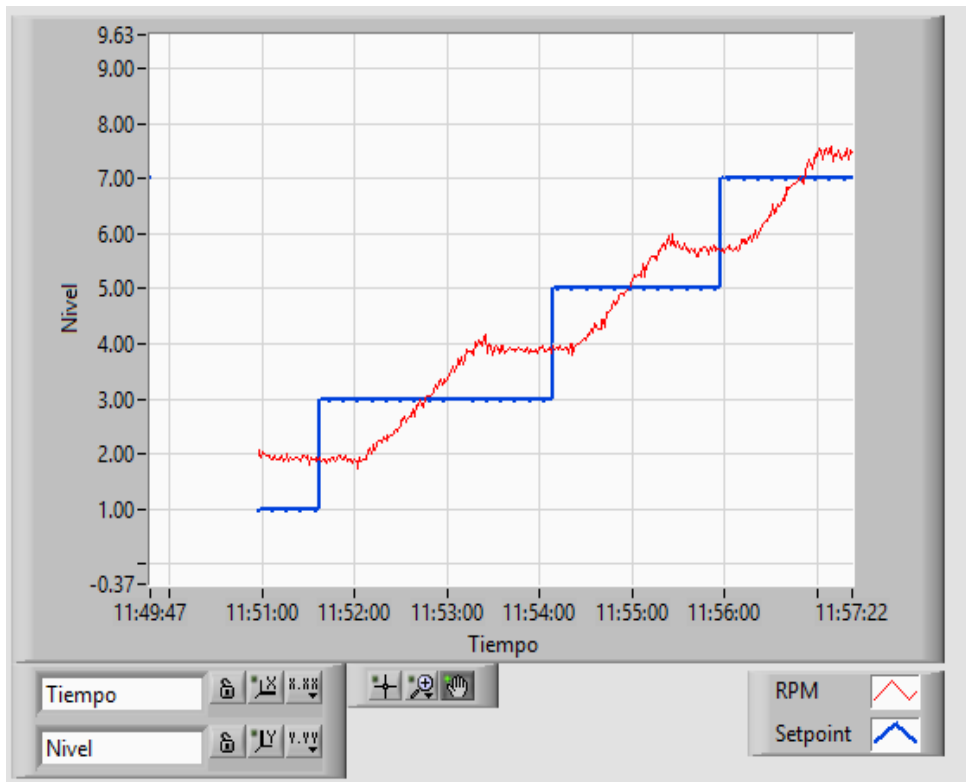
# METODOLOGÍA DEL DESARROLLO DEL PROYECTO

