



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO DE CONTROL PREDICTIVO PARA UNA PLANTA DE FLUJO 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

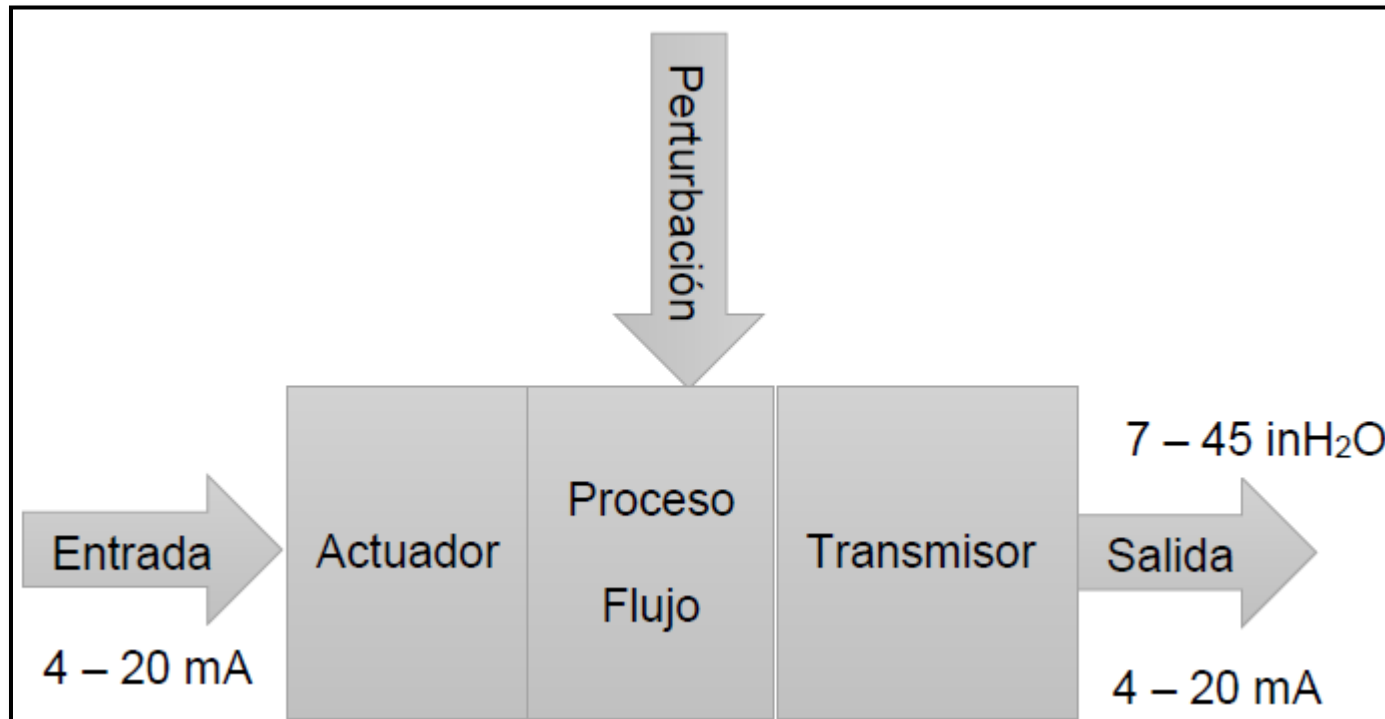
Autores: Alex Darwin Paredes Anchatipán
Verónica Gabriela López Caisaguano

Director: Ing. Jacqueline Llanos
Codirector: Ing. Diego Ortiz



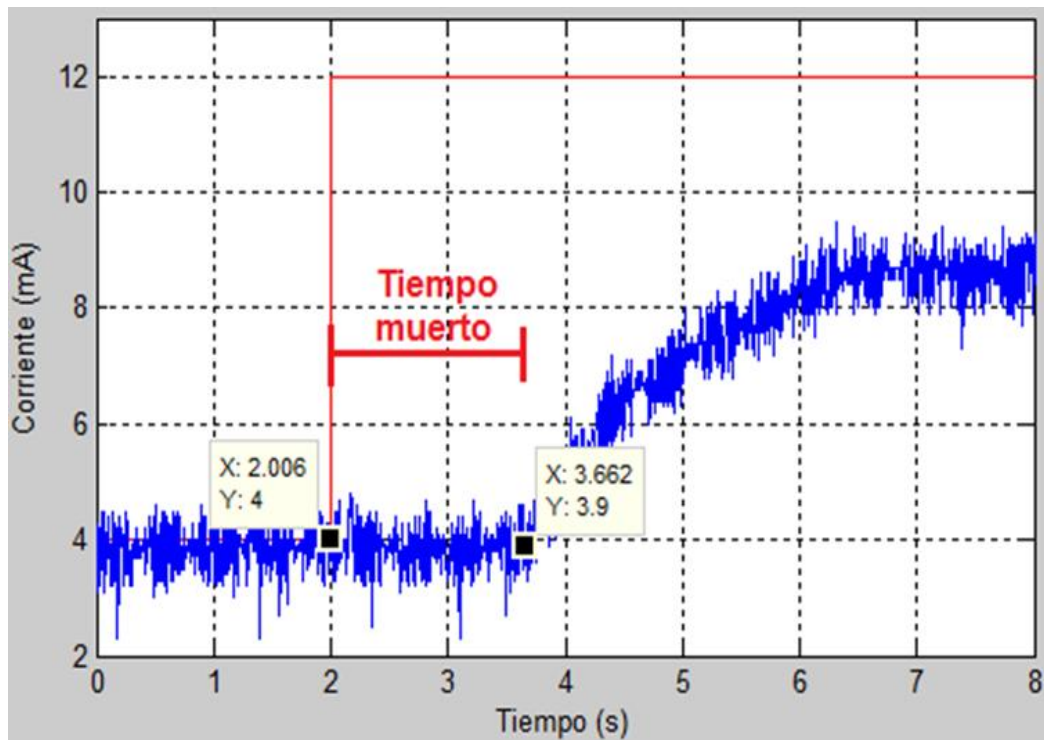
OBTENCIÓN DE DATOS

Señales a medir



OBTENCIÓN DE DATOS

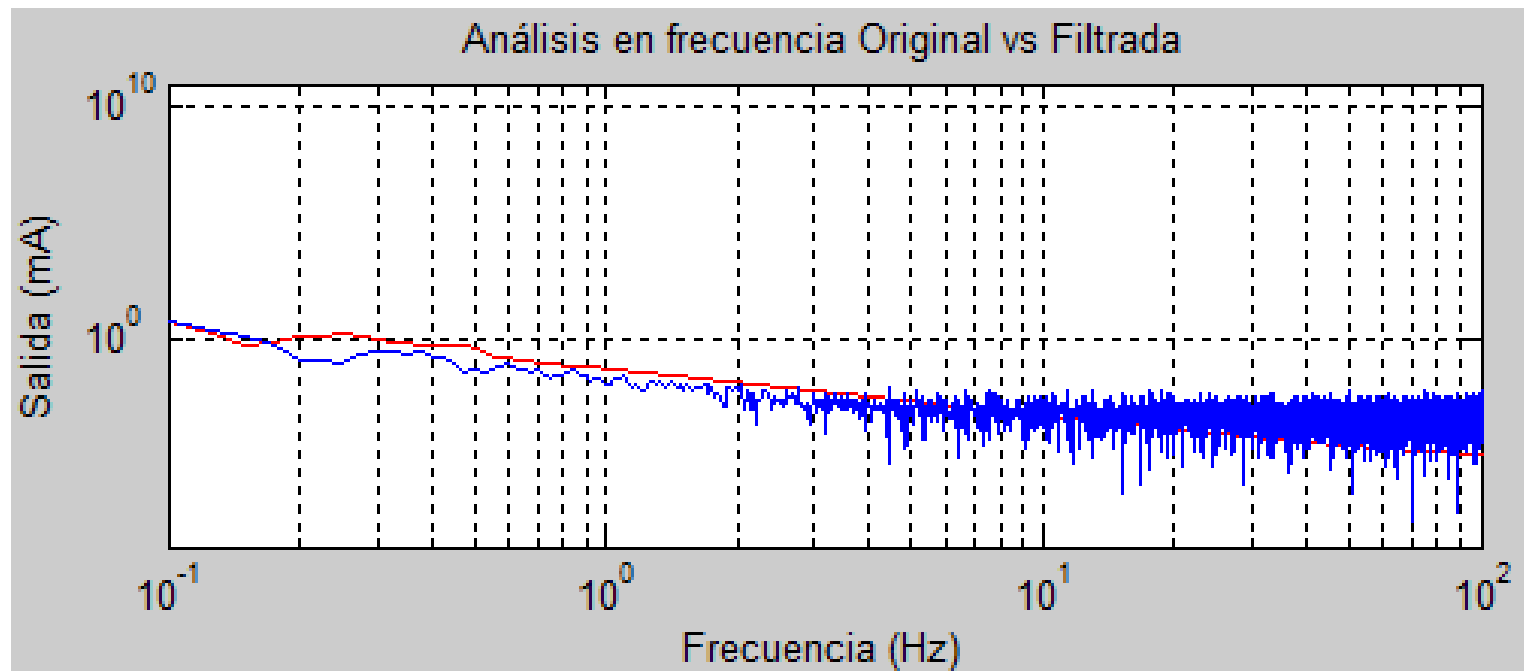
Tiempo muerto del sistema



Valor inicial (mA)	Valor final (mA)	Tiempo muerto (ms)
4	12	1,8
12	20	0,56
20	12	0,75
12	4	0,5
Máximo		1,8

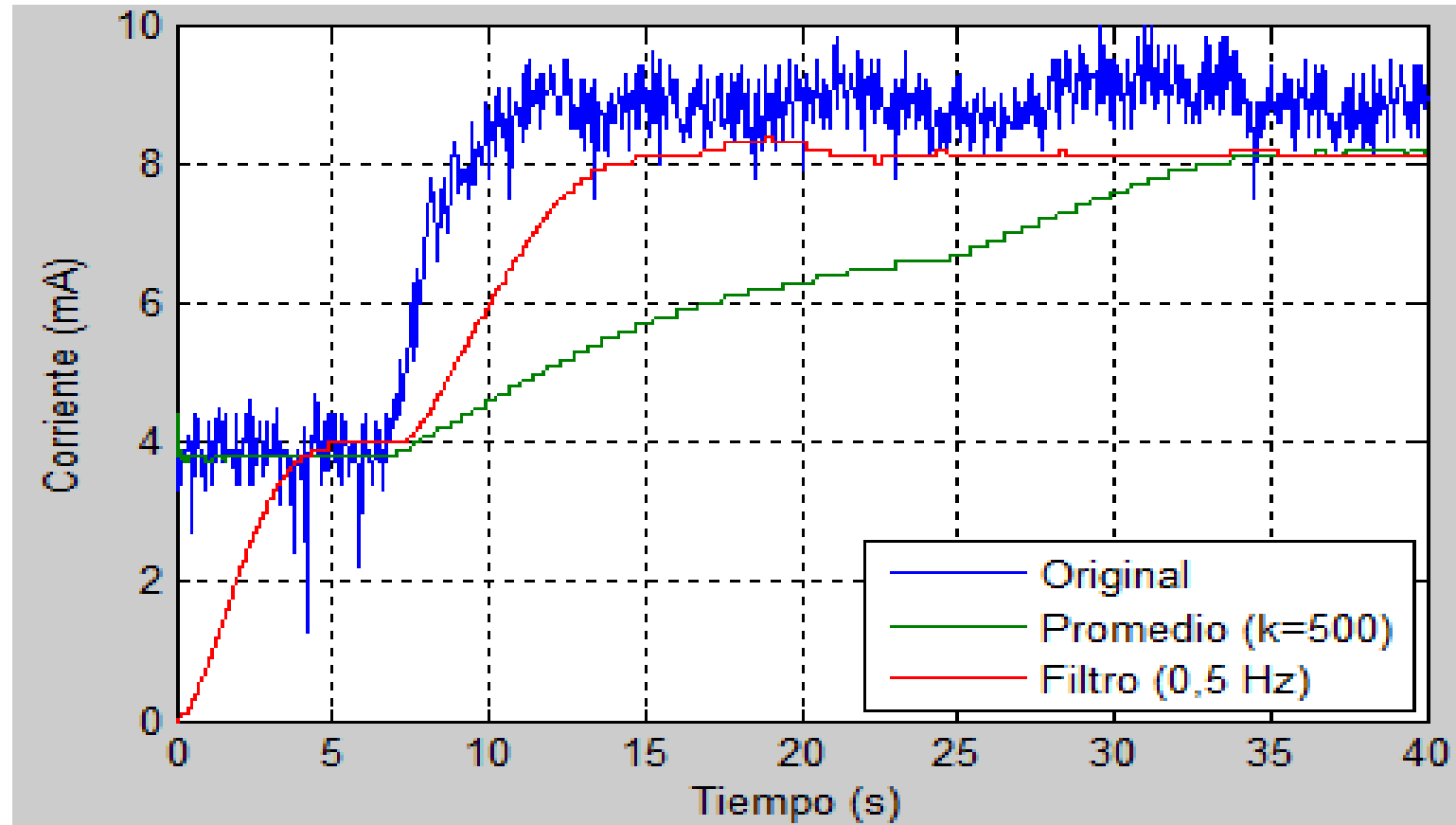
OBTENCIÓN DE DATOS

Dinámica del sistema



OBTENCIÓN DE DATOS

Filtrado de la señal

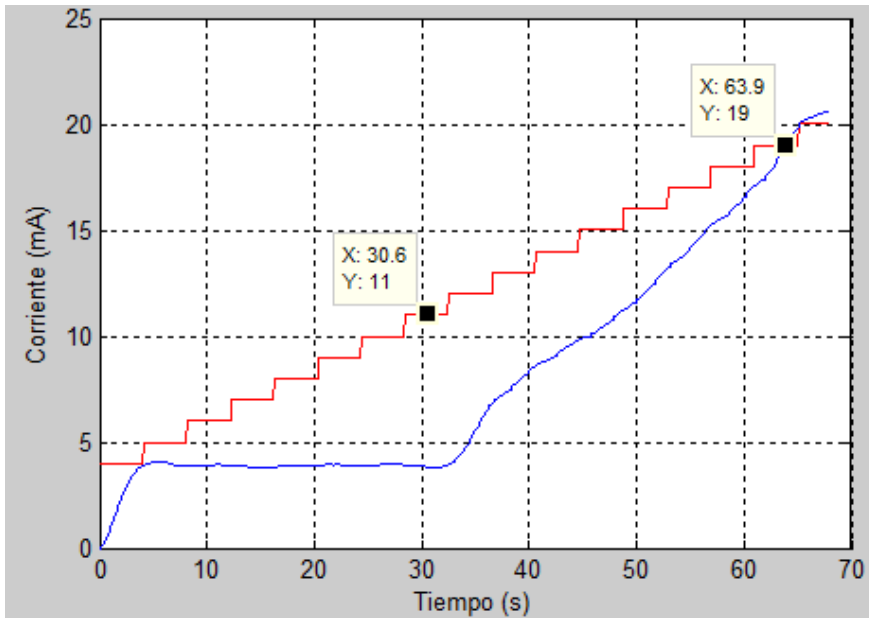


OBTENCIÓN DE DATOS

Frecuencia de muestreo

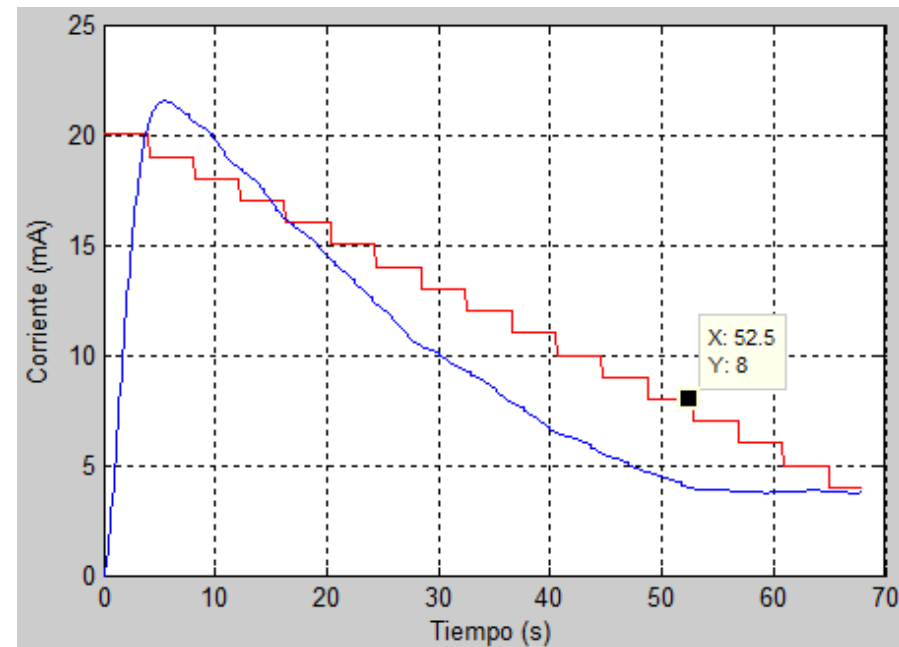
OBTENCIÓN DE DATOS

Rangos del sistema



Máxima respuesta con 19 mA

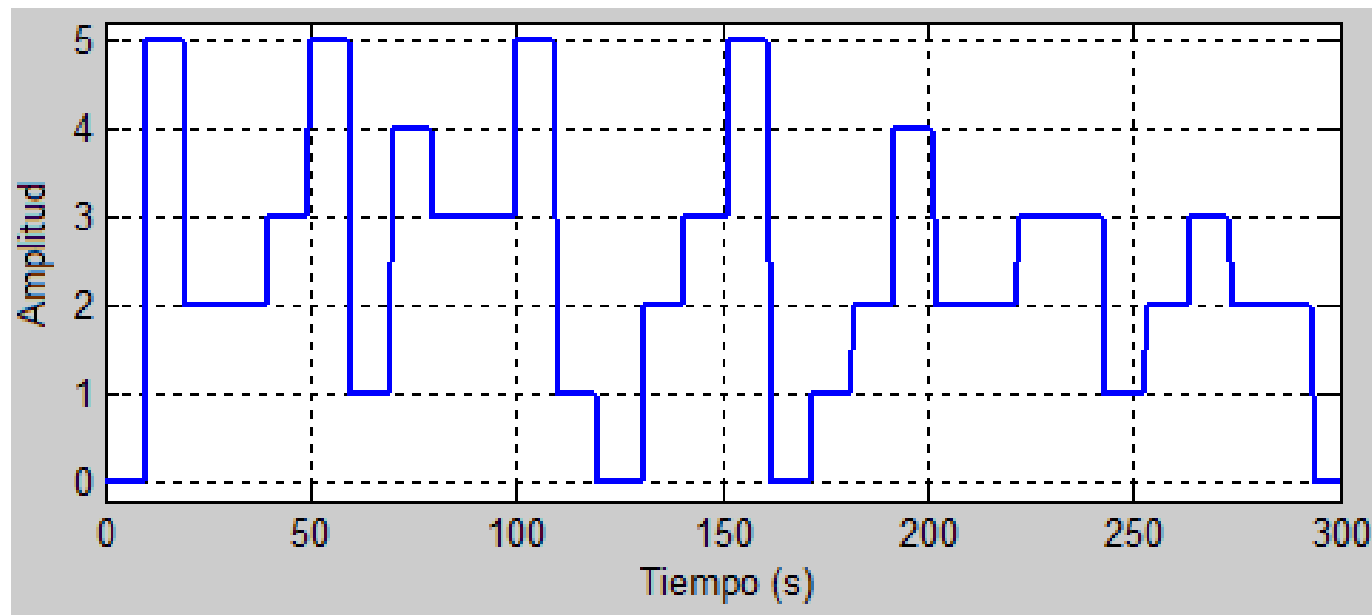
Mínima respuesta con 8 mA



OBTENCIÓN DE DATOS

Tipo de entrada

- Señal escalón proporciona una respuesta para todas las frecuencias.



OBTENCIÓN DE DATOS

Duración de los pulsos

- Máxima duración de acuerdo al tiempo de estabilización del sistema



OBTENCIÓN DE DATOS

Número de muestras

- 100 cambios de máxima duración

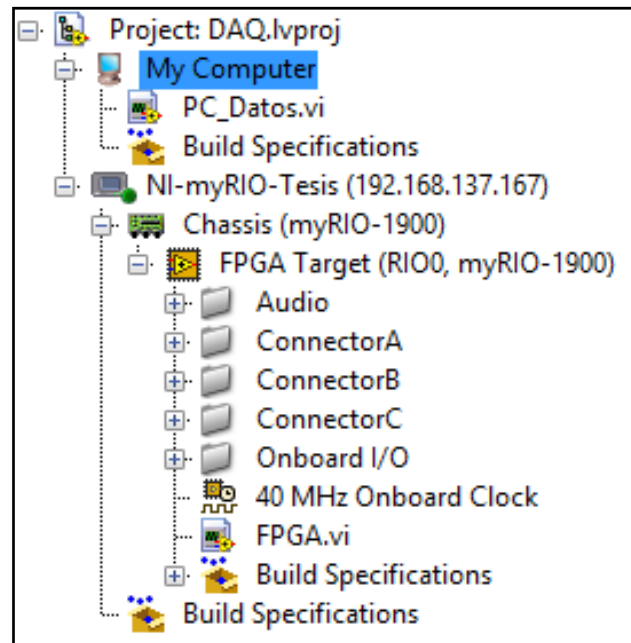
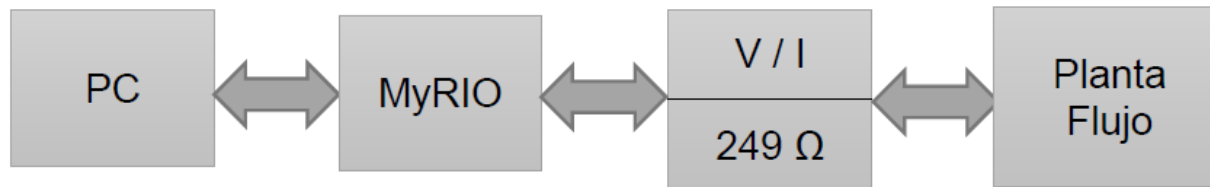
()

()



OBTENCIÓN DE DATOS

Adquisición de datos



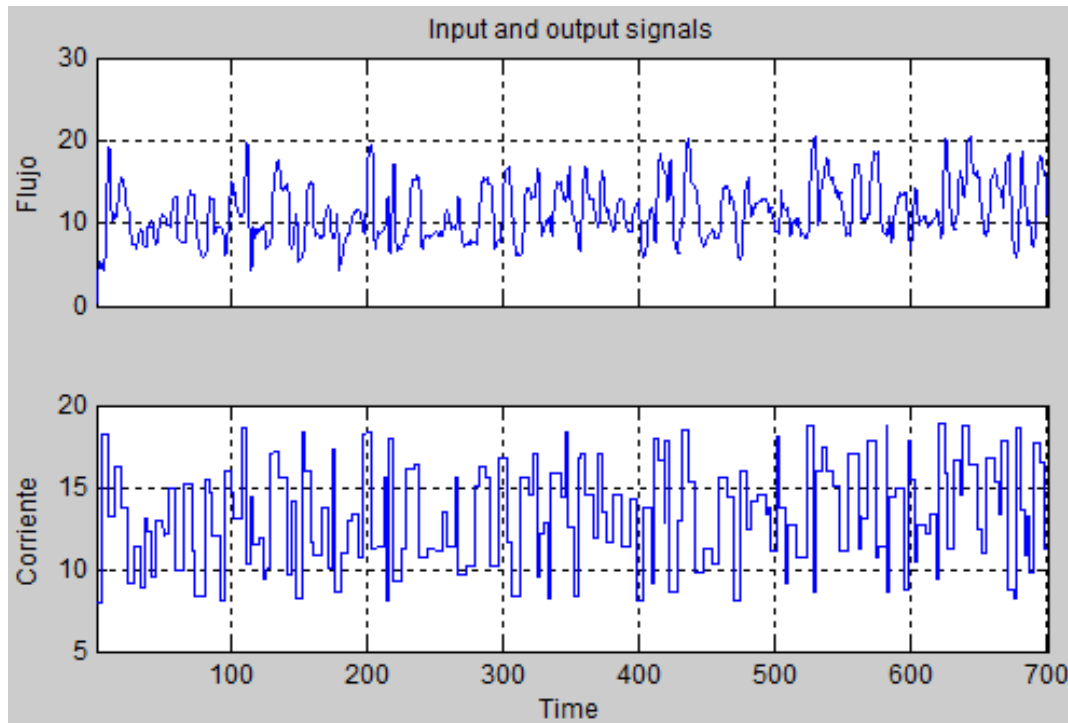
PREPROCESAMIENTO DE LOS DATOS

- Datos erróneos
- Filtrado por software
- Tiempo de muestreo inadecuado



MODELADO DEL SISTEMA EN MATLAB

Importación de datos



Import Data

Data Format for Signals: Time-Domain Signals

Input Properties: InterSample: zoh, Period: inf

Workspace Variable: Input: entrada, Output: salida

Channel Names: Input: Corriente, Output: Flujo

Data Information: Data name: flujos, Starting time: 0, Sampling interval: 0.25

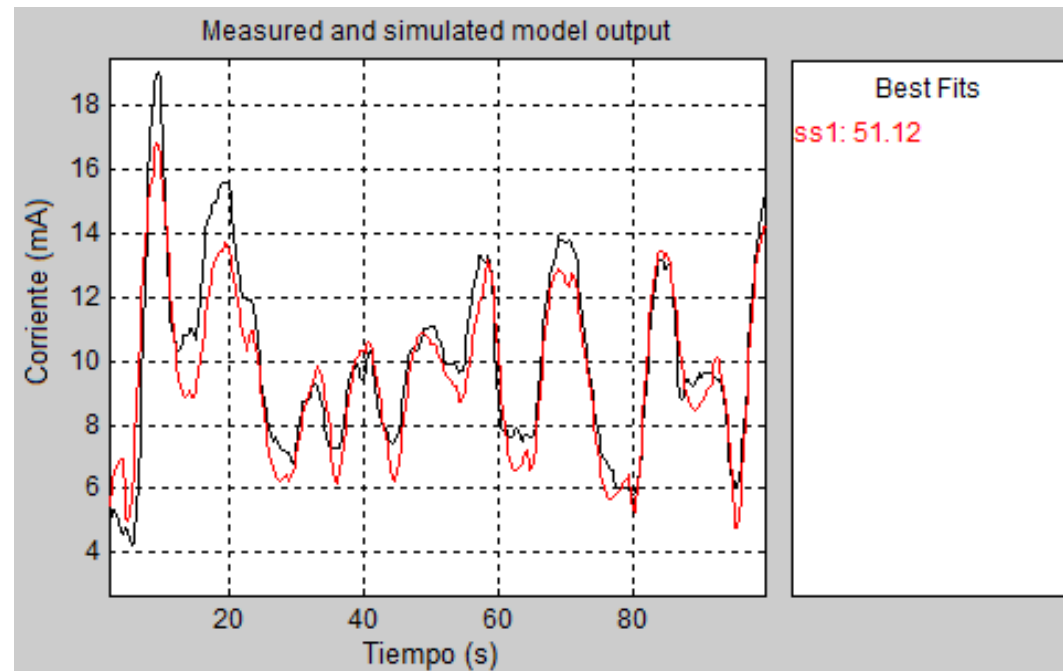
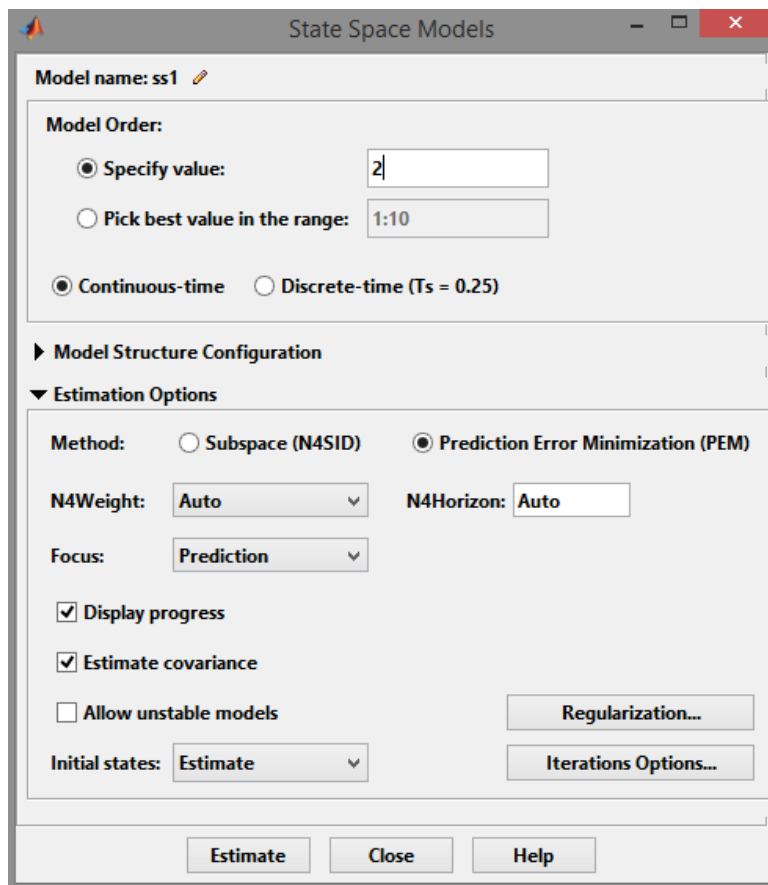
Physical Units of Variables: Input: mA, Output: mA