## Programación en la PC



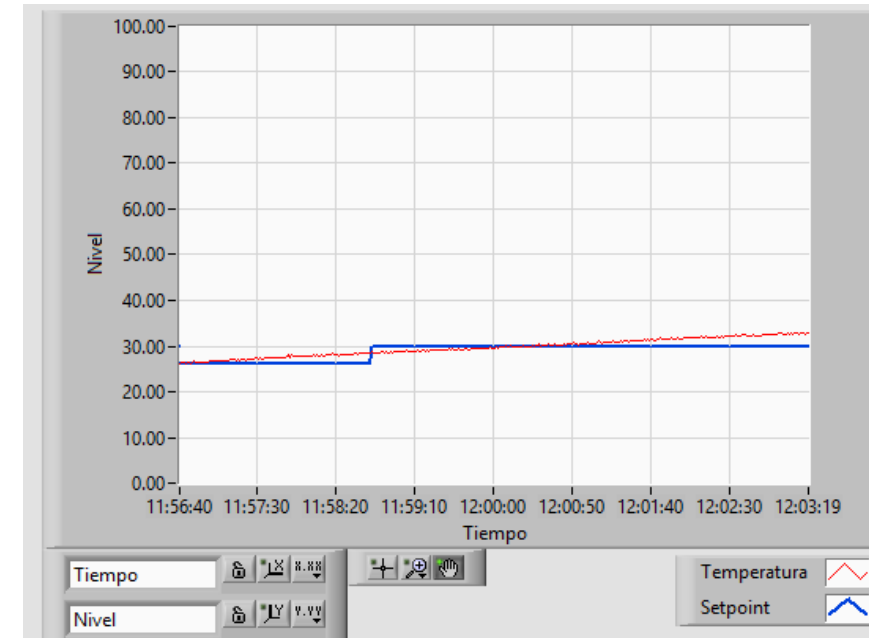
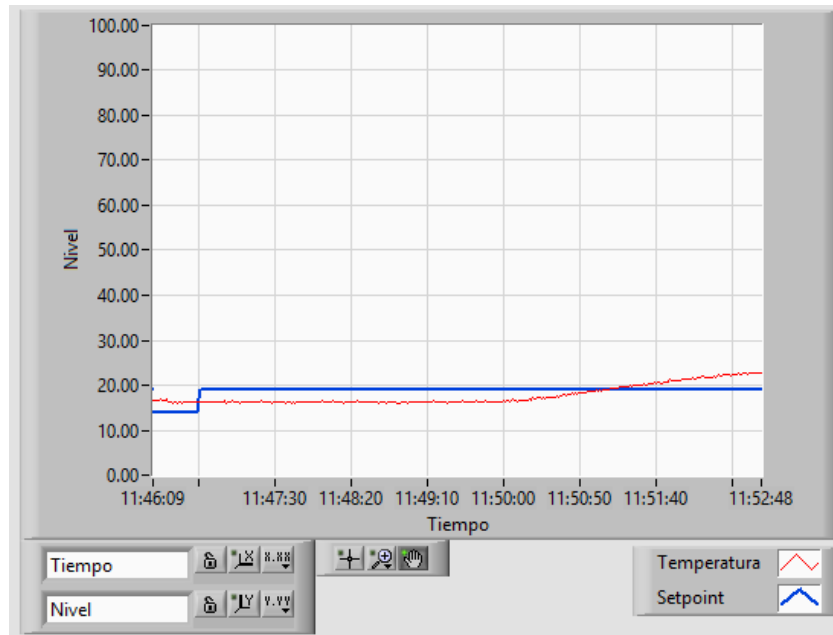
# ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS

Obtención de los parámetros