Notes: entrada y salida están en el workspace de MATLAB

Import, Reset, Close, Help

MODELADO DEL SISTEMA EN MATLAB

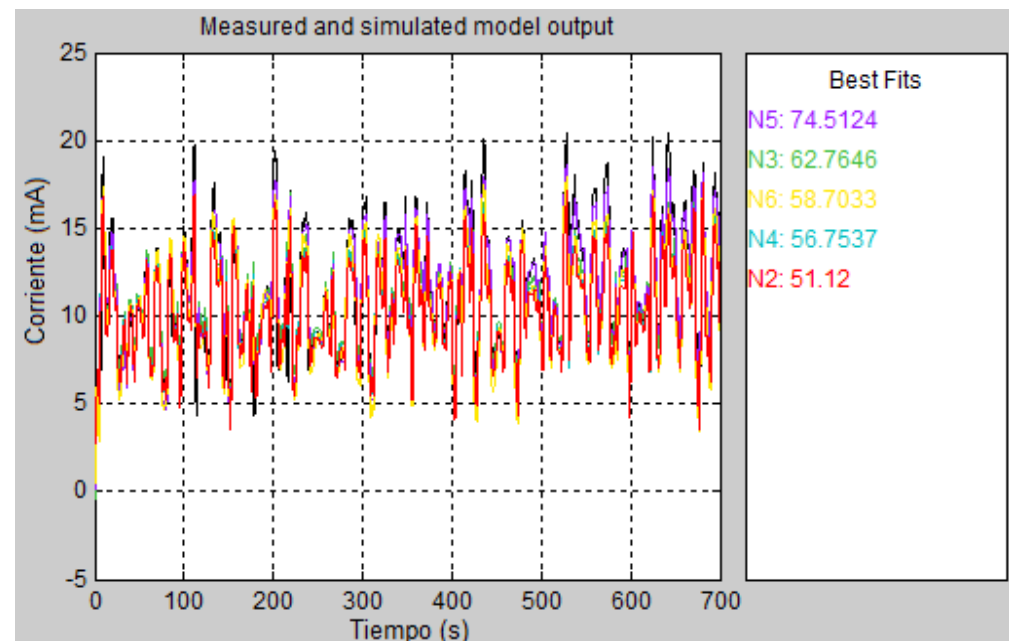
Obtención del modelo



MODELADO DEL SISTEMA EN MATLAB

Validación del modelo

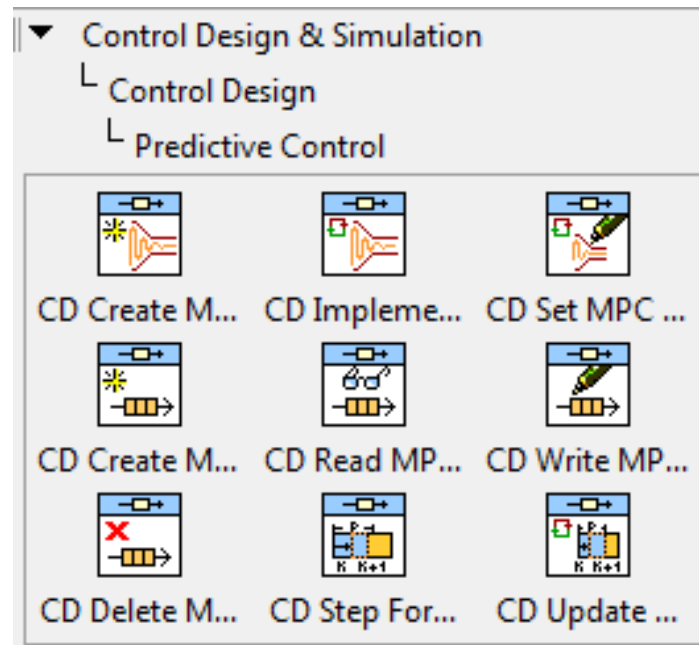
The screenshot shows the MATLAB/Simulink software interface. The 'Operations' panel is active, showing a 'Preprocess' button and a 'Flujo' plot. The 'Model Views' panel is also visible, showing checkboxes for 'Model output', 'Transient r...', 'Model resid...', 'Frequency ...', 'Zeros and poles', and 'Noise spectrum'. The 'Data Views' panel includes checkboxes for 'Time plot', 'Data spectra', and 'Frequency function'. The 'Trash' icon is also present.



DISEÑO DEL CONTROLADOR

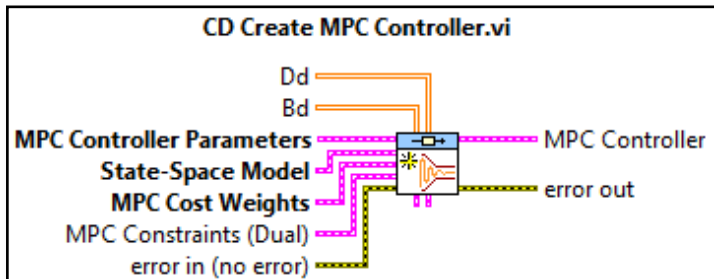
Paleta para el control MPC

- Toolkit de LabVIEW, Control Design & Simulation



DISEÑO DEL CONTROLADOR

Create MPC Controller



Prediction Horizon: 100
 Control Horizon: 2
 Initial Window: 0
 Integral Action?

u min init: 0,00
 u min final: 0,00
 u max init: 0,00
 u max final: 20,00
 y min init: 0,00
 y min final: 0,00
 y max init: 0,00
 y max final: 20,00
 du min init: 0,00
 du min final: -0,10
 du max init: 0,00
 du max final: 0,10

stopping criteria
 function tolerance: 1E-8
 parameter tolerance: 1E+6
 gradient tolerance: 1E+6
 max iterations: 10000
 max function calls: 10000
 max time (sec): -1

Model name: Flujo
 Sampling Time: 100m

A

0	0,93	-0,03	0,03	0,02	-0,03
0	0,05	0,88	0,08	0,04	-0,06
0	0,02	-0,07	0,83	-0,24	0,17
0	-0,01	0,05	0,04	0,71	0,23
0	-0,02	-0,05	0,07	0,15	0,87

B

0	-0
0	-0
0	0
0	0,01
0	-0

C

0	173,9	-26,39	4,45	17,45	12,11
0					

D

0	0
0	

Output Error Weightings

0	100,00	0,00
0	0,00	0,00

Control Action Change Weightings

0	50,00	0,00
0	0,00	0,00

Control Action Error Weightings

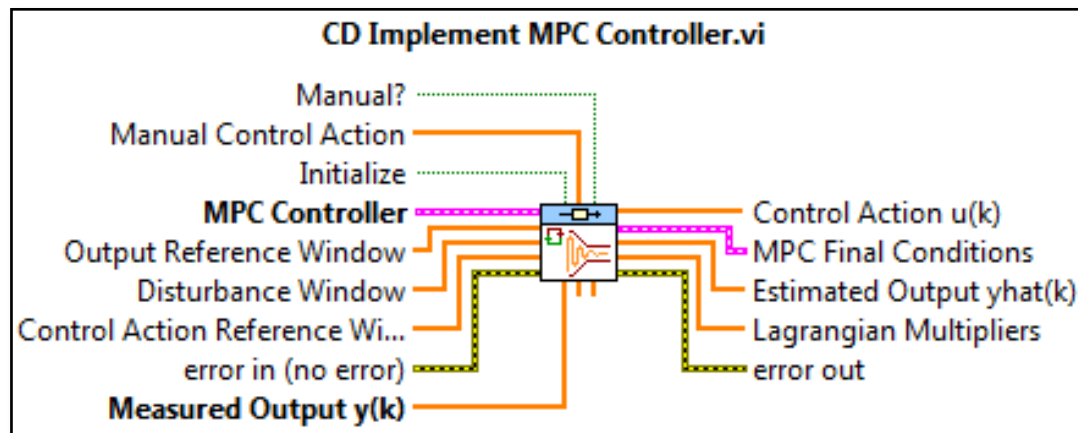
0	0,00	0,00
0	0,00	0,00



DISEÑO DEL CONTROLADOR

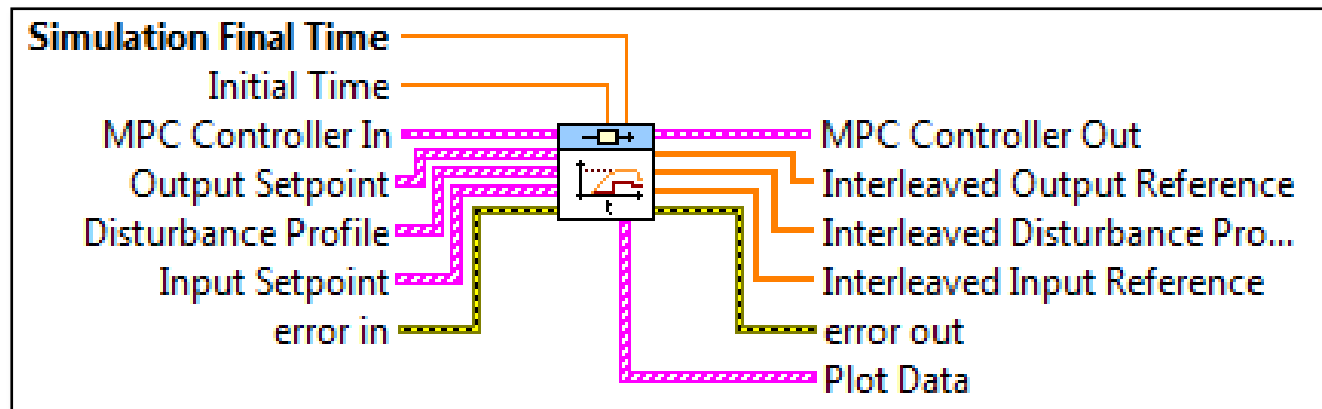
Implement MPC Controller

- MPC Controller
- Output Reference Window
- Measured Output $y(k)$
- Control Action $u(k)$



SIMULACIÓN DEL CONTROLADOR

Generate Time Profiles for MPC



Setpoint

Profile

0

time (s)

Reference

0,000

4,00

time (s)

Reference

50,000

16,00

time (s)

Reference

100,000

6,00

time (s)

Reference

150,000

12,00

time (s)

Reference

200,000

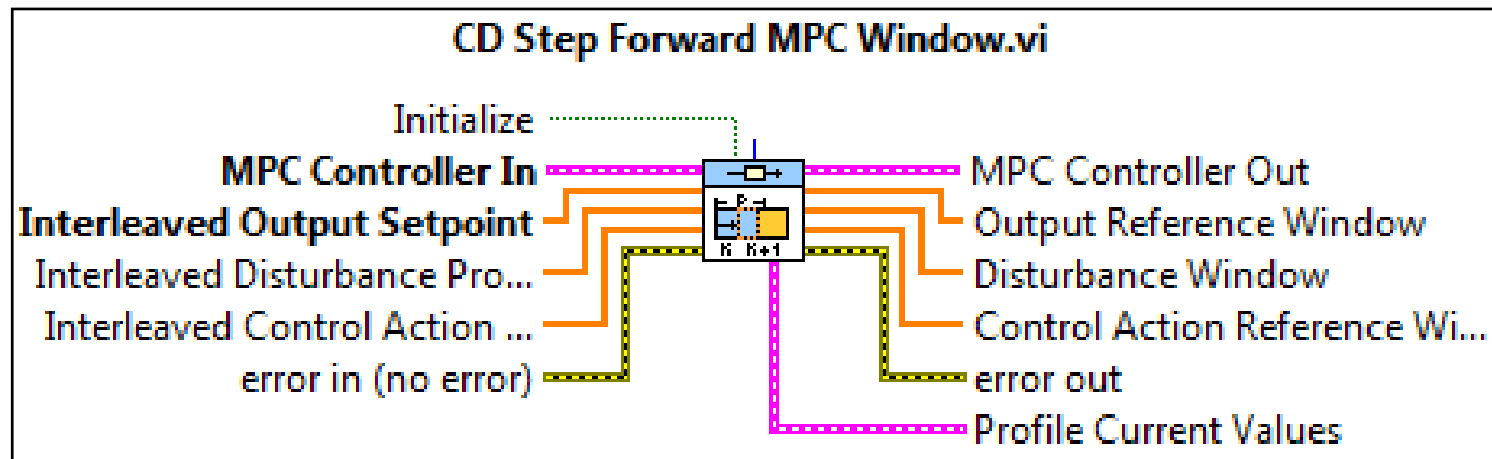
16,00



SIMULACIÓN DEL CONTROLADOR

Step Forward MPC Window

- Interleaved Output Setpoint
- Output Reference Window

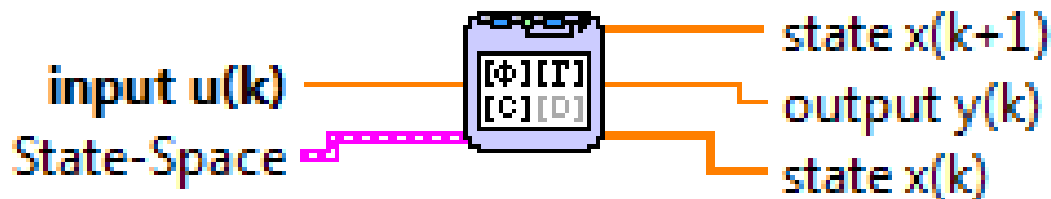


SIMULACIÓN DEL CONTROLADOR

Simulación de la planta

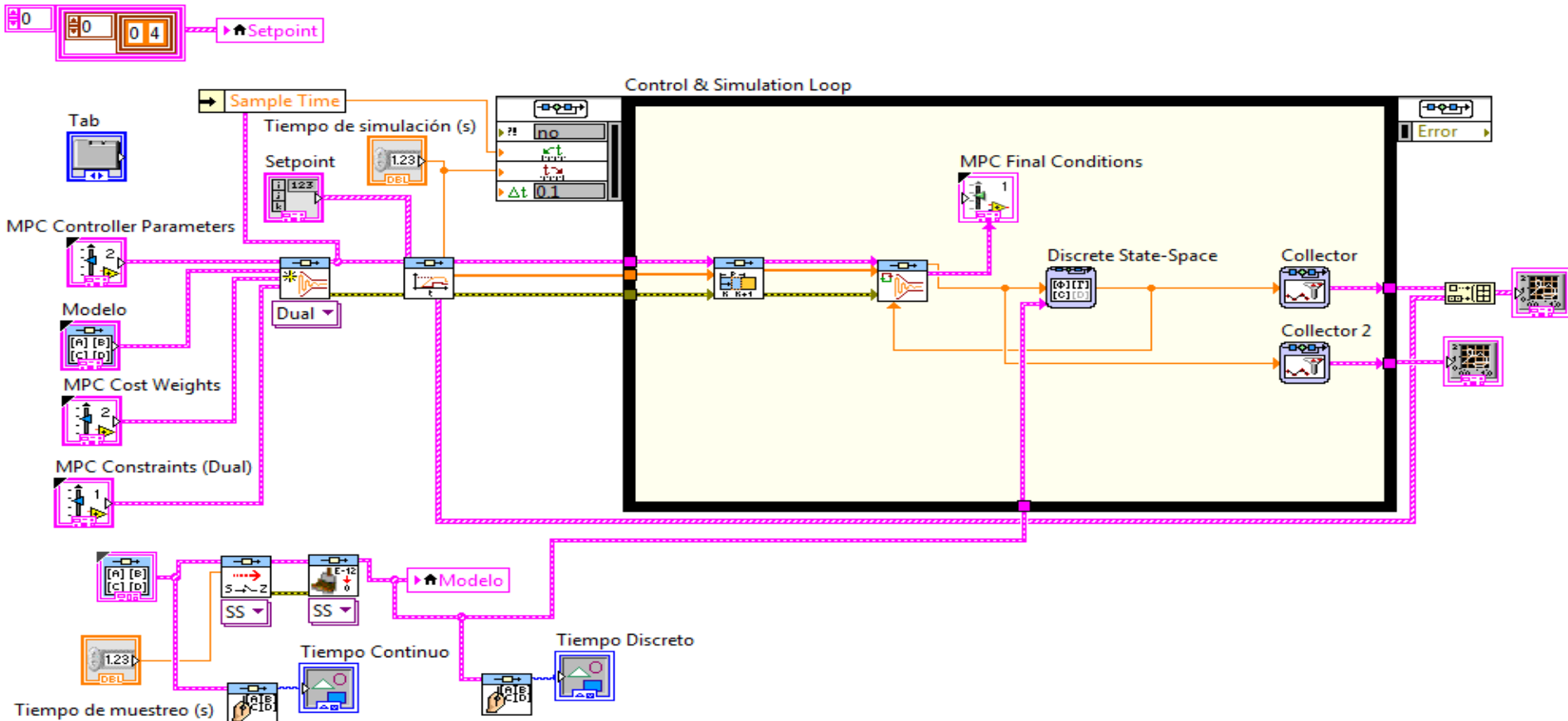
- Input $u(k)$
- State Space
- Output $y(k)$

Discrete State-Space



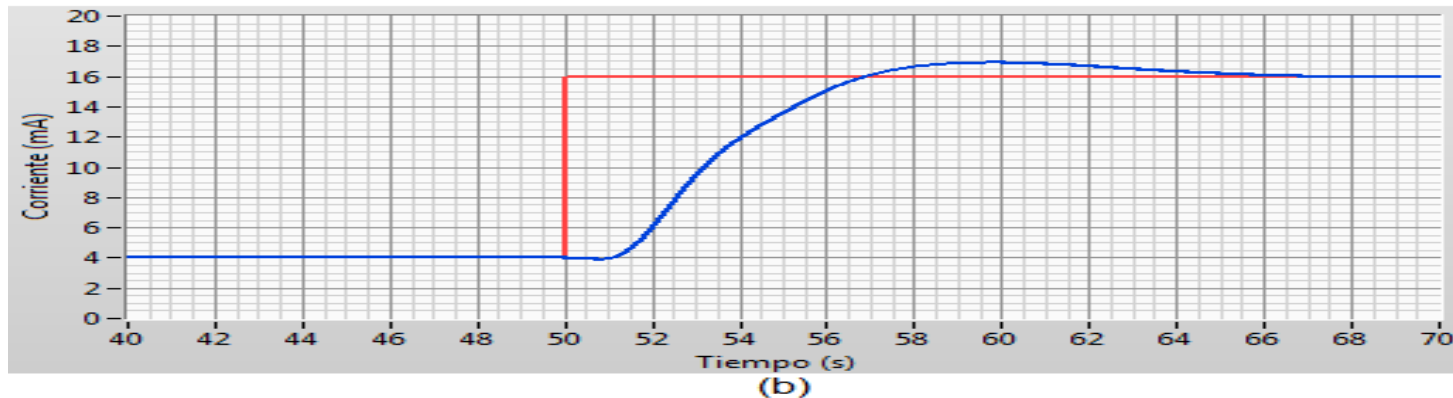
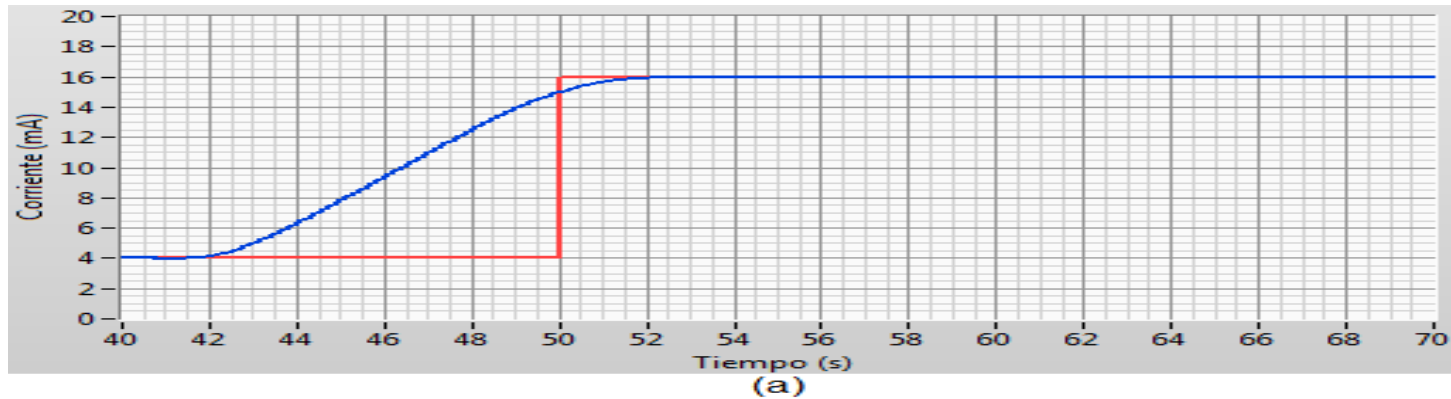
SIMULACIÓN DEL CONTROLADOR

Diagrama de bloques



COMPARACIÓN ENTRE MPC Y PID

Setpoint vs Process Value

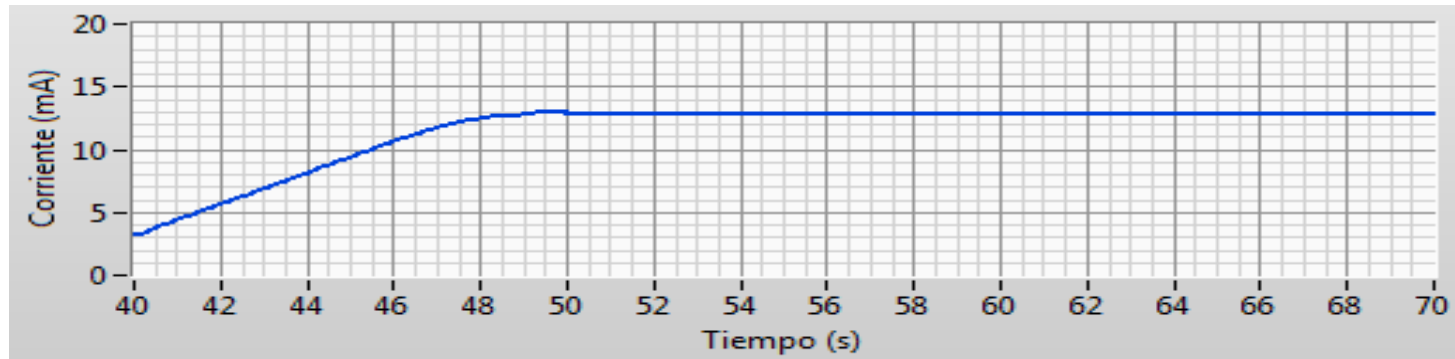


(a) MPC, (b) PID

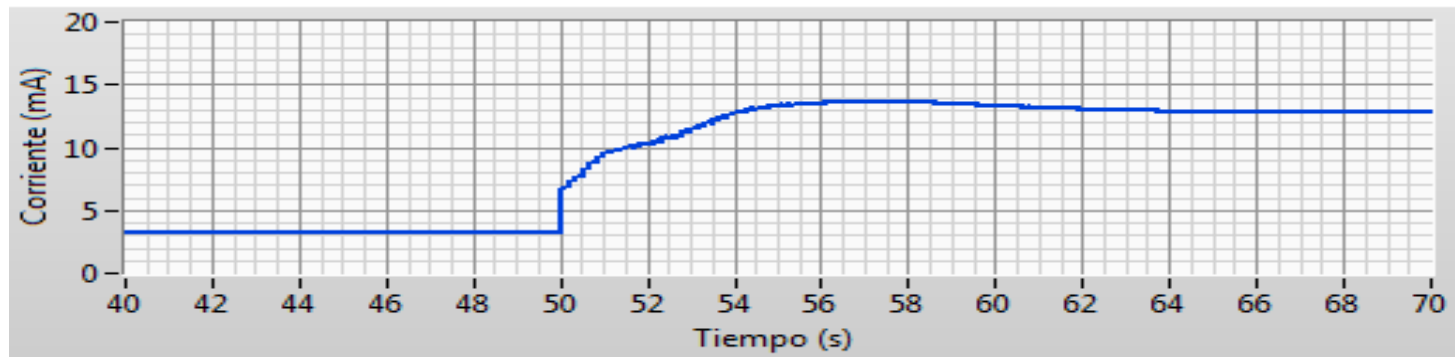


COMPARACIÓN ENTRE MPC Y PID

Control Value



(a)



(b)

(a) MPC, (b) PID



COMPARACIÓN ENTRE MPC Y PID

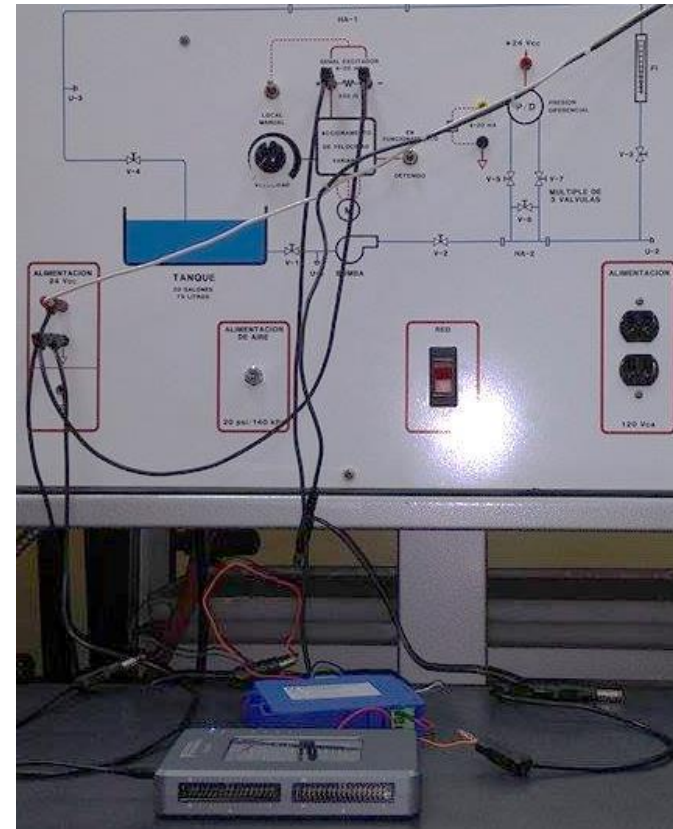
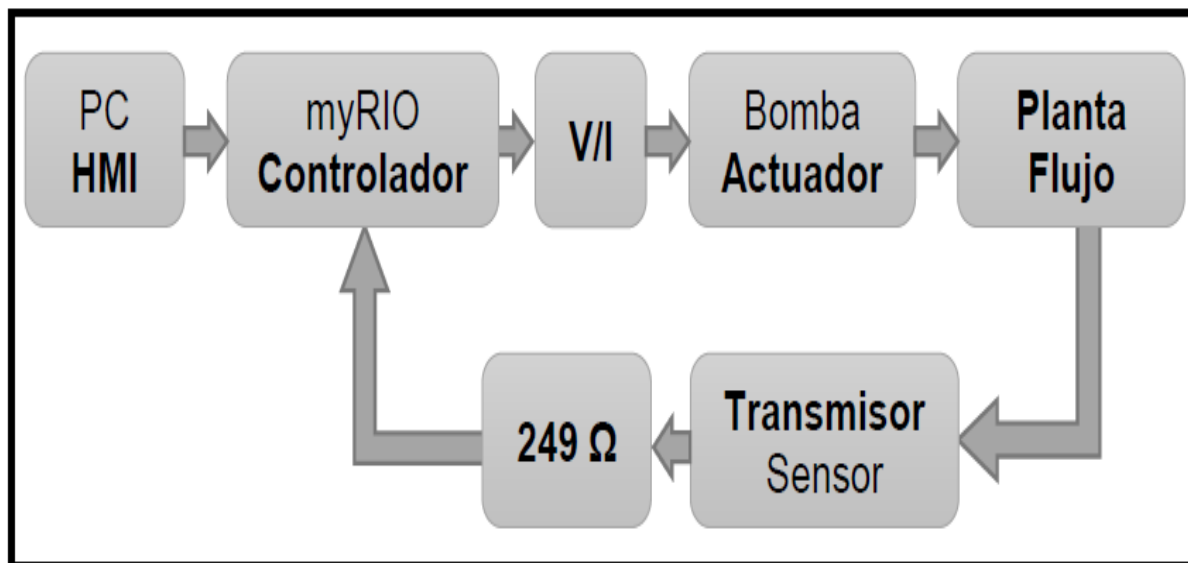
Tabla comparativa

	MPC	PID
Tiempo de estabilización aprox. (s.)	10	17
Sobreimpulso aprox. (%)	0	6
Estabilidad en la señal de control	Estable	Dinámica



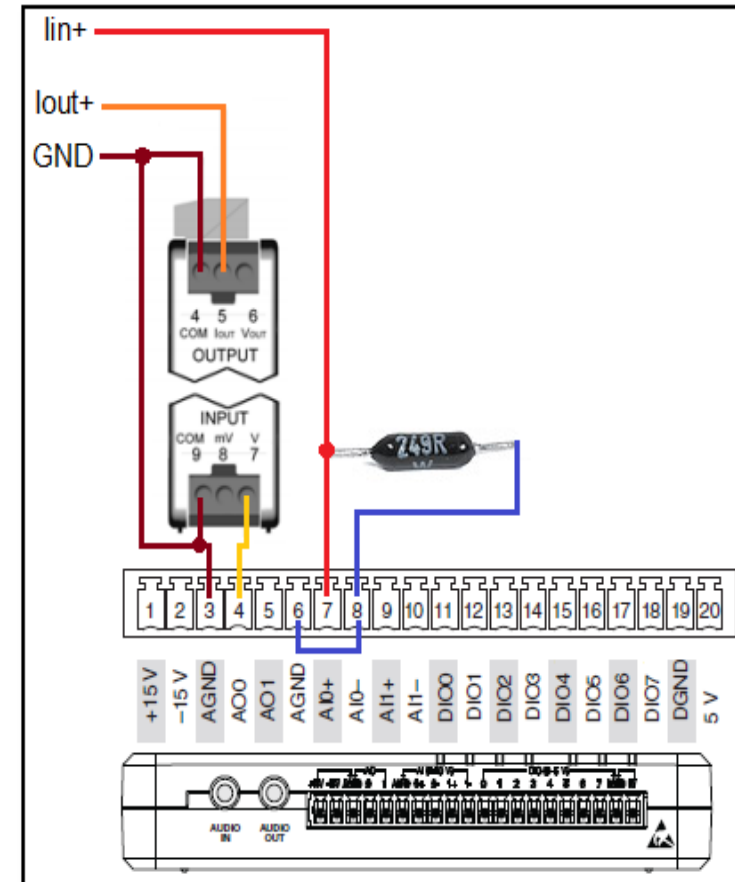
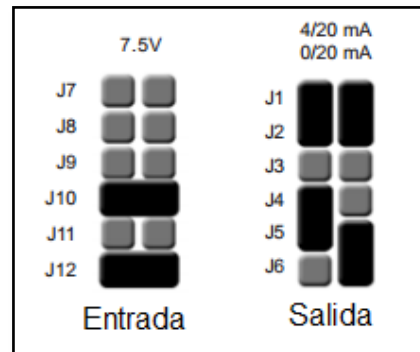
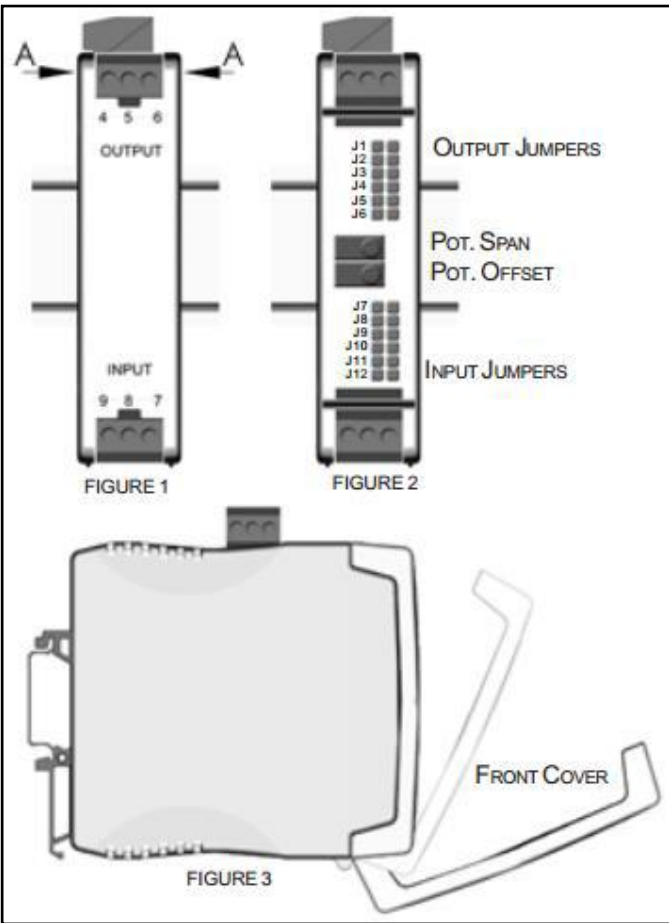
HARDWARE