adecuados para la sintonización de los controladores - Nivel



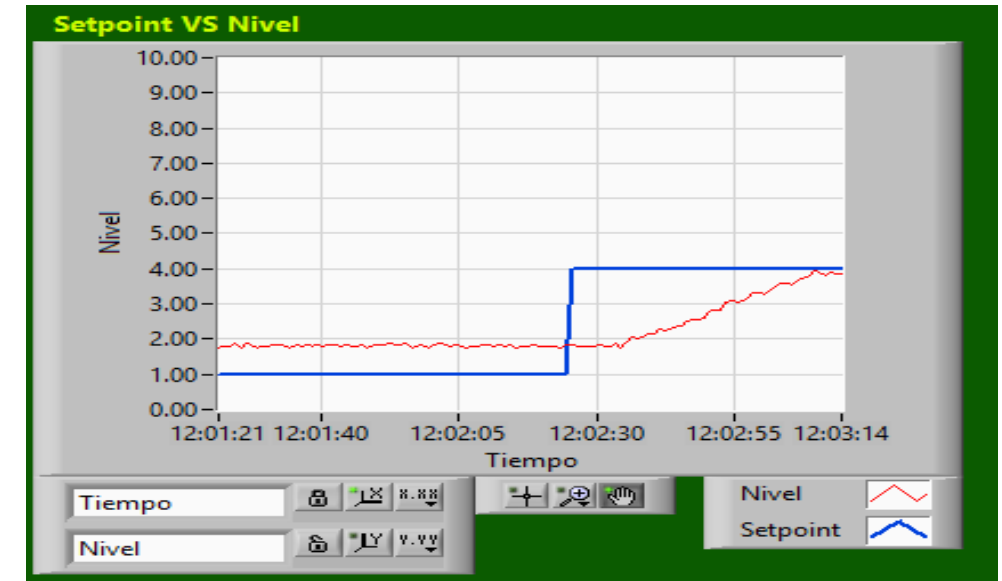
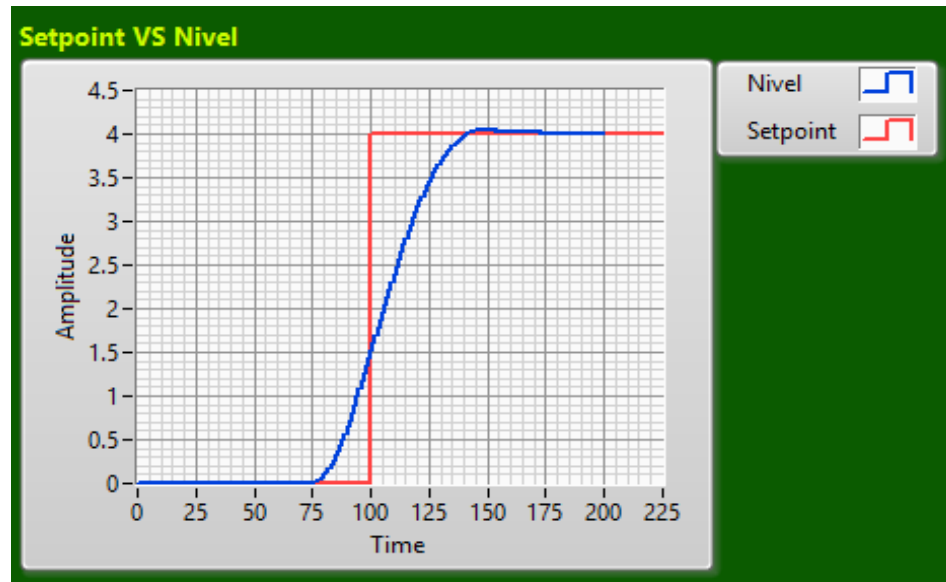
# ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS

Obtención de los parámetros adecuados para la sintonización de los controladores - Temperatura



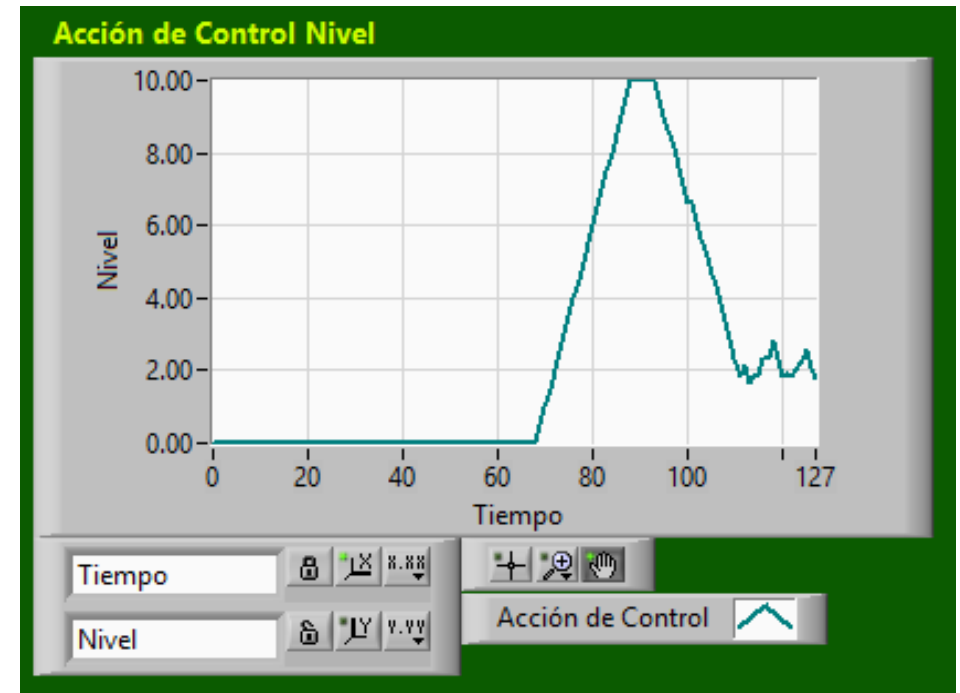
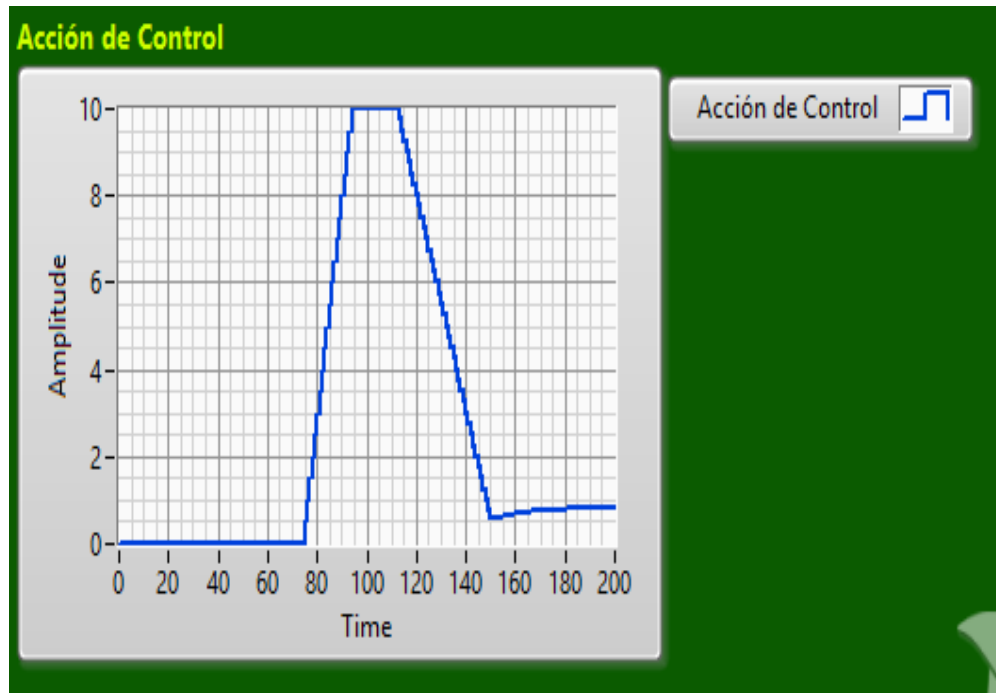
# ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS

## Simulación vs Implementación Nivel



# ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS

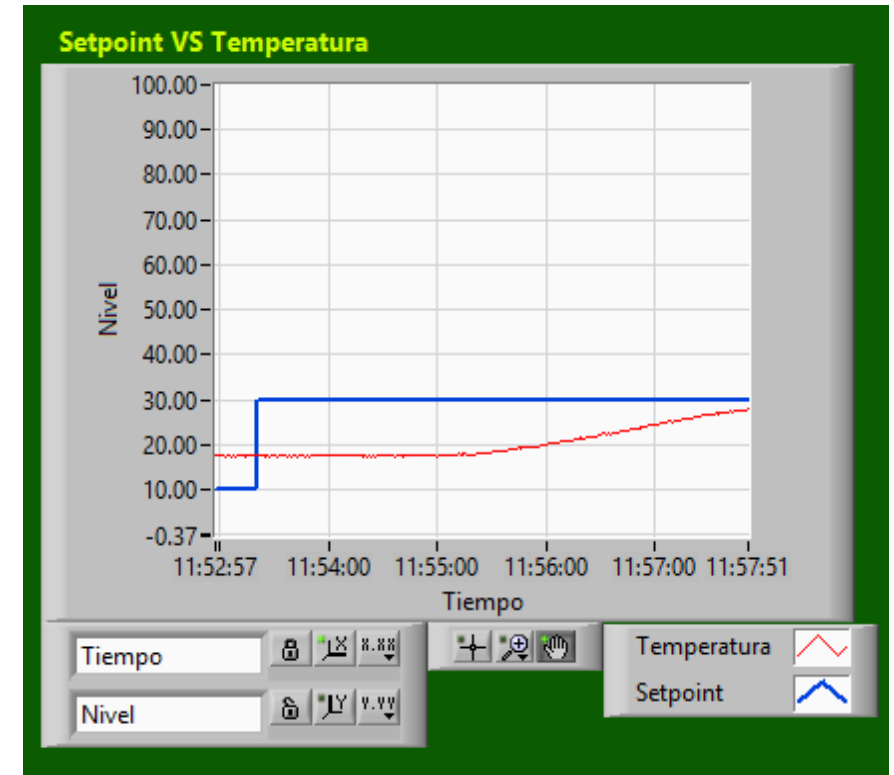
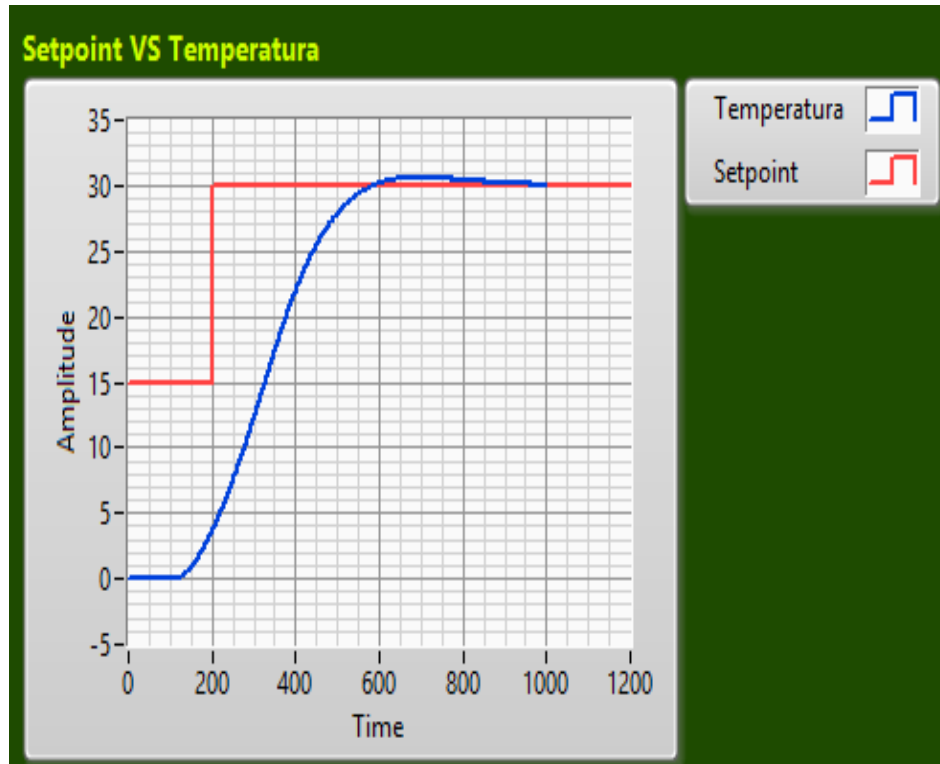
## Simulación Vs Implementación Nivel