Diagrama de conexiones



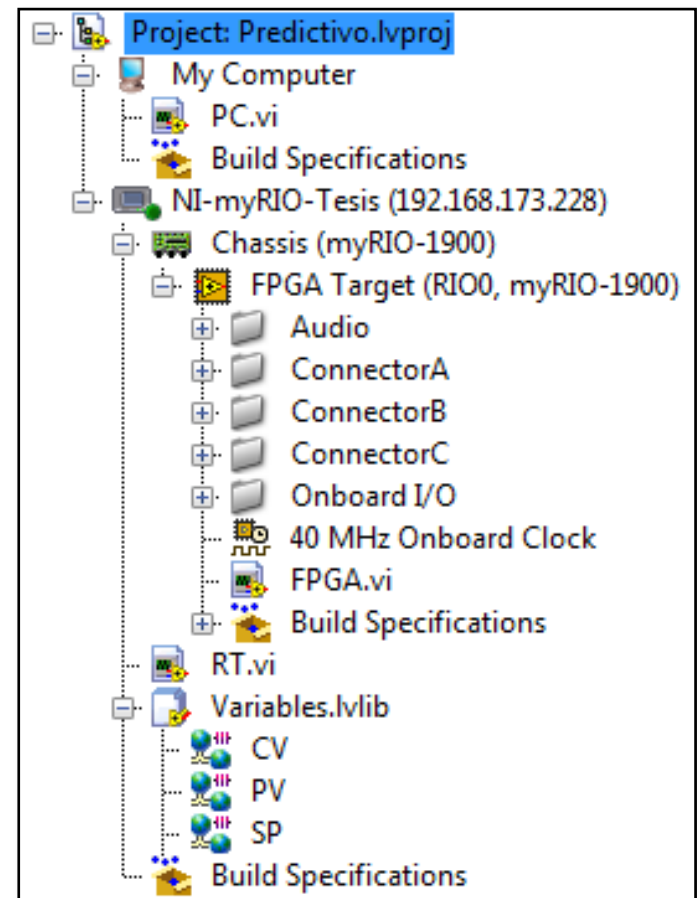
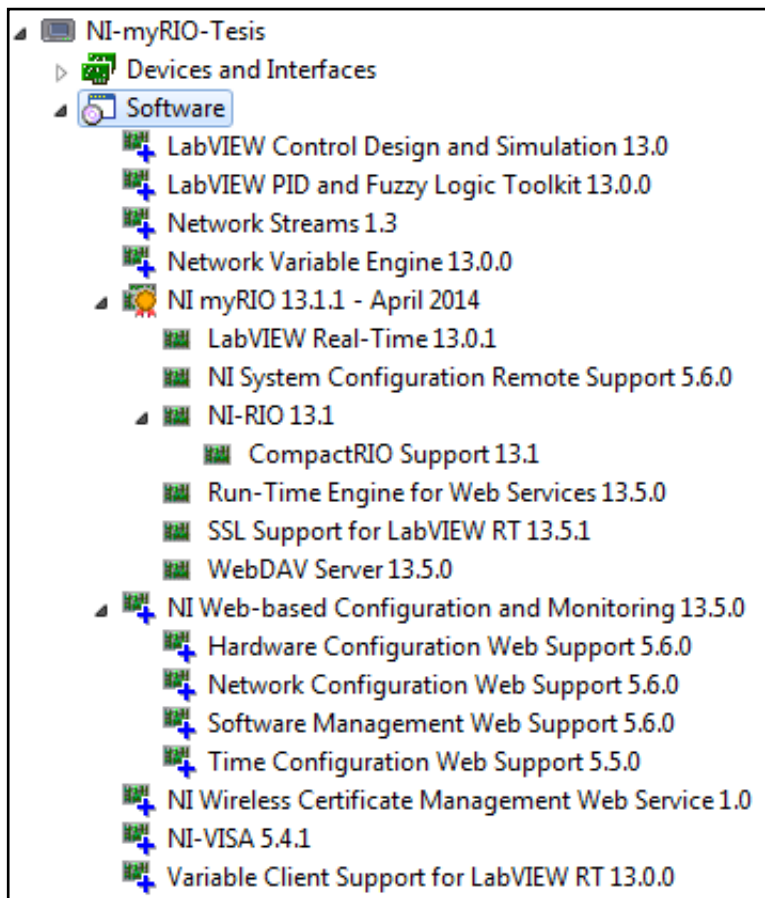
HARDWARE

Conversiones Voltaje - Corriente



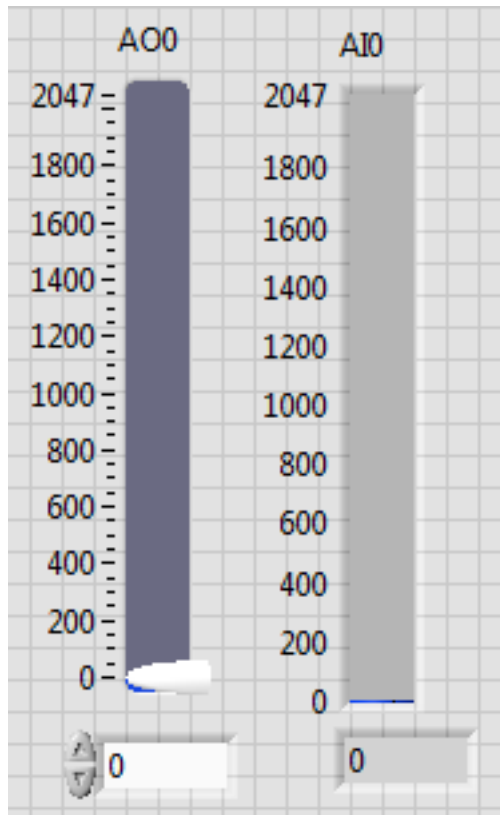
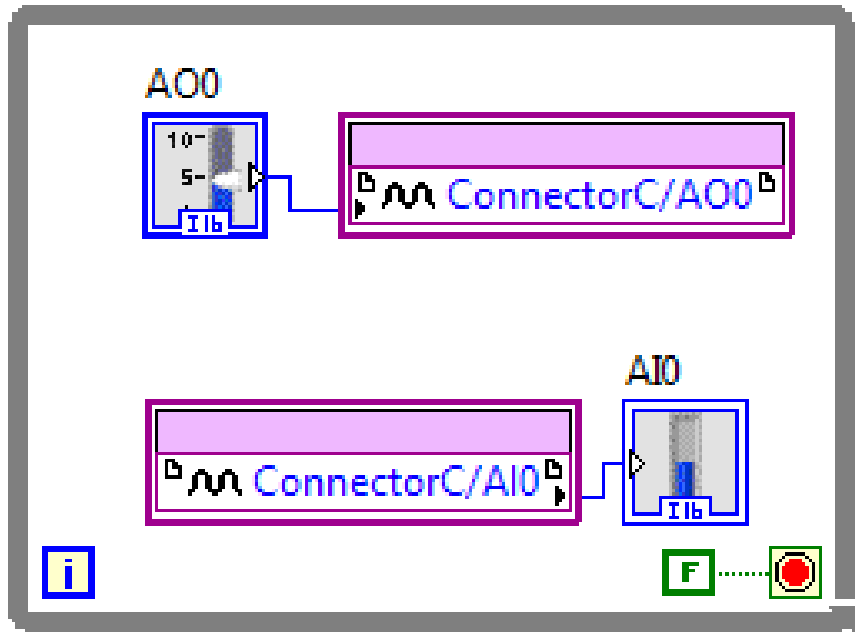
SOFTWARE

Toolkits y Proyecto en LabVIEW



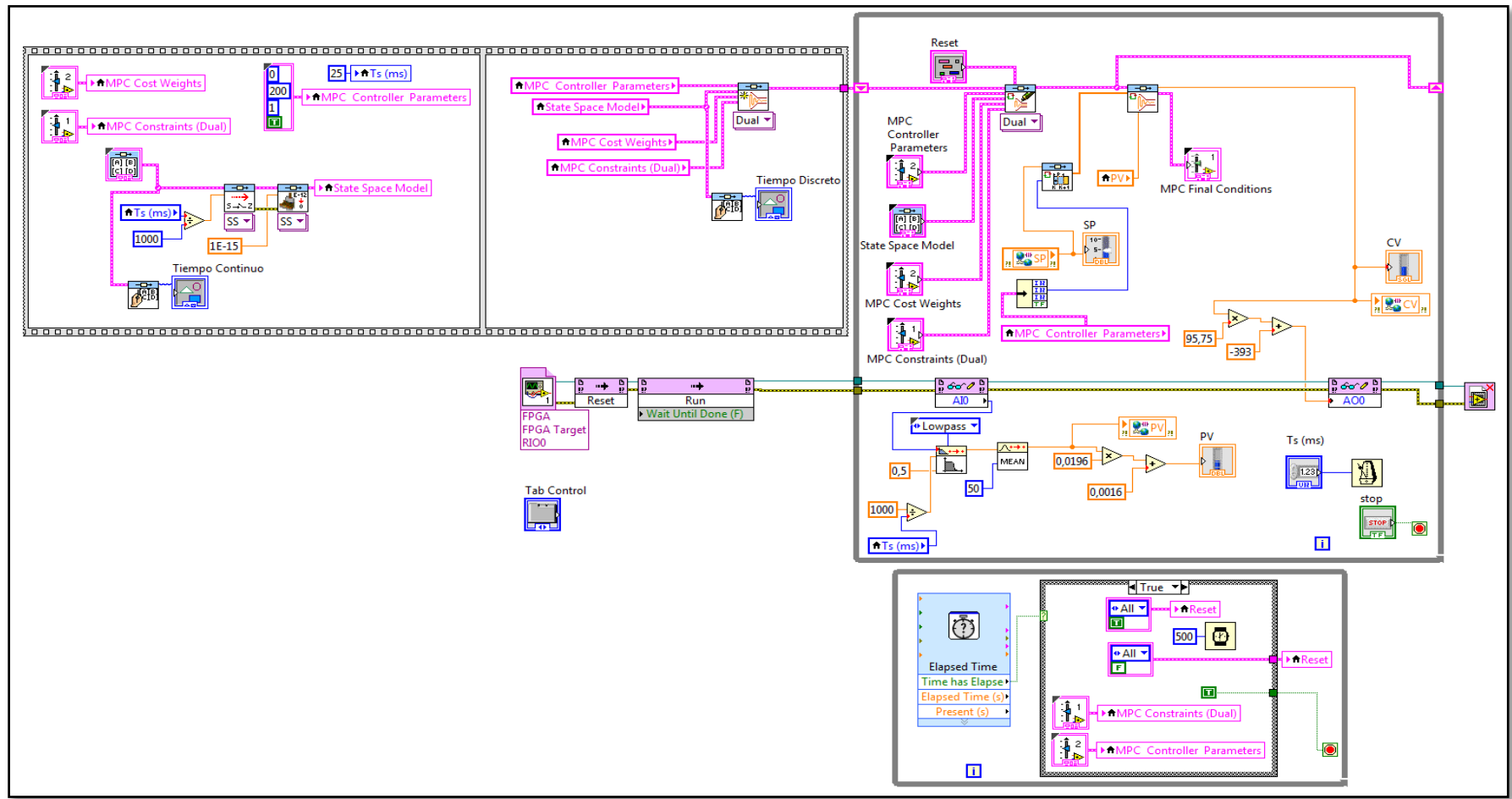
SOFTWARE

FPGA.vi



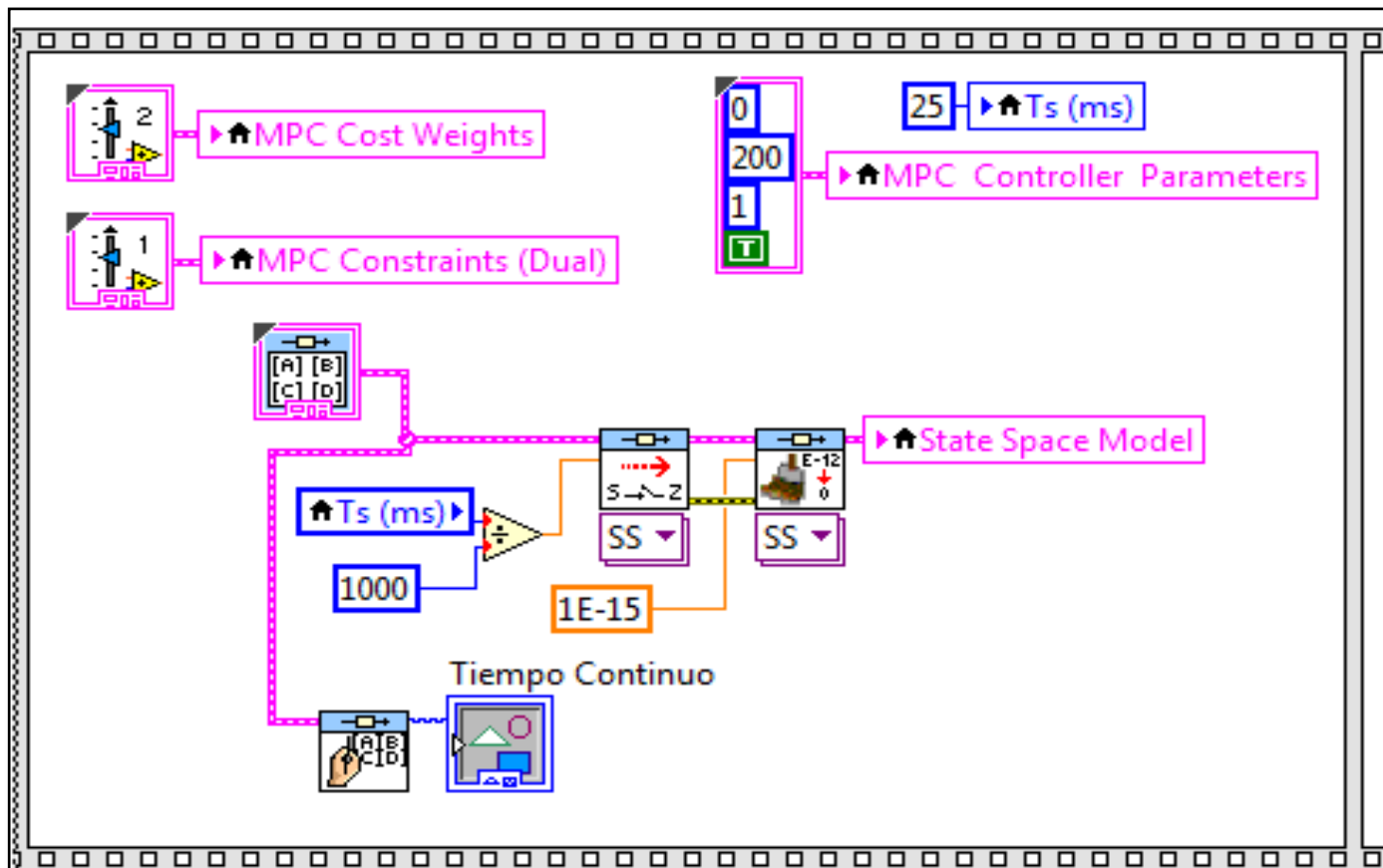
SOFTWARE

Controlador RT.vi



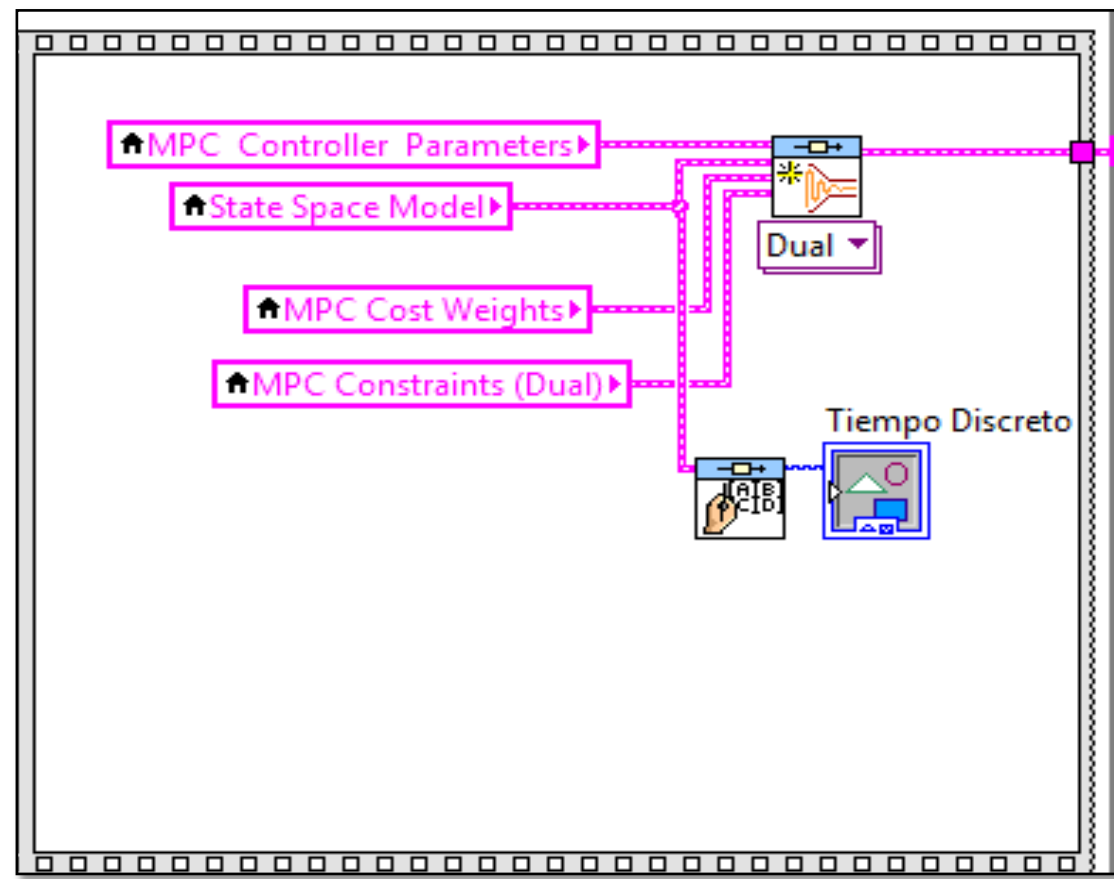
SOFTWARE

Controlador RT.vi



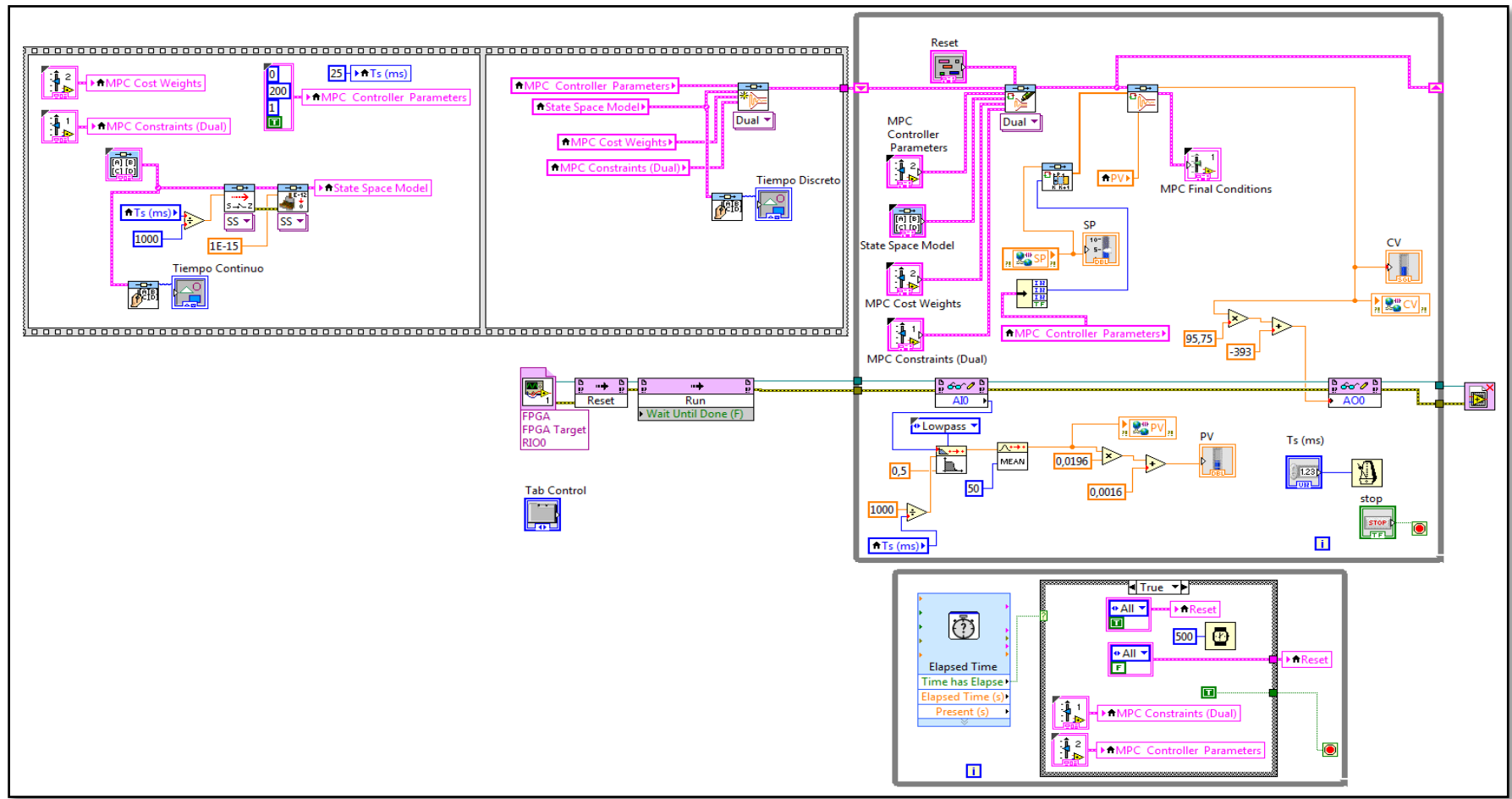
SOFTWARE

Controlador RT.vi



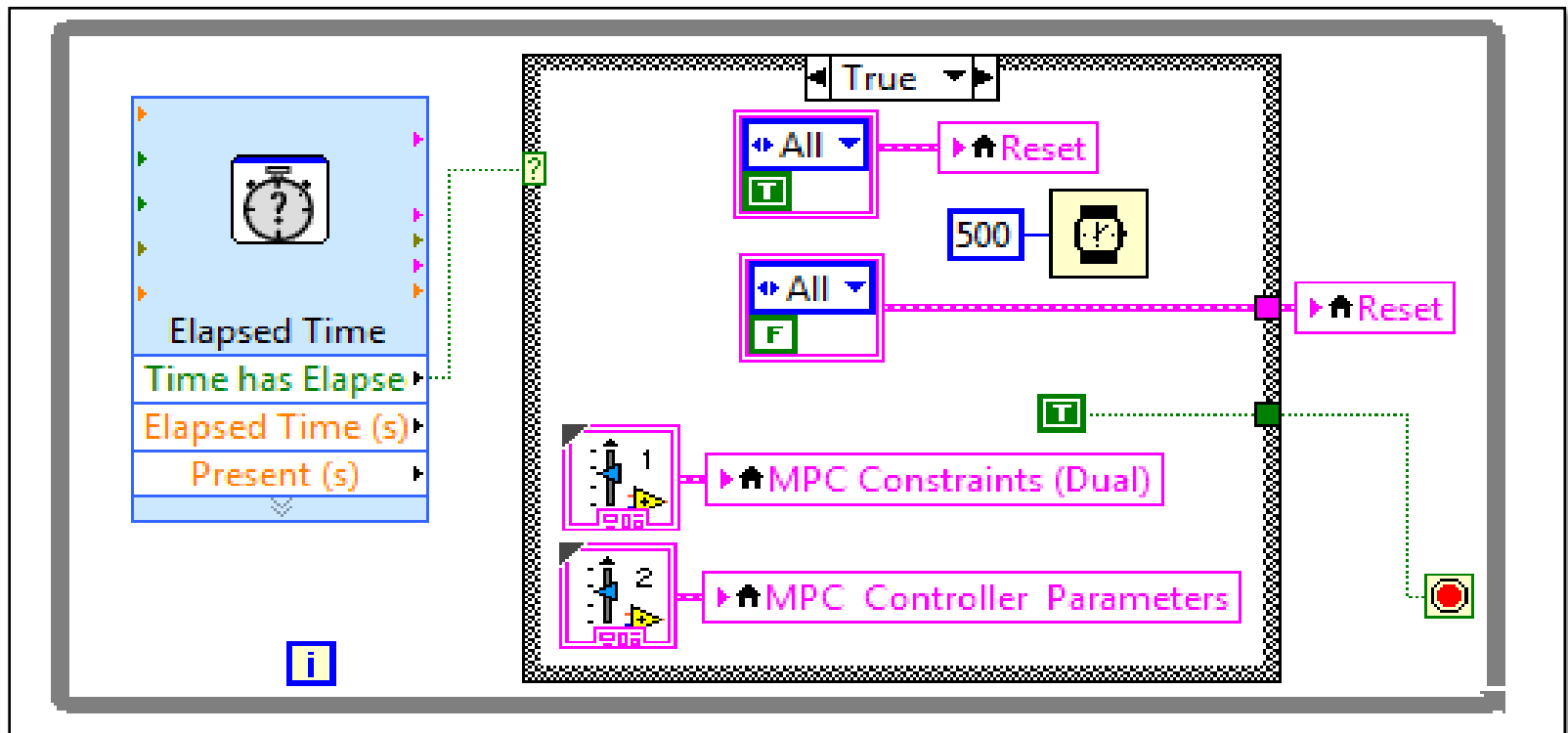
SOFTWARE

Controlador RT.vi



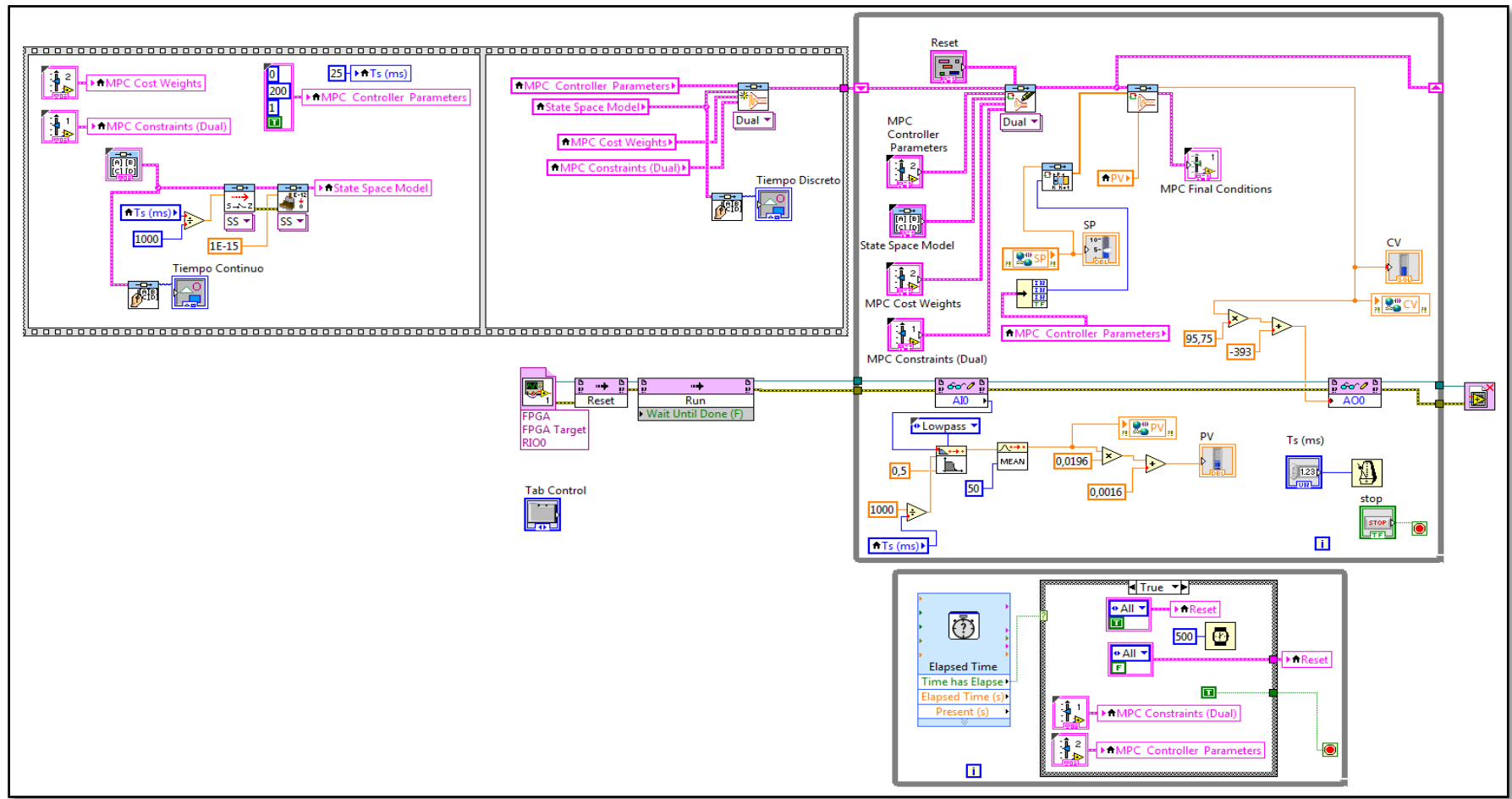
SOFTWARE

Controlador RT.vi



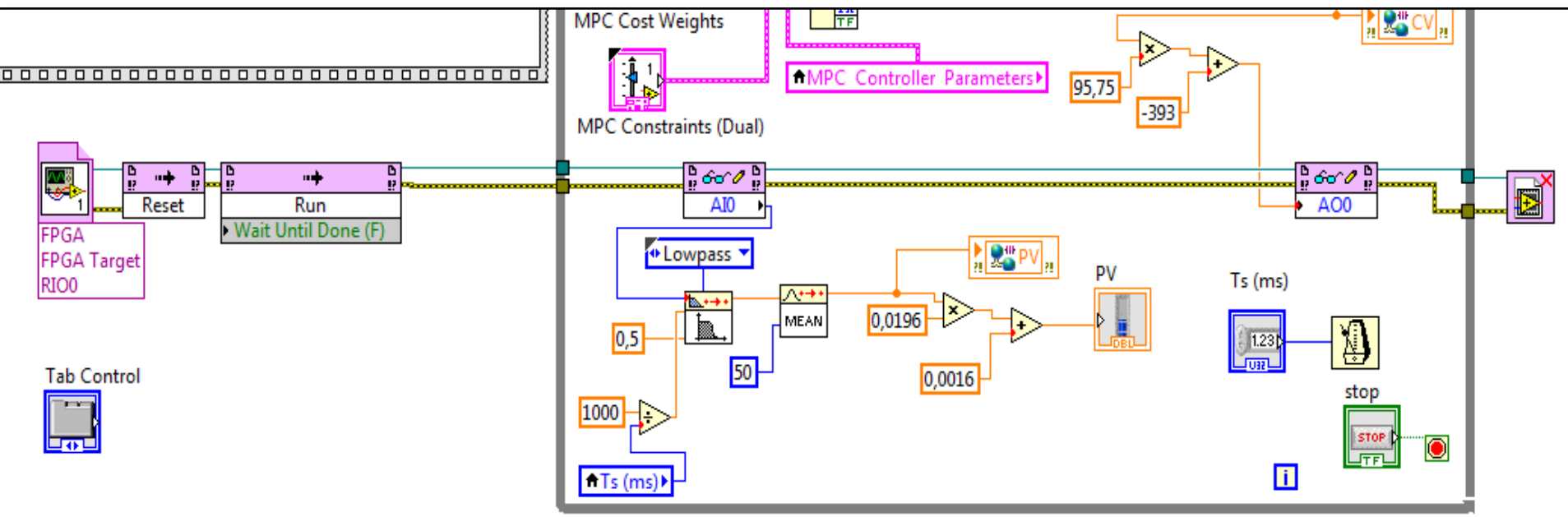
SOFTWARE

Controlador RT.vi



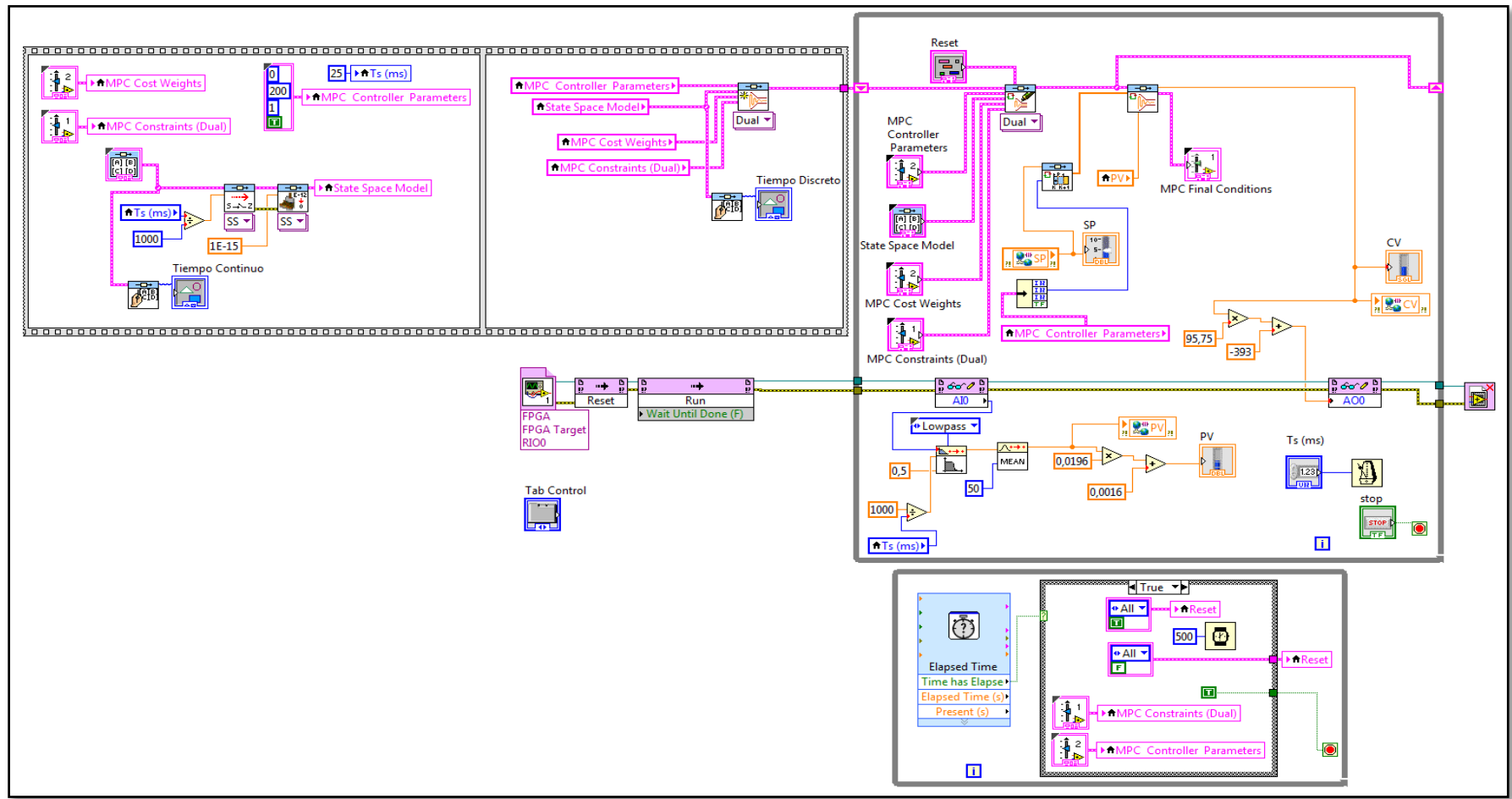
SOFTWARE

Controlador RT.vi



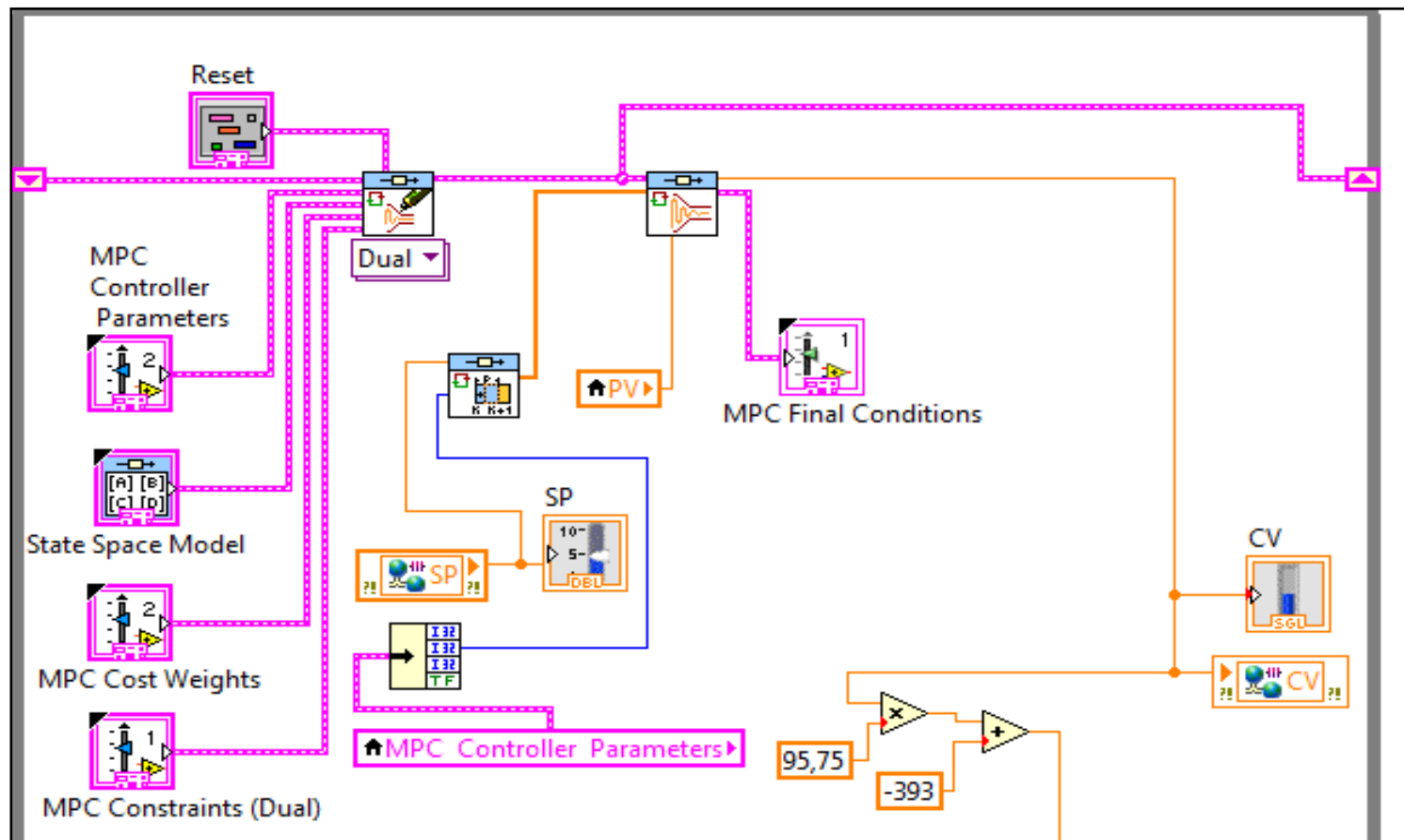
SOFTWARE

Controlador RT.vi



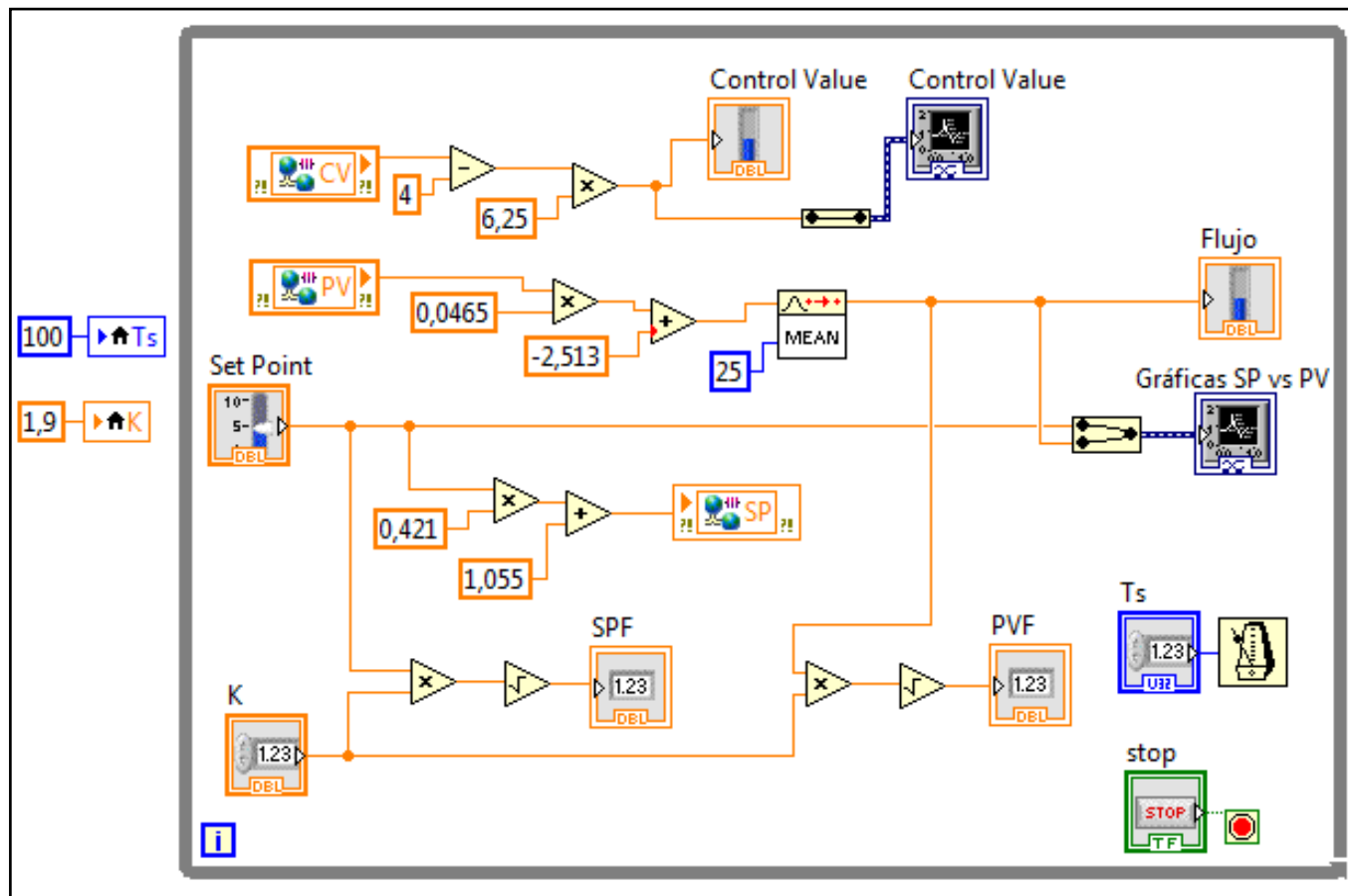
SOFTWARE

Controlador RT.vi



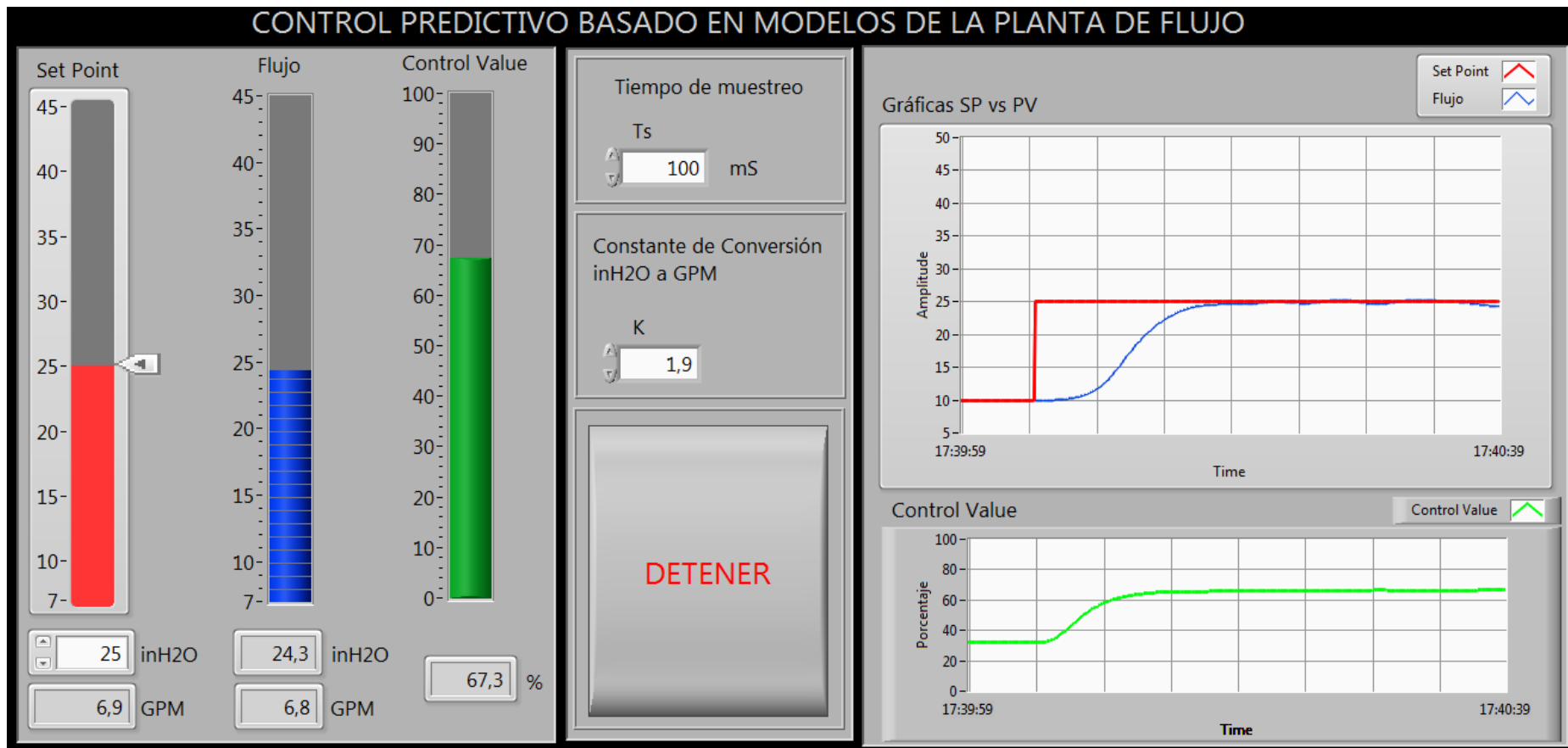
SOFTWARE

Interfaz HMI PC.vi



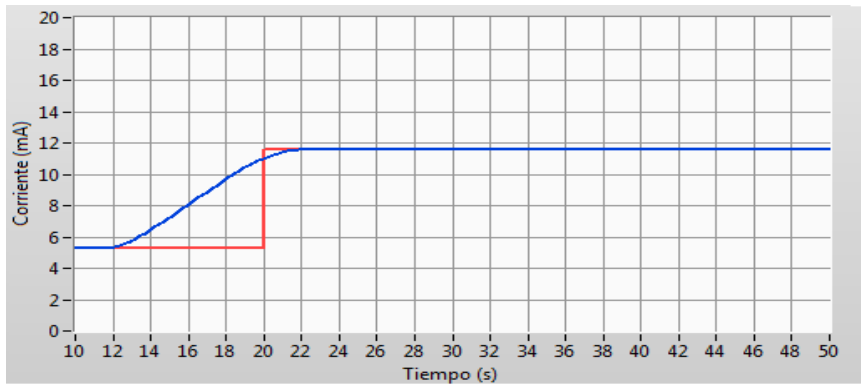
SOFTWARE

Interfaz HMI PC.vi

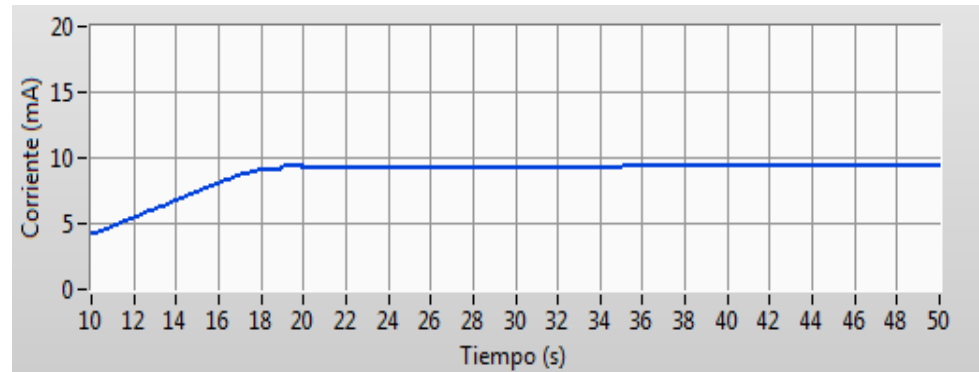


ANÁLISIS DE RESULTADOS

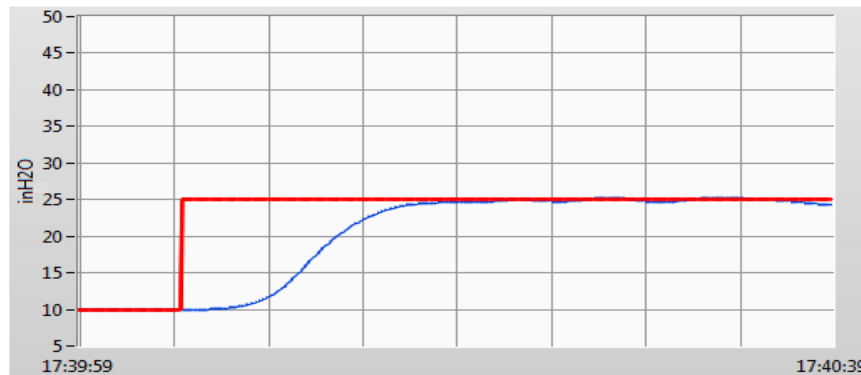
Comparación MPC simulado e implementado



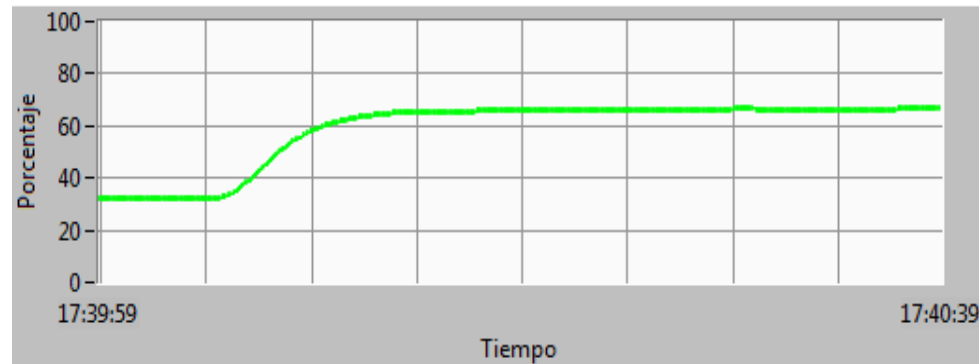
(a)



(a)



(b)



(b)

(a) MPC, (b) PID



ANÁLISIS DE RESULTADOS

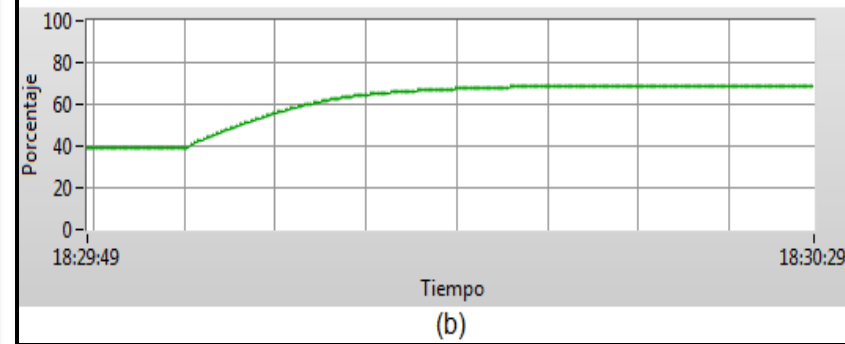
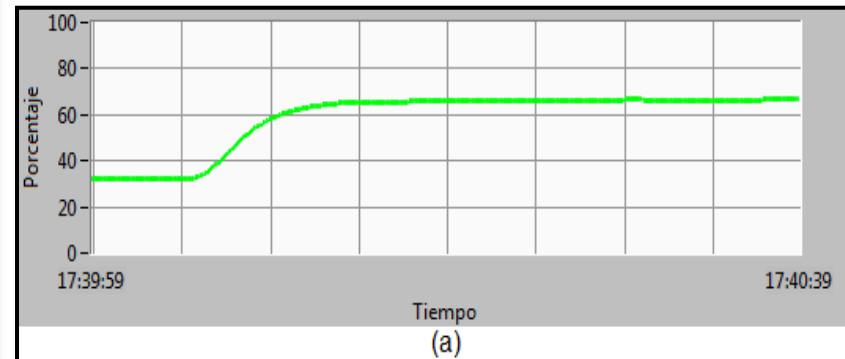
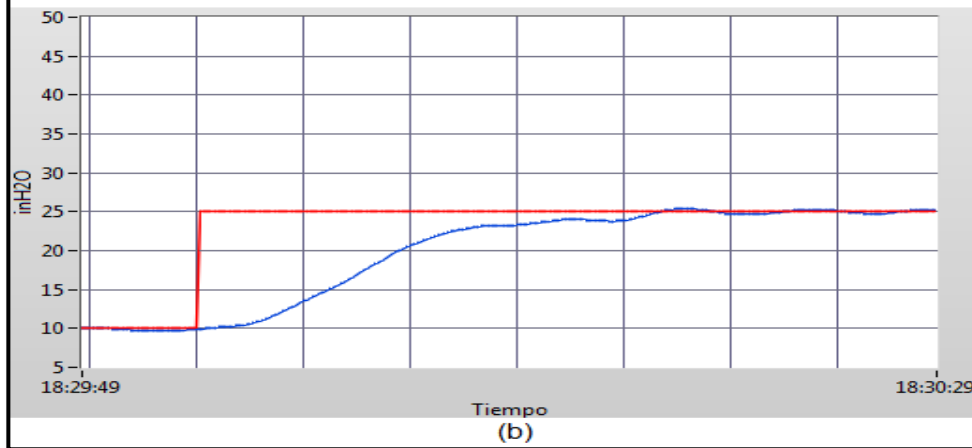
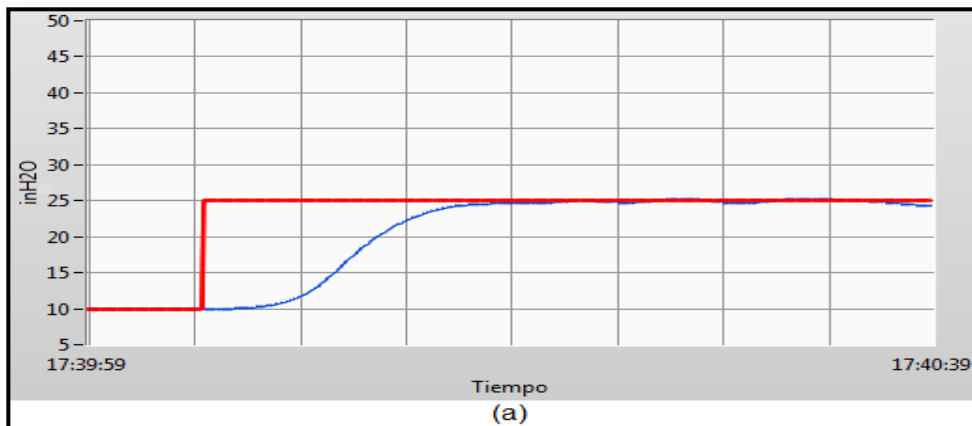
Comparación MPC simulado e implementado

Setpoint (inH2O)	Tiempo de estabilización aprox. (s)		Porcentaje de sobreimpulso aprox. (%)	
	Simulado	Real	Simulado	Real
10 – 25	10	15	0	0
25 – 40	10	10	0	2
40 – 25	11	10	0	0
25 – 10	11	21	0	0
10 – 40	11	12	0	0
40 – 10	12	26	0	0
Promedio	10,83	15,66	0	0,33



ANÁLISIS DE RESULTADOS

Comparación MPC y PID implementado



(a) MPC, (b) PID



ANÁLISIS DE RESULTADOS

Comparación MPC simulado e implementado

Setpoint (inH2O)	Tiempo de estabilización aprox. (s)		Porcentaje de sobreimpulso aprox. (%)	
	MPC	PID	MPC	PID
10 – 25	15	22	0	2
25 – 40	11	15	2	5
40 – 25	10	18	0	3
25 – 10	20	27	0	0
10 – 40	13	20	0	5