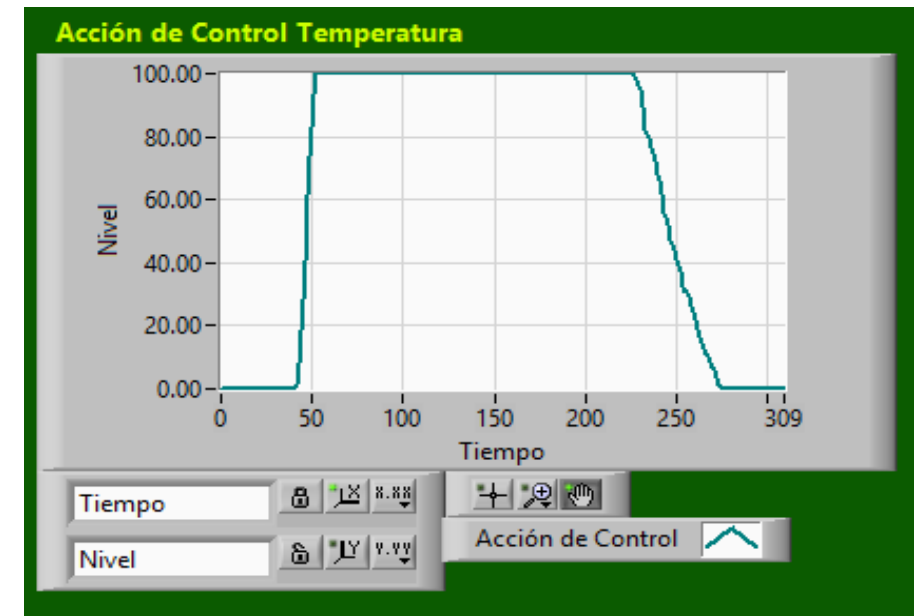
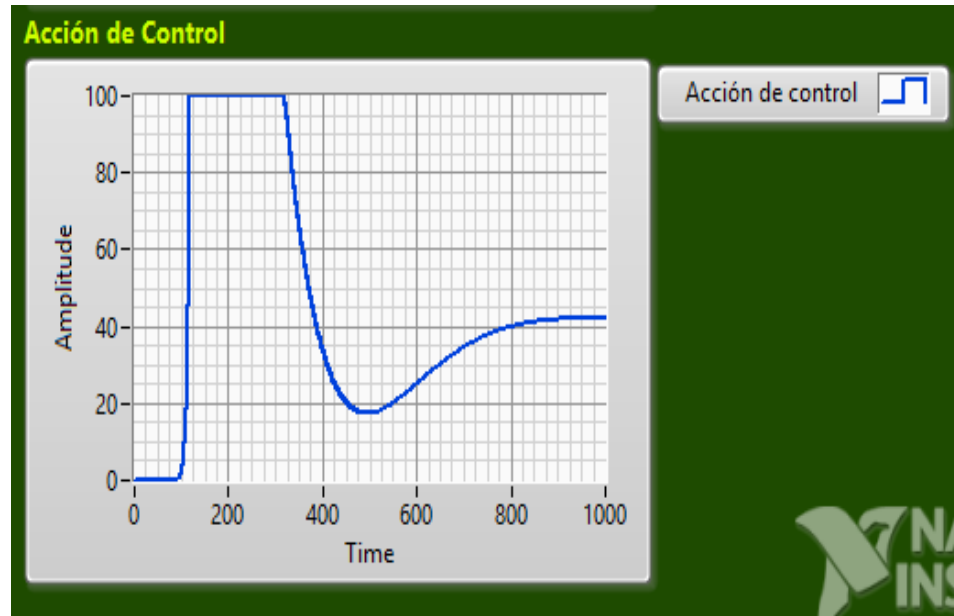
# ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS

## Simulación Vs Implementación Temperatura



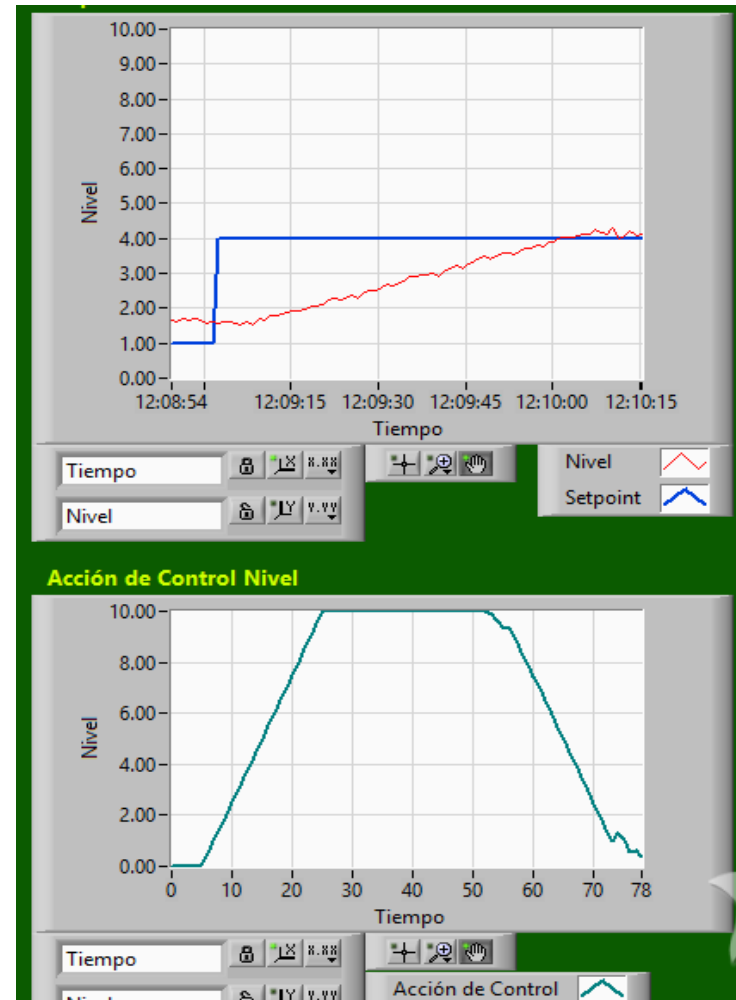
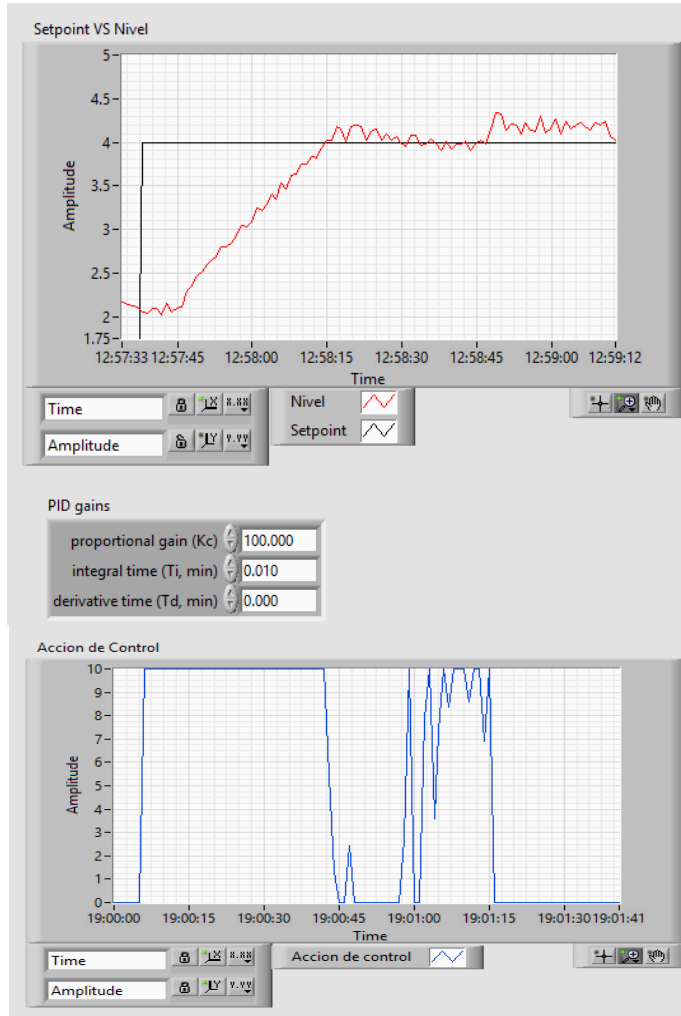
# ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS

## Simulación Vs Implementación Temperatura



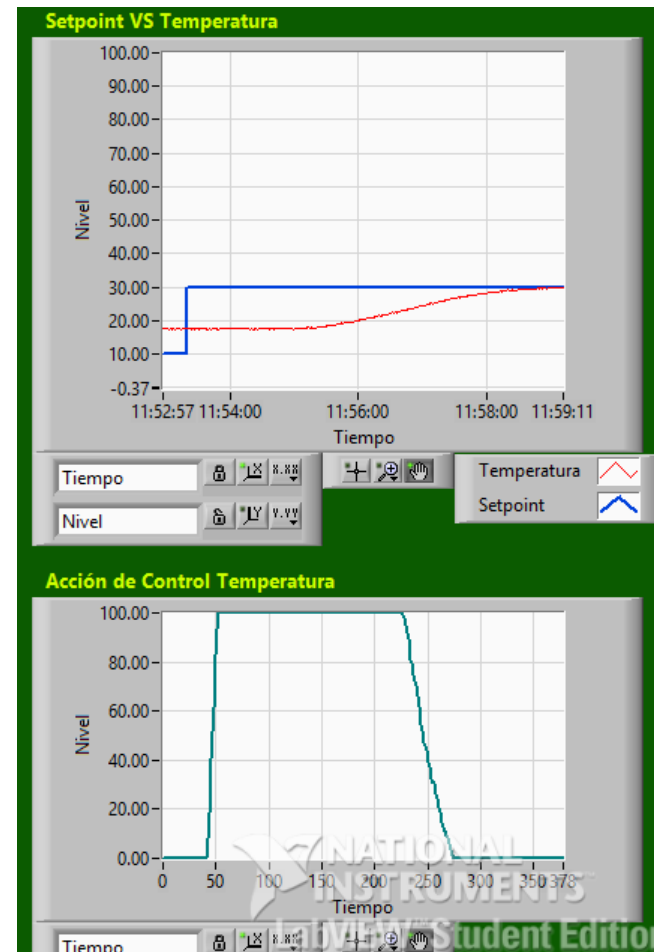
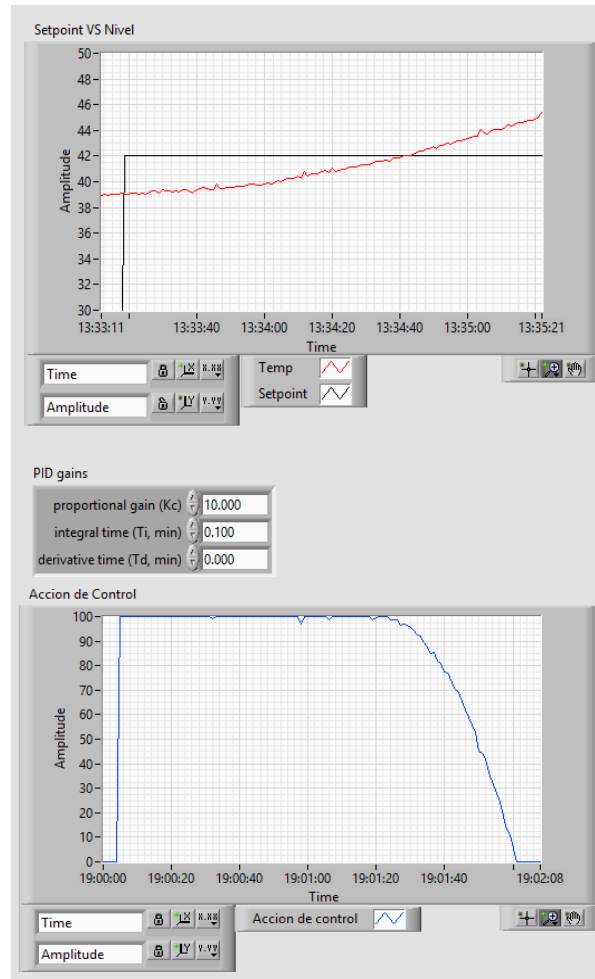
# ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS

## PID VS MPC - Nivel



# ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS

## PID VS MPC - Temperatura



# Conclusiones

- Los datos de muestreo de cada variable deben contener el mismo número de muestras tanto en los datos de entrada como de salida para poder ingresar al workspace de Matlab y posteriormente al IDENT.
- Para obtener un correcto modelo de una planta, ésta nos debe permitir capturar el comportamiento de cada variable, ya que el modelo del proceso debe contener toda la información posible sobre la dinámica del sistema porque de esto dependerá la fiabilidad del modelo que vamos a aplicar.
- El MPC no tiene definido una metodología para la sintonización.
- El MPC permite manipular restricciones reales de la planta, corregir errores en la salida y en la acción de control, también permite manipular la velocidad con la que se ejecuta la acción de control.
- El control MPC es un control avanzado que permite optimizar recursos, como la prolongación de la vida útil de los actuadores, los costos de consumo de energía y tiempo de operación.
- Se puede ver que el control MPC tiene mejores resultados que un controlador tradicional en este caso un PID, ya que no tiene sobre impulso y el tiempo de estabilización es más rápido.
- El ingreso de datos para un sistema MIMO se realiza mediante matrices, las cuales van alternadas una a una para cada variable respectivamente.
- Se puede cambiar los parámetros del controlador MPC en tiempo real, es decir no es necesario detener el controlador, lo que resultaría perjudicial para una empresa.



# RECOMENDACIONES

- Se recomienda dimensionar adecuadamente los límites de trabajo del proceso así como los rangos del actuador, debido a que un funcionamiento del sistema o acción de control fuera de las restricciones configuradas en el MPC podría llevar a un mal funcionamiento del mismo o a respuestas inestables del proceso.
- Las compilaciones necesarias para los programas sobre la FPGA requieren de un tiempo prolongado, incluso si los cambios realizados son mínimos, por tanto, se pide realizar la programación sencilla y estable, que no requiera cambios a futuro, los procedimientos que se crean van a modificarse continuamente, hacerlo en los VI sobre el chasis de la myRIO o sobre el computador de ser el caso.



Gracias