40 – 10	26	27	0	0
Promedio	15,83	21,50	0,33	2,5



CONCLUSIONES

- Una parte integral del controlador predictivo es el modelo matemático del sistema a controlar, por tanto, la estimación del mismo es parte fundamental del procedimiento, el grado de coincidencia entre el proceso real y el estimado influye de manera significativa en los resultados finales del controlador, pudiendo mejorarlo notablemente o incluso agravar las respuestas del sistema frente a otros tipos de controles más simples. Por consiguiente esta primera etapa del desarrollo debe ser ejecutada correctamente.
- Las simulaciones resultan muy favorables para entender el funcionamiento de un control predictivo, resultando más cómodo ejecutar pruebas bajo el proceso modelado y entender cada uno de los parámetros que componen a un controlador MPC antes de proceder a implementarlo de manera física en el sistema real, se demostró que los resultados de un control simulado respecto a las respuestas reales del sistema son semejantes, dependiendo el grado de acierto de la coincidencia entre el modelo real y el estimado.



CONCLUSIONES

- La respuesta que se obtuvo de un control predictivo basado en modelos realizado sobre un proceso de flujo en relación a un control tradicional como el PID es marcadamente superior, destacando las características principales como: menor tiempo de estabilización para cambios en los valores de referencia, disminución del porcentaje de sobreimpulso siendo cercano a cero para el MPC y una señal de control más estable y eficiente para el actuador.
- El controlador predictivo no se enmarca únicamente en mantener el proceso en un nivel fijado, como es el enfoque de un control tradicional, además busca optimizar los recursos para hacerlo y maximizar la eficiencia del sistema completo, resaltando las restricciones que constan como parámetros del MPC para evitar valores inadecuados que deban ser evadidos en el proceso, limitando el funcionamiento del sistema en sus rangos adecuados, de igual manera confinando los niveles del actuador a sus valores nominales, impidiendo daños en el equipo.



CONCLUSIONES

- Los parámetros de optimización disponibles en el controlador MPC, hacen que se pueda obtener un control adecuado a nuestros requerimientos, a diferencia de controladores que no permiten manipular características como el nivel de estabilidad, pendientes de cambio ascendentes y descendentes para la señal de control e influencia del error, adecuando así la respuesta necesaria para cada proceso en particular y consiguiendo adaptar la acción de control a las necesidades del equipo actuador.
- Como característica adicional entre un controlador predictivo y un control tradicional, el tiempo de implementación es menor para los controles básicos, principalmente aquellos que no dependen de un modelo matemático de la planta y se basan exclusivamente en cálculos del error para determinar una acción de control, en consecuencia el tipo de control a efectuar depende del sistema y los recursos necesarios para hacerlo.



CONCLUSIONES

- El control predictivo ha visto un lento avance de aceptación a nivel industrial, principalmente por los equipos necesarios para ejecutarlo, necesitando dispositivos con capacidad de procesamiento superiores a los normalmente usados en controles industriales, con el avance tecnológico esto ha dejado de ser un impedimento y este estudio demuestra que los equipos actuales tienen las características necesarias para su implementación.



RECOMENDACIONES

- La estimación del modelo matemático del proceso es una fracción muy trascendental dentro de un control MPC, por ende, se recomienda culminar esta etapa con los mejores resultados posibles, realizando las verificaciones y correcciones necesarias antes de proceder con la siguiente fase de la implementación.
- 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



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA