



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA



**Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño**

Ingeniería Electrónica Industrial y Automática



**“DISEÑO PID DE UN CALEFACTOR.  
SENSORIZADO Y MONITORIZADO CON LABVIEW. “**

*Alumno:*

**D. Enrique A. Späth LLeó**

Director trabajo fin grado:

**Dr. Carlos Ricolfe Viala**

Valencia, Septiembre 2014



# Índice general.

1	MEMORIA.....	1
1.1	Objeto.....	1
1.1.1	Antecedentes.....	1
1.1.2	Objetivos.....	1
1.1.3	Justificación.....	2
1.2	Disposiciones legales y normas.....	8
1.3	Controlador compactRIO NI CompactRIO-9074.....	9
1.3.1	Descripción sistema embebido.....	9
1.3.2	Elementos.....	9
1.4	Módulos E/S serie C.....	10
1.4.1	Módulo salida analógica de corriente 4 – 20 mA NI 9265.....	10
1.4.2	Módulo entrada analógica 100 $\Omega$ RTD NI 9217.....	11
1.5	Sensor PT100.....	13
1.6	Actuador SSR ERDA ERCA1-225PA.....	13
1.7	NI LabView.....	14
1.7.1	MAX (Measurement & Automation Explorer).....	14
1.7.2	Configuración compactRIO NI 9074.....	15
1.8	Identificación experimental Planta.....	16
1.8.1	Sistemas Lineales y No Lineales.....	16
1.8.2	Punto funcionamiento (punto equilibrio).....	17
1.8.3	Función De Transferencia del proceso.....	18
1.8.4	Obtención datos temporales proceso, en Lazo Abierto.....	19
1.8.5	Sistemas dinámicos de orden reducido.....	23
1.9	Acción de Control.....	32
1.9.1	Proporcional (P).....	32
1.9.2	Proporcional e Integral (PI).....	33
1.9.3	Proporcional y Derivativa (PD).....	34
1.9.4	Proporcional, Integrativa y Derivativa (PID).....	35
1.10	Cálculos analíticos PID.....	37
1.11	Diseño PID con función “sisotools” de Matlab.....	41
1.12	Simulación proceso y ajuste PID con entorno Simulink de Matlab.....	43
1.13	Implementación PID en LabView.....	46
1.13.1	Funciones Vi integral y derivativa.....	46

1.13.2	Función PID paleta “control toolkist”	46
1.14	Conclusiones	47
2	PLIEGO CONDICIONES	49
2.1	Conductores eléctricos	49
2.2	Protecciones conductores eléctricos y canalizaciones	49
2.3	Identificación de los conductores eléctricos	49
2.4	Aparatos de protección, mando y maniobra	49
2.5	Instalación termoresistencia	50
2.6	Requisitos ordenador aplicación LabView	51
2.7	Mantenimiento equipos y actualizaciones aplicación	52
3	PRESUPUESTO	53
3.1	Honorarios	53
3.2	Material	53
3.3	Condiciones de pago	54
4	CODIGO	55
4.1	Matlab	55
4.1.1	Identificación sistema de primer orden (calentamiento)	55
4.1.2	Identificación sistema de primer orden con retardo (calentamiento)	56
4.1.3	Identificación sistema de segundo orden (calentamiento)	57
4.1.4	Identificación sistema de primer orden (enfriamiento)	58
4.2	Monitorización y sensorizado proceso	59
4.2.1	Proyecto LabView. Archivo lvproj	59
4.2.2	P1_ENTORNO_V2_0.VI	62
4.2.3	P2_CARGA_ENTRADA_V2_0.VI	64
4.2.4	P3_PROCESADO_DATOS_V2_0.VI	65
4.2.5	P4_DATOS_SALIDA_V2_0.VI	67
4.2.6	P6_PID_V2_0.VI	67
4.2.7	P7_ACCION_CONTROL_%_mA_V2_0.VI	68
5	ANEXOS	69
5.1	Manuales equipos	69
5.2	Bibliografía	69

# Índice de figuras.

Figura 1: Diagrama sinóptico bloques eléctricos proceso.....	1
Figura 2. Ejemplo sistema embebido.....	2
Figura 3. Ejemplo sistema SCADA.....	3
Figura 4. Selección de temperatura por utilización.....	4
Figura 5. Comparativa tipos sensores. ....	5
Figura 6. Tipos PT100. ....	6
Figura 7. PT100 RS-Amidata código 370-8555.....	6
Figura 8. Control Proporcional.....	6
Figura 9. Control Todo-Nada. ....	7
Figura 10. CompactRIO con módulos serie C. ....	9
Figura 11. Módulos internos compactRIO. ....	10
Figura 12. Bornera y circuito eléctrico módulo NI 9265.....	11
Figura 13. Bornera y circuito eléctrico módulo NI 9217.....	11
Figura 14. Canal 0 módulo NI 9217 visto con MAX.....	15
Figura 15. Evolución temporal proceso térmico.....	17
Figura 16. Linealización, apuntes profesora Lucelly Reyes.....	18
Figura 17. Esquema sinóptico equipos eléctricos del proceso.....	19
Figura 18. Panel Frontal código LabView P5_DATOS PT100_V_2_0.vi.....	20
Figura 19. Diagrama estado código LabView P5_DATOS PT100_V_2_0.vi.....	21
Figura 20. Datos temporales ficheros Excel calentamiento y enfriamiento.....	23
Figura 21. Grafica fichero Excel datos temporales calentamiento.....	24
Figura 22. Datos temporales y modelo experimental Primer Orden.....	24
Figura 23. Sistema Primer Orden con Retardo.....	25
Figura 24. Datos temporales y modelo experimental Primer Orden.....	25
Figura 25. Respuesta Escalón en función de $\zeta$ .....	27
Figura 26. Escalón de un sistema Sobreamortiguado diferentes valores de $z$ . ....	28
Figura 27. Valor de $yz$ normalizada para diferentes valores de $z$ .....	28
Figura 28. $T_{72}$ para diferentes valores de $z$ . ....	30
Figura 29. Datos temporales y modelo experimental Segundo Orden.....	30
Figura 30. Datos temporales y modelo experimental 1º Orden Enfriamiento.....	31
Figura 31. Acción de control Proporcional ante un Escalón.....	32
Figura 32. Acción de control Proporcional-Integrativa ante un Escalón.....	33
Figura 33. Acción de control Proporcional-Derivativa.....	34
Figura 34. Algoritmo diseño PID.....	36
Figura 35. LdR en Lazo Cerrado.....	37
Figura 36. Punto diseño paso LdR.....	38
Figura 37. Punto diseño paso LdR teniendo en cuenta polos y ceros PID.....	40
Figura 38. Diseño PD con la función sisotool de Matlab.....	41
Figura 39. Diseño PID con la función sisotool de Matlab.....	42
Figura 40. Simulink proceso completo modelado.....	43
Figura 41. Simulink proceso calentamiento.....	44
Figura 42. Simulación proceso calentamiento con parámetros PID teóricos.....	44
Figura 43. Simulink calentamiento parámetros PID ajustados por prueba-error.....	45
Figura 44. Simulación calentamiento con parámetros PID ajustados.....	45
Figura 45. Implementación PID teórico con parámetros industriales.....	46
Figura 46. VI PID creado por LabView.....	46
Figura 47. Algoritmo función PID.VI de LabView.....	47
Figura 48. Acción de Control con parámetros PID cálculo teórico.....	48
Figura 49. Ventana explorador proyecto.....	60
Figura 50. Jerarquías de las VI y subVi utilizadas en la aplicación.....	61

Figura 51. Flujo Diagrama Bloques P1_ENTORNO_V2_0.VI.....	62
Figura 52. Panel Frontal P1_ENTORNO_V2_0.VI.....	63
Figura 53. Diagrama Bloques P1_ENTORNO_V2_0.VI.....	63
Figura 54. Flujo Diagrama Bloques P2_CARGA_ENTRADA_V2_0.VI.....	64
Figura 55. Diagrama Bloques P2_CARGA_ENTRADA_V2_0.VI.....	64
Figura 56. Flujo Diagrama Bloques P3_PROCESADO_DATOS_V2_0.VI.....	65
Figura 57. Ecuación de la recta no pasa por origen.....	66
Figura 58. Diagrama Bloques P3_PROCESADO_DATOS_V2_0.VI.....	66
Figura 59. Flujo Diagrama Bloques P4_DATOS_SALIDA_V2_0.VI.....	67
Figura 60. Diagrama Bloques P4_DATOS_SALIDA_V2_0.VI.....	67
Figura 61. Diagrama Bloques P6_PID_V2_0.VI.....	67
Figura 62. Diagrama Bloques P6_PID_V2_0.VI.....	68

# Lista de Acrónimos.

CE	Comunidad Europea.
DHCP	Protocolo de Configuración Dinámica Host (tarjeta de red).
DIN	Normativa Alemana.
EN	Normativa Española
Ethernet	Normas a Nivel Físico Redes Datos.
FPGA	Dispositivo Lógico de Entradas y Salidas Reconfigurables.
ICT	Normas Técnicas Complementarias al Reglamento Baja Tensión.
IEC	Comisión Internacional Electrotecnia.
IEEE	Normas Mundiales Ingeniería Eléctrica y Electrónica.
IP	Protocolo Comunicación Internet.
ISO	Organización Internacional de Normas.
NIC	Tarjeta Interfaz Red datos.
NIST	Instituto Nacional Normas Tecnológicas Norteamericanas.
NTC	Resistencia Coeficiente Negativo Temperatura.
PLC	Controlador Lógico Programable.
PRT.	Sensores de Temperatura.
PTC	Resistencia Coeficiente Positivo Temperatura.
RD	Real Decreto.
REBT	Reglamento Electrotécnico Baja Tensión.
RTD	Detector Temperatura Resistivo.
SPRT	Normativa Sensores de Temperatura.
TC	Termopar.
TCP	Protocolo Control Transmisión Datos.
UNE	Normas Españolas.
USB	Bus Universal Serie.
UTP	Cable Par Trenzado Sin Blindaje.

# 1 MEMORIA.

## 1.1 Objeto.

### 1.1.1 Antecedentes.

En la actualidad se dispone de un proceso empírico para la obtención de resina como elemento aditivo para pinturas, la resina se utiliza para aglutinar y texturizar las pinturas. El proceso es semiautomático constituido por: calefactor, sonda temperatura y PLC con un módulo de control PID. Un operario añade a un matriz del calefactor sustancias en diferentes tiempos al llegar a una determinada temperatura y controla un agitador. Al ser un proceso empírico esto se realiza en paralelo con 8 procesos variando las mezclas y temperaturas aplicadas en cada uno hasta conseguir la fórmula empírica magistral.

### 1.1.2 Objetivos.

Desarrollar la monitorización, sensorizado y control de temperatura del proceso industrial utilizando sistemas embebidos disponibles en el mercado.

El entorno tomará datos desde una hoja de cálculo de entrada en formato Microsoft Excel con dos columnas una para el tiempo en segundos y otra para temperatura en grados centígrados. Cada fila indica durante cuánto tiempo se debe aplicar una temperatura dada al proceso.

La monitorización se hará desde la pantalla de un ordenador. Se presentará un cuadro de mandos interactivos con graficas que representan la evolución de la temperatura del proceso y la acción de control. Se utilizará como dispositivo controlador de potencia del calefactor un SSR que conecta la resistencia del calefactor a la red monofásica. El proceso no dispone de enfriadora, el decremento temperatura no será controlado, la regulación del proceso no es afectado por ello.

El control debe alcanzar y mantener la temperatura de referencia indicada en la hoja de cálculo de entrada en el menor tiempo posible, con una sobreoscilación máxima del 10% y una precisión menor del 5%.

Una vez finalizado el proceso se debe generar una hoja de cálculo de salida en formato Microsoft Excel con tres columnas: tiempo, acción de control y temperatura.

El presente trabajo se enfoca únicamente a la acción de control temperatura dejando como ampliación para futuros trabajos el control del agitador.

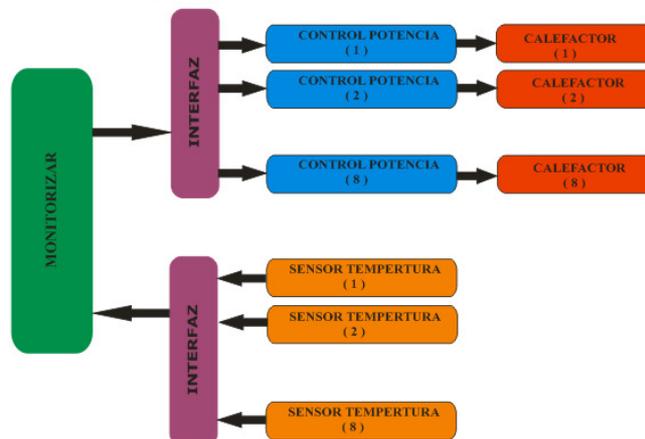


Figura 1: Diagrama sinóptico bloques eléctricos proceso.

### 1.1.3 Justificación.

#### 1.1.3.1 Sistemas embebidos.

El desarrollo es un Sistema de Control, Monitorización y Adquisición de Datos (SCADA) ejecutado en tiempo real. En la actualidad estos entornos embebidos se comercializan por diferentes compañías. Los entornos embebidos son sistemas electrónicos constituidos por diferentes puertos de comunicación, con memoria, al menos un microprocesador programable que ejecuta un programa en tiempo real. El concepto de tiempo real indica que solo se ejecuta exclusivamente durante un tiempo un solo programa y hasta que no termina su ejecución no se procesa otro, esto garantiza que no existan retardos en la ejecución de los programas. Todo ello en una única placa electrónica e incluso un solo encapsulado. Es un desarrollo de hardware y software. Su utilización es en sistemas de control distribuido caracterizados por realizar acciones de control en forma automática.



*Figura 2. Ejemplo sistema embebido.*

([http://www.inti.gob.ar/noticias/fotos\\_notas/simposio.jpg](http://www.inti.gob.ar/noticias/fotos_notas/simposio.jpg))

Un sistema embebido puede interactuar, controlar, ejecutar operaciones matemáticas complejas, etc, con cualquier señal eléctrica. Sus bloques fundamentales son:

- Entrada (sensores o periféricos).
- Proceso (tiempo real).
- Salida (actuadores o periféricos).

El software de desarrollo para sistemas embebidos es propietario y cerrado, permiten generar código para ser cargado en el entorno. No existen manuales de cómo se genera el código durante la compilación es transparente para el usuario final. Son herramientas con licencia.

#### 1.1.3.2 Sistemas SCADA.

Un sistema SCADA se basado en un ordenador que permite supervisar y controlar a distancia una instalación por parte de un operador, hoy en día también puede realizar labores de control automático.

La necesidad viene dado por:

- La información del proceso se necesita en el momento en que los cambios se producen en el mismo, la información se requiere en tiempo real.
- La necesidad de optimizar y facilitar las operaciones en la planta, así como la toma de decisiones operativas.
- Mejoran la productividad, los niveles de seguridad, etc.

- La complejidad del proceso permiten que las acciones de control sean llevadas a cabo por un operador.

Las funciones son:

- Recabar, almacenar y mostrar información, en forma continua y segura.
- Ejecutar acciones de control iniciadas por el operador.
- Alertar al operador de cambios detectados en la planta, aquellos que no se consideren normales (alarmas) como aquellos que se produzcan en la operación diaria de la planta (eventos).
- Mediciones de magnitudes de diferentes variables.
- Cualquier señal o medida puede ser graficada, almacenada, aplicar cálculos, predicciones, etc.



*Figura 3. Ejemplo sistema SCADA.*

(<http://control-accesos.es/>)

Multitud de compañías comercializan sus entornos SCADA. En el presente proyecto partimos de la condición que la Universidad Politécnica de Valencia dispone un contrato licencia completo del entorno de desarrollo LabView de la compañía National Instruments. Por ello se justifica la utilización de una programación gráfica en LabView por ser un estándar de desarrollo.

Para la monitorización se utilizará una pantalla de ordenador. Se adopta esta solución por motivos económicos, por estar el proceso ubicado en un ambiente limpio y utilizar el propio ordenador para lanzar el programa de ejecución de Labview.

Respecto el hardware a utilizar debe permitir controlar simultáneamente cada calefactor con sus propios datos de entrada a través de la hoja de cálculo correspondiente. Esto obliga a usar hardware que admita el control de 8 actuadores y la lectura de 8 sensores. La aplicación del documento solo contendrá un control, para 8 sería replicarlo.

### **1.1.3.3 Cables comunicaciones.**

Al utilizar un ordenador personal los interfaces de comunicación por cable disponibles de forma estándar son USB y Ethernet. En el proyecto no hay inconveniente respecto la tasa de datos a transmitir, la cual va a ser muy pequeña al tomar una muestra de 32 bits cada segundo. El inconveniente puede venir por la distancia y radiaciones electromagnéticas.

Los cables USB tienen una utilización doméstica pero en el proyecto es válido por ser una sala blanca: La longitud máxima es de 5 metros (norma IEEE 1394) suficiente para las necesidades del proyecto.

Los cables UTP constituye un sistema de cableado estructurado de uso industrial para comunicar voz y datos, con longitudes de hasta 100 metros, según norma IEEE 802.

### 1.1.3.4 Sensor temperatura.

La temperatura tiene una importancia fundamental en el proceso. Por ello, es imprescindible disponer de una medición precisa. Para seleccionar el tipo de sensor debemos tener en cuenta los siguientes factores:

- Rango temperatura.
- Precisión requerida.
- Tipo medición.

A la hora de elegir el sensor se debe tener presente no solo el error indicado en el certificado de calibración, sino también estudiar las propiedades físicas, mecánicas e intrínsecas. El sistema de medición también es importante por el comportamiento en el medio de utilización y su deriva en el tiempo.

Los sensores disponibles en el mercado son:

- SPRT por su precisión de medida están especificados para uso de laboratorio.
- RTD y PRT ofrecen grandes beneficios por su exactitud y estabilidad. Las tolerancias de temperatura especificadas en la norma IEC-751 para sensores industriales se clasifican en clase A y B, para mayores precisiones se utilizan tolerancias de 1/3 y 1/10 DIN.
- TC tienen un alcance de temperatura muy amplio, sin embargo la precisión es limitada. Los errores máximos de los diferentes tipos de termopares se clasifican en grado estándar y grado especial.
- NTC y PTC.



Figura 4. Selección de temperatura por utilización.

(<http://www.sciempresa.com/>)

En los objetivos se indica que la precisión debe ser inferior al 5%. Luego el sensor debe tener una muy buena exactitud por ello la mejor opción es utilizar un sensor tipo RTD, también conocidos como PT100, PT500, PT1000. El número indica la resistencia a 0°C. Para que la medición no presente problemas se debe asegurar una longitud correcta de inmersión; para líquidos como es el caso entre 8 y 10 veces el diámetro del sensor.

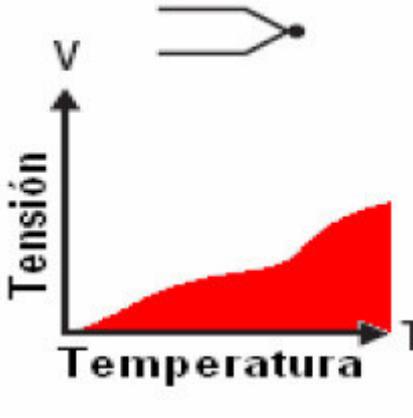
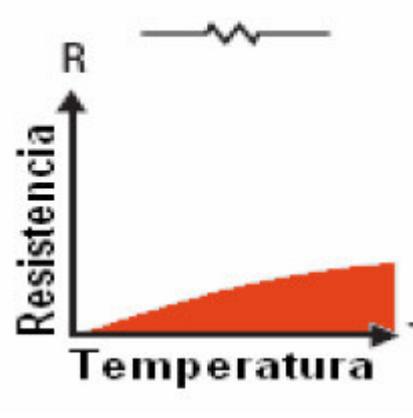
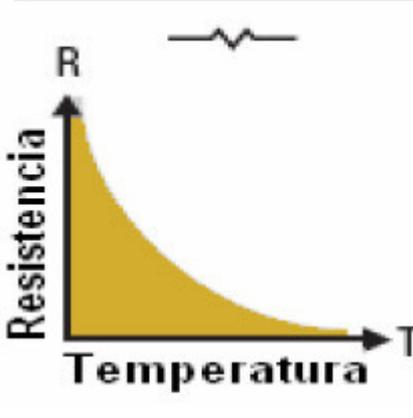
<b>Termopar</b>	<b>RTD</b>	<b>Termistor</b>
		
<p><b>VENTAJAS</b>  Rango -270...+1 800 °C</p> <p>Sencillo</p> <p>Robusto, resistencia a vibraciones y golpes</p> <p>Económico</p> <p>Amplia variedad de formas físicas</p> <p>Gran rango de temperatura</p>	<p>Rango -260...+850 °C</p> <p>Muy estable</p> <p>Amplio alcance de temperatura</p> <p>Buena exactitud</p> <p>Mejor linealidad que el termopar</p> <p>Mejor deriva que el termopar</p>	<p>Rango -80...+150 °C</p> <p>Tiempo de respuesta rápida</p> <p>Medición a 2 hilos</p> <p>Cambios grandes de resistencia vs. Temperatura</p> <p>Pequeños</p> <p>Baratos</p> <p>Buena estabilidad</p>
<p><b>DESVENTAJAS</b></p> <p>No lineal</p> <p>Baja tensión</p> <p>Requiere compensación en la unión fría</p> <p>Baja sensibilidad</p> <p>Baja estabilidad</p>	<p>Caro</p> <p>Frágil, sensible a vibraciones y golpes</p> <p>Tiempo de respuesta lento</p> <p>Requiere fuente de corriente</p> <p>Cambios pequeños de resistencia</p> <p>Para precisión requiere</p> <p>Para precisión requiere medir a 4 hilos</p>	<p>No lineal</p> <p>Requiere fuente de corriente</p> <p>Alcance de temperatura limitado</p> <p>Frágil</p>

Figura 5. Comparativa tipos sensores.

(<http://www.sciempresa.com/>)

La norma internacional IEC 751 especifica las tolerancias de los sensores de termo resistencia de platino. Hay dos tolerancias principales definidas para sondas Pt100: clase A, con una tolerancia de  $\pm 0,15$  °C a 0 °C y clase B, con una tolerancia de  $\pm 0,3$  °C a 0 °C. Hay 2 clases de precisión adicionales para el trabajo de precisión y estos se conocen comúnmente como "1/10 DIN" y "1/3

DIN"; esto significa una tolerancia de 1/10 o 1/3 de la especificación de clase B a 0 ° C respectivamente. La lista completa de las tolerancias de la clase A, B, 1/10 y 1/3 se enumera en la siguiente tabla:

Elemento de intercambiabilidad Pt100 en ° C				
Temp °C	Clase B	Clase A	1/3 DIN	1/10 DIN
-200	1,30	—	—	—
-100	0,80	—	—	—
-50	0,55	0,25	0,18	—
0	0,30	0,15	0,10	0,03
100	0,80	0,35	0,27	0,08
200	1,30	0,55	0,43	—
250	1,55	0,65	0,52	—
300	1,80	0,75	—	—
350	2,05	0,85	—	—
400	2,30	0,95	—	—
450	2,55	1,05	—	—
500	2,80	—	—	—
600	3,30	—	—	—

Figura 6. Tipos PT100.

(<http://es.omega.com/prodinfo/pt100.html>)



Figura 7. PT100 RS-Amidata código 370-8555.

(Fabricante Reckman)

### 1.1.3.5 Método control potencia.

Para controlar la potencia aplicada al calefactor hay disponible en el mercado dos formas: Todo-Nada y Proporcional. En el proyecto no hay inconveniente respecto a cómo aplicar la potencia. La elección de una forma u otra vendrá impuesta por la entrada de control disponible en el actuador.

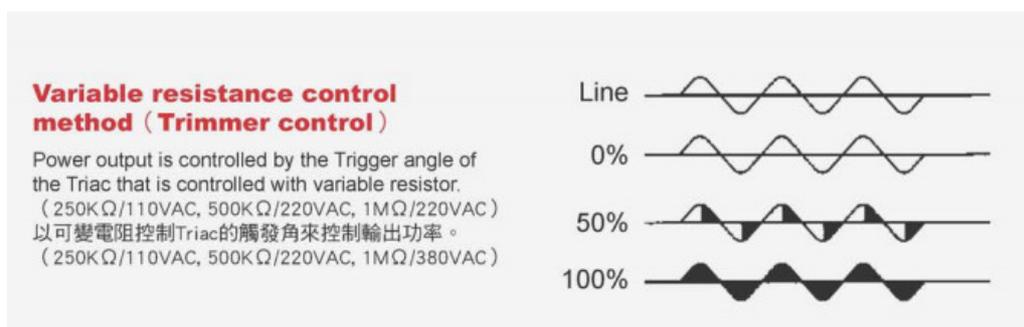


Figura 8. Control Proporcional.

(<http://www.fotek.com.tw>)

### Zero cross trigger method

Output will be turned ON or Turned OFF only on the Zero point of sine wave, that may avoid to occur the EMI or RFI. Specially suited to control the resistive, capacitive and non-saturated inductive load.

輸出只有在正弦波的零點上有輸入訊號時才會打開或關閉，以避免產生突波或EMI / RFI。特別適用於控制阻抗性或電容性或不飽和感抗性等負載。

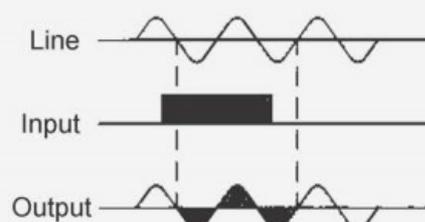


Figura 9. Control Todo-Nada.

(<http://www.fotek.com.tw>)

#### 1.1.3.6 Viabilidad técnica y económica.

Se hace un estudio de mercado para conocer las posibilidades más económicas para alcanzar los objetivos. Es relevante indicar que cualquier compañía dedicada a la automatización dispone de las herramientas y dispositivos necesarios para implementar los objetivos. Al imponer como condición la utilización de LabView para monitorizar el proceso esto introduce una restricción a dispositivos compatibles con los recursos disponibles en un ordenador personal.

Propuesta N° 1. (Precio neto.: 3.224,40 €).

- Módulo 4 canales RTD PT100 OMEGA PT 104A precio.: 600 € x 2 = 1.200 €
- Módulo USB <-> RS485 interface DATEXEL DAT 3580-USB precio.: 150 €
- Módulo comunicación RS485 Modbus salida corriente analógica 4 canales 0-20 mA DATEXEL DAT 3024 precio.: 203 € x 2 = 406 €.
- Modulo convertidor salida proporcional controlada por corriente 4-20 mA OMEGA PCM5 precio 58,60 € x 8 = 468,80 €.
- Relé estado sólido carril DIN 240 VAC, 25 A, control 4-20 mA ENDA ERCA1-225PA precio.: 55 € x 8.: 440 €.

Propuesta N° 2. (Precio neto.: 2.358,30 €).

- Módulo 4 canales RTD PT100 OMEGA PT 104A precio.: 600 € x 2 = 1.200 €
- Módulo USB <-> RS485 interface DATEXEL DAT 3580-USB precio.: 150 €
- Módulo comunicación RS485 Modbus salida tensión analógica 8 canales 0 +10 V. DATEXEL DAT 3028 precio.: 239 €
- Relé estado sólido carril DIN 240 VAC, 25 A, control 8-30V DC ENDA ERxA1-225Z precio.: 45 € x 8 = 360 €.

Propuesta N° 3. (Precio neto.: 3.482,10 €).

- Chasis CompactDAQ USB 4 ranuras NI CDAQ-9174 con cable alimentación precio.: 815,70 €
- Módulo entrada RTD 4 canales NI 9217 precio.: 476 € x 2 = 952 €
- Módulo salida voltaje analógico NI 9263 con protección cables precio.: 375 € x 2 = 750 €
- Relé estado sólido carril DIN 240 VAC, 25 A, control 8-30V DC ENDA ERxA1-225Z precio.: 45 € x 8 = 360 €.

Propuesta N° 4. (Precio neto.: 3.890,44 €).

- Chasis CompactRIO Ethernet 8 ranuras NI cRIO-9074 con cable alimentación precio.: 885 €
- Módulo salida analógica 4 canales 100 KS/s, 16 Bits, 0 a 20 mA, NI 9265  
precio.: 450,12 € x 2 = 900,24 €
- Módulo entrada analógica de 24 Bits de 4 Canales y 100 Ω RTD, NI 9217  
precio.: 495 € x 2 = 990 €
- Relé estado sólido carril DIN 240 VAC, 25 A, control 4-20 mA ENDA ERCA1-225PA precio.:  
55 € x 8.: 440 €.

Propuesta N° 5. (Precio neto.: 4.154,10 €).

- Chasis CompactDAQ USB 4 ranuras NI CDAQ-9174 con cable alimentación precio.: 815,70 €
- Módulo entrada RTD 4 canales NI 9217 precio.: 476 € x 2 = 952 €
- Módulo salida corriente analógica 4 canales 0-20 mA NI 9265 con protección cables precio.:  
378,32 € x 2 = 756,64 €
- Módulo convertidor salida proporcional controlada por corriente 4-20 mA  
OMEGA PCM5 precio 58,60 € x 8 = 468,80 €.
- Relé estado sólido carril DIN 240 VAC, 25 A, control 4-20 mA ENDA ERCA1-225PA precio.:  
55 € x 8 = 440 €.

La utilización del entorno LabView como monitorización y control impone por motivos de productividad utilizar también equipos de National Instruments. Queda justificada su utilización a pesar de tener un coste mayor por:

- Tener un mayor grado de integración al ser desarrollado todo por el mismo fabricante.
- Ofrece soporte, servicios, ejemplos desarrollados y formación educacional.

Se debe tener presente que el coste de desarrollo humano es muy superior a los coste de los equipos. Un equipo económico no integrado totalmente por el mismo fabricante da lugar a unos mayores números de horas de trabajo.

Se utilizará el controlador compactRIO por utilizar para la comunicación la red Ethernet, cableado estructurada muy implantado hoy en día. Por otra parte, permite ejecutar en tiempo real, aunque nuestro proceso es muy lento esta cualidad deja abierto el equipo para futuras ampliaciones del proceso. Así como el disponer una FPGA12 que igualmente en un futuro puede permitir diseñar una interconexión a medida. Por todo ello se adopta en el proyecto la PROPUESTA N° 4.

## 1.2 Disposiciones legales y normas.

- Reglamento electrotécnico de baja tensión REBT y Guía técnica asociada.
- Real Decreto RD 1580/2006, 22 de diciembre. Por el que se regula la compatibilidad electromagnética de los equipos eléctricos.
- Real Decreto RD 711/1988, 8 de enero. Relativo a las exigencias de seguridad del material eléctrico y posteriores modificaciones por RD 1541/1995.
- Reales Decretos y normas UNE relativas al montaje, utilización y mantenimiento equipos eléctricos:

- EN 62061/2005. Seguridad de las máquinas. Seguridad funcional de sistemas de mando eléctricos, electrónicos y programables.
- EN ISO 16484/2003. Automatización de equipos y sistemas de control.
- Directiva Comunidad Europea 2006/95/CE de Baja Tensión.
- Directiva Comunidad Europea 89/336/CE, Compatibilidad Electromagnética.
- Manuales usuario equipos:
  - CompactRIO NI compactRIO-9074  
<http://digital.ni.com/hardref.nsf/websearch/a870adbc92ef6034862573620070fe82>
  - Módulo E/S Serie C NI compactRIO-9265  
<http://digital.ni.com/hardref.nsf/websearch/f56e37a90d0394b086256fc500544b2c>
  - Módulo E/S Serie C NI compactRIO-9217  
<http://digital.ni.com/hardref.nsf/websearch/f56e37a90d0394b086256fc500544b2c>
  - SSR ENDA ERCA1. Cumple normas según fabricante  
<http://www.enda.com.tr/ENG/Products/Default.aspx?UrunGrupID=33>

## 1.3 Controlador compactRIO NI CompactRIO-9074.

### 1.3.1 Descripción sistema embebido.

CompactRIO es un sistema embebido y reconfigurable de control y adquisición de datos. Procesador en tiempo real. Dispone de una FPGA que permite configurar las E/S. Permite añadir módulos de E/S sobre su chasis de 4 u 8 ranuras para albergar cualquier módulo DE la Serie C. Se programa con el entorno LabView. Especificaciones eléctricas <http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-204/lang/es>



*Figura 10. CompactRIO con módulos serie C.*

(<http://spain.ni.com/>)

### 1.3.2 Elementos.

Los diversos componentes de hardware de un compactRIO son:

1. Controlador en tiempo real.
2. Módulos IO reconfigurables.
3. FPGA.

#### 4. Chasis de expansión de Ethernet.

El controlador es en tiempo real, es un procesador potente con altas frecuencias de reloj para la aplicación del algoritmo de control.

El módulo FPGA se utiliza para implementar la lógica de bajo nivel con los datos obtenidos mediante los módulos IO. El circuito FPGA utilizado en el compactRIO es un Xilinx Virtex FPGA serie. La FPGA se puede programar por separado y está conectada al controlador en tiempo real usando un bus interno.

Los Módulos de IO son tarjetas de la serie C realizadas por los propios National Instruments, intercambiables en caliente.

El chasis de expansión Ethernet viene con un puerto Ethernet que se utiliza para conectar el compactRIO a un PC host.

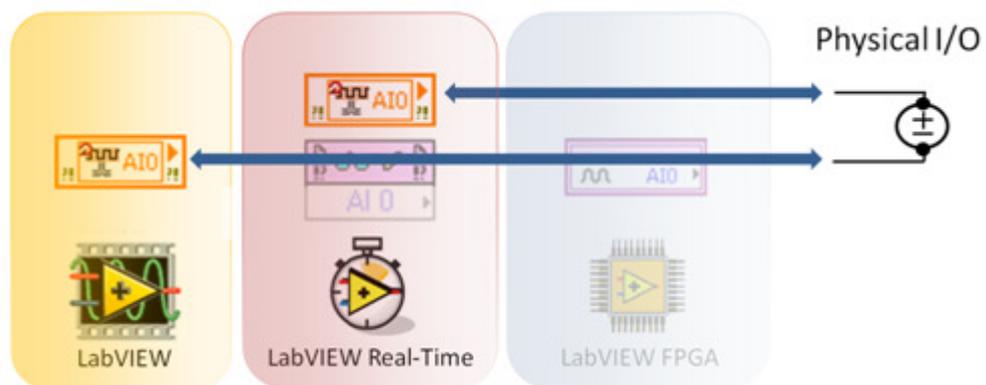


Figura 11. Módulos internos compactRIO.

(<http://spain.ni.com/>)

### 1.4 Módulos E/S serie C.

#### 1.4.1 Módulo salida analógica de corriente 4 – 20 mA NI 9265.

El NI 9265 de National Instruments es un módulo de salida analógica de la Serie C de 4 canales, 0 a 20 mA, 100 kS/s. El NI 9265 es ideal para establecer una interfaz y controlar actuadores industriales de corriente a altas velocidades. El módulo tiene detección integrada de lazo abierto, lo cual genera una interrupción en el software cuando un lazo abierto es detectado así como salidas a cero para reforzar la seguridad y prevenir que se envíen señales a los actuadores cuando el sistema se enciende. El módulo incluye como seguridad doble circuito de aislamiento a tierra e inmunidad a ruido. Se debe conectar una fuente de alimentación a la entrada “Externa Power Supply” identificado en la bornera como “Vsup” y “Power Supply COM” de tensión entre 9 V y 36 V DC. Esta tensión es necesaria para generar la corriente 4-20 mA.

<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/208808#overview>

<http://www.ni.com/pdf/manuals/374067e.pdf>

<http://www.ni.com/pdf/manuals/373737h.pdf>

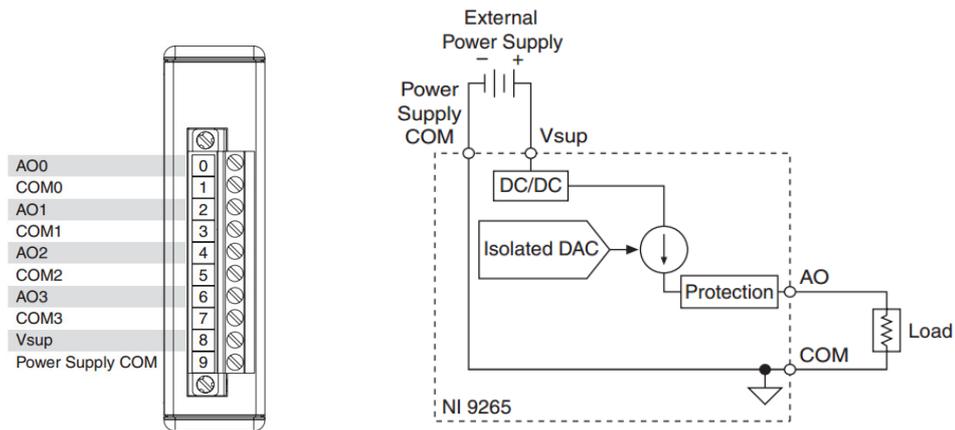


Figura 12. Bornera y circuito eléctrico módulo NI 9265.

(<http://spain.ni.com/>)

### 1.4.2 Módulo entrada analógica 100 $\Omega$ RTD NI 9217.

El módulo de entrada analógica RTD NI 9217 de National Instruments tiene 4 canales y 24 bits de resolución para medidas de 100  $\Omega$  RTD. Es posible configurar el NI 9217 para dos velocidades de muestreo. Con alta velocidad de muestreo se puede tomar muestras hasta 400 S/s (100 S/s por canal). Con baja velocidad de muestreo se puede tomar muestras de 5 S/s (1.25 S/s por canal) con rechazos a ruidos de red eléctrica.

El NI 9217 es compatible con medidas RTD de 3 y 4 cables, automáticamente detecta el tipo de RTD (3 o 4 cables) conectado al canal y configura cada canal para el modo apropiado. El módulo puede suministrar 1 mA de corriente por canal y tiene una precisión menor de 1  $^{\circ}\text{C}$  en todo su rango de temperatura. Los módulos disponen de certificados de calibración expedidos por el NIST. El módulo incluye como seguridad doble circuito de aislamiento a tierra e inmunidad a ruido y alto rango de rechazo en modo común.

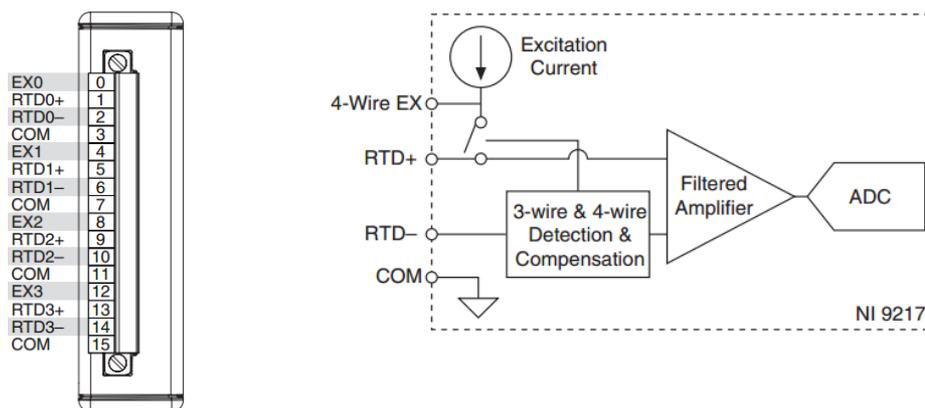


Figura 13. Bornera y circuito eléctrico módulo NI 9217.

(<http://spain.ni.com/>)

<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/208808#overview>

<http://www.ni.com/pdf/manuals/374187c.pdf>

<http://www.ni.com/pdf/manuals/373737h.pdf>

National Instruments ha emitido siguiente “report” para la conexión de PT100:

<http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/5BFB36CFCC32C662862570D5006DC0C0>

How Do I Connect 2, 3 and 4 Wire RTDs to My Data Acquisition Card?

RTDs typically come in red/black or red/white wire color combinations:

Red: Excitation

Black: Ground

White: Ground

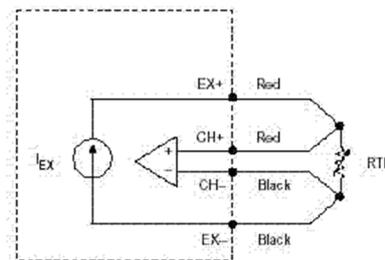
If you are not sure which wires are connected to which side of the resistive element, you can use a digital multimeter (DMM) to measure the resistance between the wires. ~0 ohms indicates the leads are attached to the same node. A resistance close to the nominal gage resistance (typically 100 ohms) indicates that the wire leads are on opposite sides of the resistive element.

Note: Reference the Specifications Manual for your particular RTD to determine its required excitation level.

The following connection diagrams illustrate how to connect various RTD types to your DAQ device.

#### 4-wire - RTD Signal Connection:

Connect each of the red leads on the positive side of the resistive element to the excitation positive and channel positive on the DAQ device. Connect the black (or white) lead on the negative side for the resistive element to the excitation and channel negative on the DAQ device. (The two additional leads from a 2-wire RTD increase the attainable accuracy.)



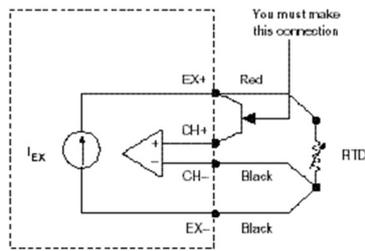
a. Four-Wire RTD Configuration

● = Connection to Terminal Block

#### 3-wire - RTD Signal Connection:

Connect the red lead to the excitation positive. Jumper the excitation positive to the channel positive on the DAQ device. Connect one of the black (or white) lead to excitation negative and the other to channel negative.

Note: Some Hardware has internal 3-wire configuration compensation and does not require the jumper lead from CH+ to EX+ (NI 9217 for example). These units will make this connection internally. Check the Specification Manual for the particular device you are using.

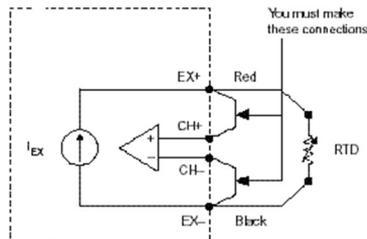


b. Three-Wire RTD Configuration

● = Connection to Terminal Block

### 2-wire - RTD Signal Connection:

Connect the red lead to the excitation positive. Use jumper wires between the excitation positive to the channel positive on the DAQ device. Connect the black (or white) lead to the excitation negative. Jumper the excitation negative to the channel negative on the DAQ device.



c. Two-Wire RTD Configuration

● = Connection to Terminal Block

## 1.5 Sensor PT100.

Tal y como se ha justificado anteriormente las PT100 superan a los Termopares en aplicaciones de bajas temperaturas (-100 a 200°C). Pueden fácilmente entregar precisiones de una décima de grado, con la ventaja de que no presentan derivas por descomposición gradual del material, evitando entregar lecturas erróneas, normalmente antes que ello queda en circuito abierto, con lo cual el dispositivo medidor detecta inmediatamente la falta del sensor y da aviso.

<http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=1478>

Se ha seleccionado por precio el modelo R14-1B2-4/50T2000 del fabricante Reckman, distribuido por RS-Amidata código 370-8555.

## 1.6 Actuador SSR ERDA ERCA1-225PA.

Desde hace años se utilizan los relés de estado sólido por ser todo ventajas para corrientes de hasta 200 A.

El modelo ERCA1-225PA del fabricante ERDA tiene entrada de control por corriente 4 – 20 mA y puede controlar cargas de hasta 25 A / 240V AC. Está sobredimensionado para la carga que tiene que controlar (calefactor 240V AC/ 200W), pero es el comercializado más económico. Distribuido por CONTAVAL.

## 1.7 NI LabView.

Tan solo una breve descripción por no ser el objeto del presente trabajo. LabView es un entorno de programación gráfica usado para desarrollar sistemas de medida, pruebas y control. Utiliza íconos gráficos intuitivos y cables que parecen un diagrama de flujo. Dichos iconos se integran con dispositivos de hardware y dispone de cientos de bibliotecas para análisis y visualización de datos, todo para crear un instrumentación virtual VI. Es un lenguaje de programación gráfico de propósito general (conocido como G), con su compilador asociado, su enlazador, y herramientas de depuración. Para la configuración del compactRIO debe estar instalado el siguiente software:

- Labview.
- Módulo Labview Real-Time.
- Módulo Labview FPGA (opcional).
- Controlador NI-RIO.

Guía instalación compactRIO <http://www.ni.com/gettingstarted/installsoftware/esa/compactrio.htm>

### 1.7.1 MAX (Measurement & Automation Explorer).

National Instruments ofrece una interfaz gráfica de usuario llamada MAX, es una aplicación basada en Windows que se instala al mismo tiempo que alguno de los siguientes controladores NI-DAQ o NI-DAQmx durante la instalación de LabView. Estos controladores gestionan la adquisición de datos de los equipos de NI conectados al ordenador. MAX se utiliza para:

- Configurar y testear el software y el hardware de los equipos (instrumentos).
- Añadir nuevos canales e interfaces.
- Permite hacer funcionar a los equipos (instrumentos) directamente.
- Visualiza los equipos (instrumentos) conectados al ordenador.

Así pues, permite configurar los controladores de los equipos (instrumentos), estos controladores reciben el nombre de IVI. <http://www.ni.com/white-paper/4594/en/>.

El siguiente video enseña a como instalar, configurar y programar el compactRIO:

<http://www.ni.com/video/350/es/>

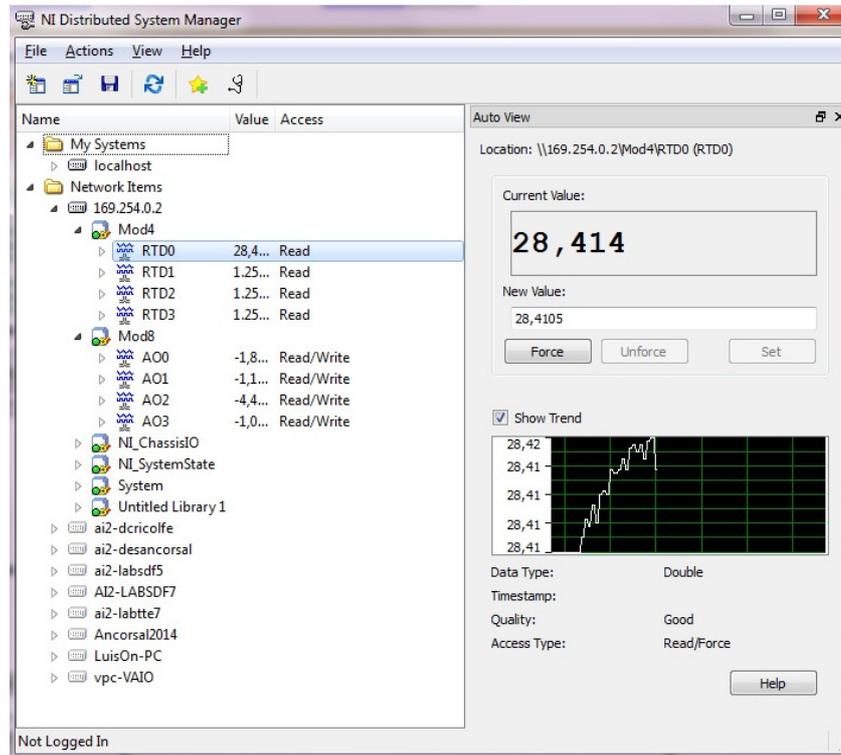


Figura 14. Canal 0 módulo NI 9217 visto con MAX.

## 1.7.2 Configuración compactRIO NI 9074.

Una vez instalado todo el software en el ordenador donde se va a realizar el desarrollo los pasos a seguir son:

1°. Encender compactRIO.

2°. Todos los interruptores en posición OFF.

En caso de hacer cambios en las posiciones de los interruptores reiniciar compactRIO presionando botón de reset para que la configuración tenga efecto.

3°. Para la configuración inicial el software de NI busca el sistema compactRIO a través de la tarjeta de red NIC primaria. Esto obliga de desactivar cualquier otra NIC durante el proceso de configuración. El ordenador puede disponer de dos NIC una de acceso a red y otra para la comunicación con compactRIO.

Para que compactRIO reconozca la NIC que utilizara para comunicarse con el ordenador es preciso deshabilitar la otra NIC. Para Windows 7 este parámetro está disponible en:

Menú Inicio – Panel Control – Redes e Internet – Centro de Redes y Recursos Compartidos – Cambiar Configuración del Adaptador – Seleccionar NIC – clic botón derecho ratón – Deshabilitar.

4°. Caso: Cable Cruzado.

- Deshabilitar en el ordenador el servicio DHCP.
- Asignar una dirección IP estática.

Estos parámetros están disponibles en:

Menú Inicio – Panel Control – Redes e Internet – Centro de Redes y Recursos Compartidos – Cambiar Configuración del Adaptador – Seleccionar NIC – Doble clic Ratón – Propiedades – Protocolo de Internet versión 4 (TCP/IPv4) – Propiedades.

IP estática.: 192.168.0.1 (por ejemplo).

Mascara Subred.: 255.255.255.0

Puerta de Enlace Predeterminada.: ninguna.

Otra ruta de acceso a los parámetros sería:

Menú Inicio – Panel Control – Conexiones Red – Conexión Red Local – Propiedades – Pestaña General – Usar Siguiete Dirección IP:

4°. Abrir MAX (Measurement & Automation Explorer).

Desplegar Remote Systems, debe aparecer compactRIO el cual debe ser seleccionado para ver las configuraciones de red y escoger la opción deseada. Al utilizar una tarjeta de red comunicada con un cable cruzado UTP se debe asignar una dirección IP estática dentro de la misma subred configurada para la NIC.

Configure IPv4 Address.: static

IPv4 Address.: 192.168.0.2

Subnet Mask.: 255.255.255.0

Getaway.: 192.168.0.10

DNS Server.: 8.8.8.8

Los parámetros Getaway y DNS Server no son usados, aunque no está demás su configuración con algún valor.

Pulsar SAVE. El sistema pide reseterar el compactRIO para que los cambios tengan efecto. Aparece el mensaje “Network Adapters No network adapters found”. Este mensaje es referido al segundo adaptador disponible el modelo compactRIO NI 9074.

Con ello el ordenador y el compactRIO tienen la configuración de red establecida. Se puede comprobar desde el símbolo del sistema con el comando ping.

ping 192.168.0.1

ping 192.168.0.2

5°. Si todo está correcto debe tener asignada la dirección IP y la luz de estatus debe estar parpadeando 2 veces consecutivas. Opcionalmente se posible editar un nombre distinto al por defecto del compactRIO junto un comentario.

- System Settings.
- Name.
- Comments.

Expandir el dispositivo compactRIO en el árbol Remote Systems y hacer clic en botón derecho software y seleccionar Add/Remote Software, emerge pantalla inicialización (sed pacientes). Seleccionar NI COMPACTRIO 13.1 – Febraury 2014 con ello se instalan los productos requeridos. En la siguiente pantalla instalar los productos siguientes:

- Labview Add-on. Labview PID and Fuzzy Logic Toolkit 13.0.0
- NI Scan Engine. NI-RIO 10 Scan 12.0.0. NI Serial 9870 and 9871 Scan Engine Suppo.

Next, Finish.

6°. Monitorizar Recursos compactRIO y módulos con el Distributed Suystem Manager.

Labview – Tools – Distributed System Manager – Actions – Add System to My Systems.

Escribir la IP compactRIO, aparecen los módulos para su monitorización.

## **1.8 Identificación experimental Planta.**

### **1.8.1 Sistemas Lineales y No Lineales.**

Todos los sistemas físicos son No Lineales.

Un sistema es considerado Lineal al menos entre unos intervalos en los que se cumple las siguientes dos propiedades:

1°. Los sistemas lineales se caracterizan por el hecho de que se puede aplicar el principio de superposición.

$$\text{Superposición } f(a) + f(b) = f(a + b)$$

2°. Si las entradas son multiplicadas por una constante, las salidas también son multiplicadas por la misma constante.

$$\text{Homogeneidad } \alpha * f(t) = f(t)$$

Un sistema es lineal si la salida sigue fielmente los cambios producidos en la entrada. En la mayoría de los sistemas de control lineales, la salida debe seguir la misma forma de la entrada, pero en los casos que la salida no verifique la misma forma de la entrada, para ser considerado un sistema lineal la salida deberá reflejar los mismos cambios generados en la entrada.

Por ejemplo, un integrador puro, es un operador lineal, ante una entrada escalón produce a la salida una señal rampa, la salida no es de la misma forma de la entrada, pero si la entrada escalón varía en una constante, la rampa de salida se verá modificada en la misma proporción.

En el presente trabajo el proceso es un control de temperatura. La temperatura es un proceso Lineal.

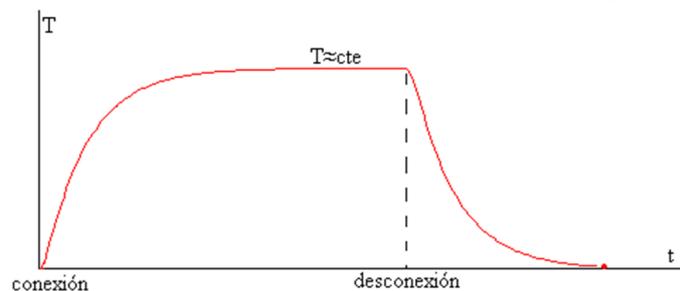


Figura 15. Evolución temporal proceso térmico.

(<http://didactica.fisica.uson.mx/cursos/fisord/transporte/conduccion1/conduccion1.htm>)

### 1.8.2 Punto funcionamiento (punto equilibrio).

Es cuando todas las variables de un sistema se encuentran estabilizadas en unos valores constantes, es decir, cuando todas las derivadas de la variable son nulas. Se puede obtener un modelo matemático de un sistema en dicho aplicando la descomposición en Serie de Taylor.

Muchos sistemas No Lineales se pueden modelar con gran precisión como Lineales dentro de ciertos rangos en el que el sistema funciona. De forma práctica para obtener el modelo Lineal se parte del modelo No Lineal haciendo una aproximación lineal alrededor de un punto de funcionamiento. El punto de equilibrio lo fija la referencia de entrada y se utiliza para linealizar.

Ventajas Linealizar:

- Elimina las no linealidades en las ecuaciones.
- Elimina las constantes independientes. Las variables quedan referidas a un sistema de ejes centrados en el punto de funcionamiento elegido.
- Se simplifica el manejo de las condiciones iniciales.

Inconvenientes Linealizar:

- Para valores fuera del punto funcionamiento habrá errores de cálculo.
- Los errores serán mayores cuanto más se aleja del punto funcionamiento elegido.
- Existen tantas posibles aproximaciones lineales como puntos de funcionamiento.

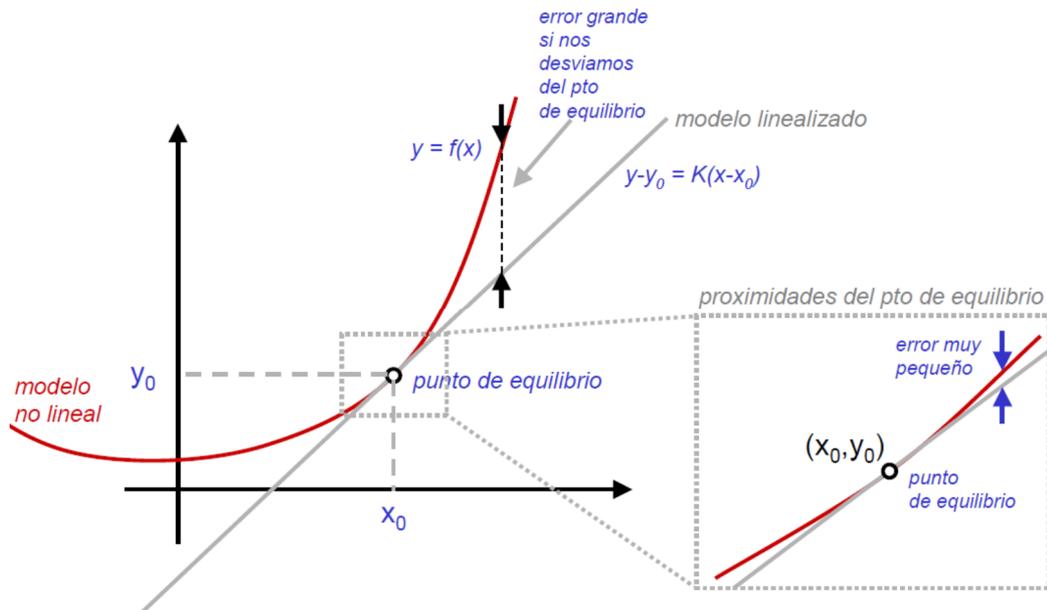


Figura 16. Linealización, apuntes profesora Lucelly Reyes.

El modelo matemático de un sistema es un conjunto de ecuaciones que representan la dinámica del sistema con bastante precisión. No es único, depende de la perspectiva tomada.

A partir del modelo matemático se caracteriza las relaciones entrada-salida obteniendo la Función de Transferencia del Sistema, FDT.

### 1.8.3 Función De Transferencia del proceso.

Es el cociente entre la función temporal de la señal de salida y la función temporal de la señal de entrada. Bajo la suposición de que “todas la condiciones iniciales son cero”.

$$G(t) = \frac{Y(t)}{U(t)}$$

Y(t), salida sistema.

U(t), entrada sistema.

Características:

- .Modelo matemático que relaciona la variable de entrada con la de salida.
- . Es independiente de la magnitud y naturaleza de la función excitación de entrada.
- . No proporciona información de la estructura física del sistema. La FDT de muchos sistemas físicamente diferentes puede ser idénticas.
- . Proporciona una descripción completa de las características dinámicas del sistema.

Es relevante indicar que la FDT del proceso estudiado corresponde al conjunto formado por:

- Conversor D/A (módulo NI-9465).
- Actuador (SSR ERCA1-225PA).
- Calefactor (240V AC/ 200W).
- Sensor (PT100).
- Acondicionador de señal conversor A/D (módulo NI-9217).

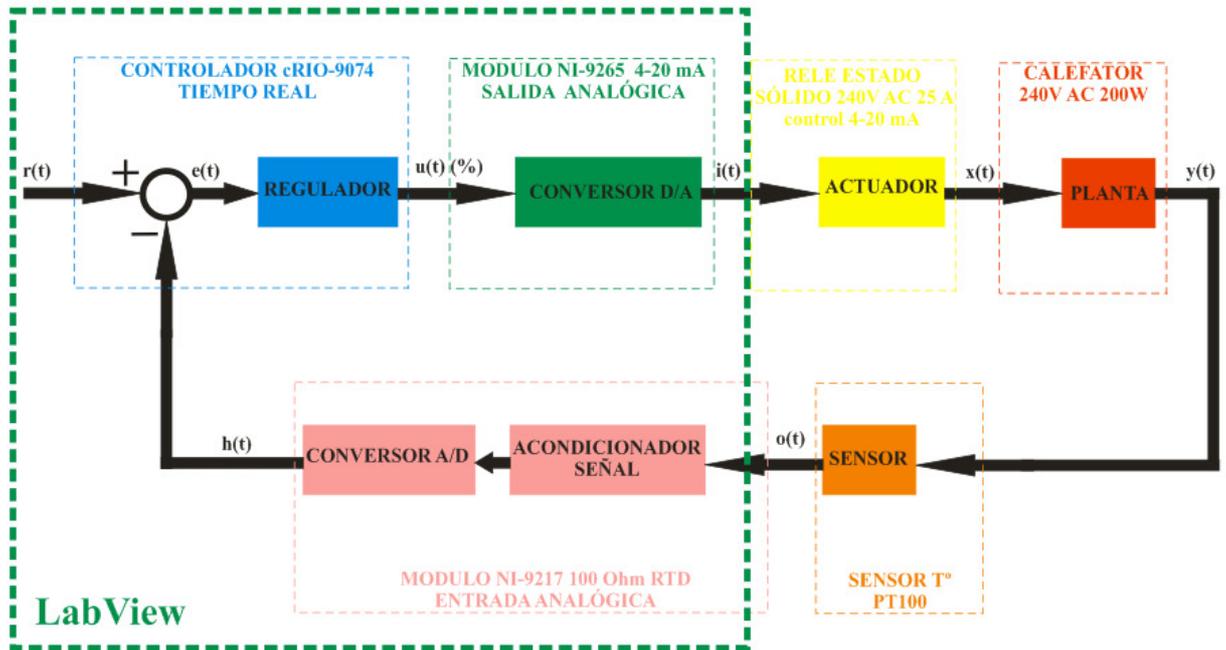
### 1.8.4 Obtención datos temporales proceso, en Lazo Abierto.

Por prueba y error se determina la amplitud de entrada que lleva la salida del sistema a régimen estable, es decir, magnitud constante en él tiempo. Se actúa sobre el controlador manualmente, aplicando un escalón a su entrada y midiendo su salida. Con ello se obtiene la **Curva de Reacción del Proceso**, a partir de la cual se identifica un modelo.

La entrada en Escalón es una señal de prueba típica. Da información de la velocidad de respuesta del sistema. Tiene un espectro de frecuencias muy alto, equivale aplicar muchas señales senoidales con un intervalo de frecuencias muy alto. Permite determinar el error de posición.

Los datos temporales necesarios son:

- Tiempo, muestras a intervalos de 1 segundo por ser un sistema lento.
- Acción de control,  $u(t)$ , entrada digital del sistema.
- Temperatura digitalizada,  $y^*(t)$ , salida digital del sistema.



$r(t)$  = señal referencia (SP Set Point).  
 $e(t)$  = señal error.  
 $u(t)$  = señal acción control % (CA Control Action).  
 $i(t)$  = señal acción control 0-20 mA (CA Control Action).  
 $x(t)$  = señal manipulada (MV Manipulated Variable).  
 $y(t)$  = señal controlada (PV Process Value).  
 $o(t)$  = señal controlada analógica.  
 $h(t)$  = señal controlada digital.

Figura 17. Esquema sinóptico equipos eléctricos del proceso.

Para la toma de datos temporales se ha generado el código P5\_DATOS PT100\_V\_2\_0.vi  
 Los controles del Panel Frontal son:

- Ruta del fichero a generar en Microsoft Excel con tres columnas, tiempo en segundos, acción control en tanto por ciento y temperatura en grados centígrados.
- Cursor del ACTUADOR A00, entrada de acción de control en tanto por ciento.
- Botón MEDIDAS para iniciar toma datos.
- Botón a STOP MANUAL para detener el proceso manualmente.

Los indicadores del Panel Frontal son:

- . Indicador tanto por ciento de acción de control.
- . Indicador mA acción de control.
- . Indicar SENSOR RTD0, temperatura digitalizada en la planta.

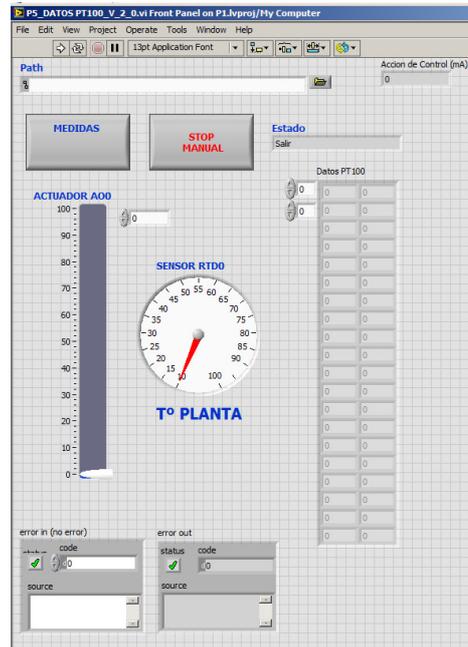


Figura 18. Panel Frontal código LabView P5\_DATOS PT100\_V\_2\_0.vi.

En el Panel de Bloques se implementa una máquina de estados Moore para la toma de los datos temporales requeridos. Muestras cada segundo. Se ha fijado un límite de 91°C por seguridad debido a ser un ensayo realizado con agua, ser muy lento el proceso y evitar que evapore, de esta forma el proceso no precisa la supervisión de un operador. En el diagrama de estados del proceso queda descrito el código implementado en LabView.

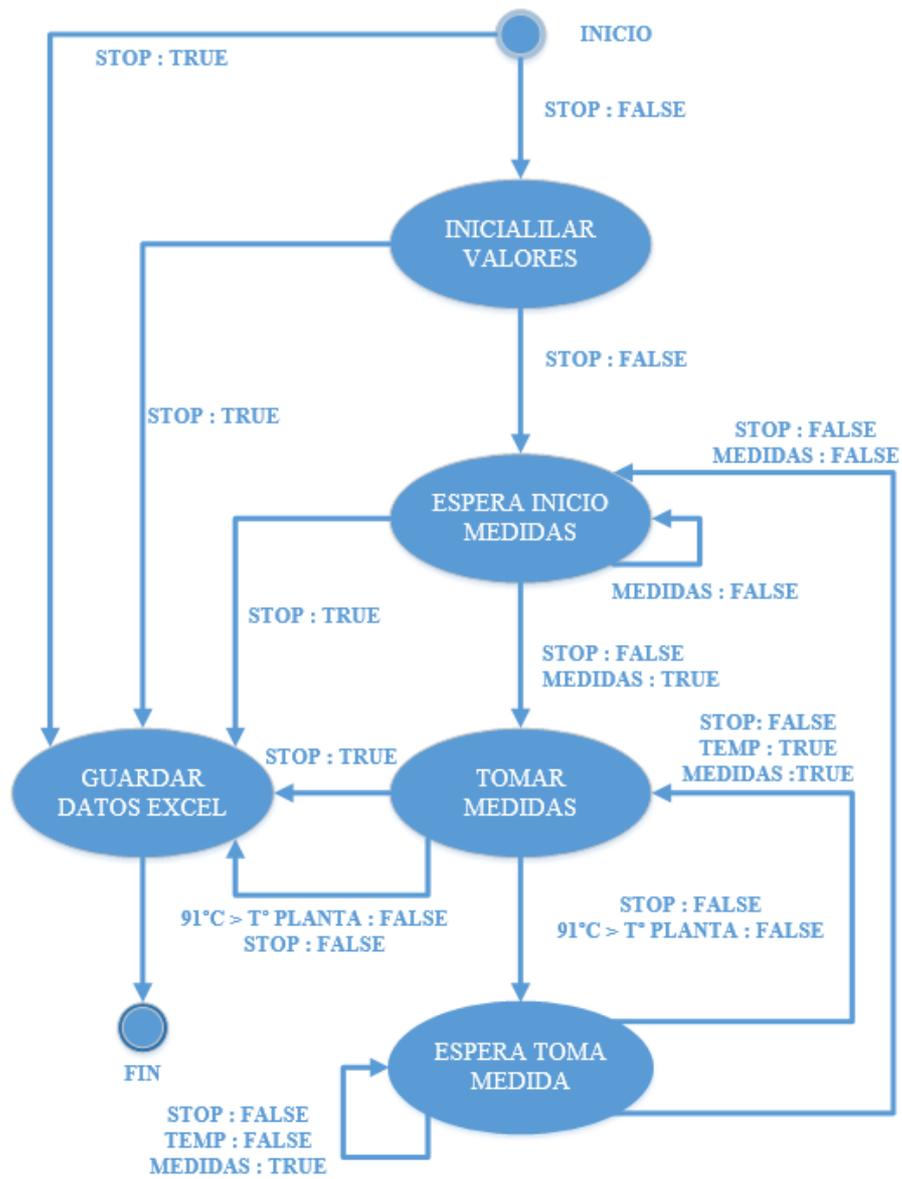
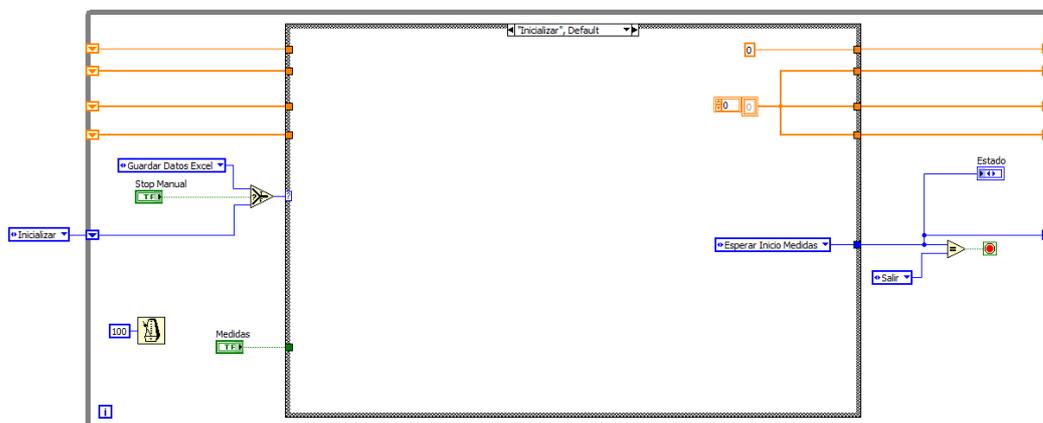
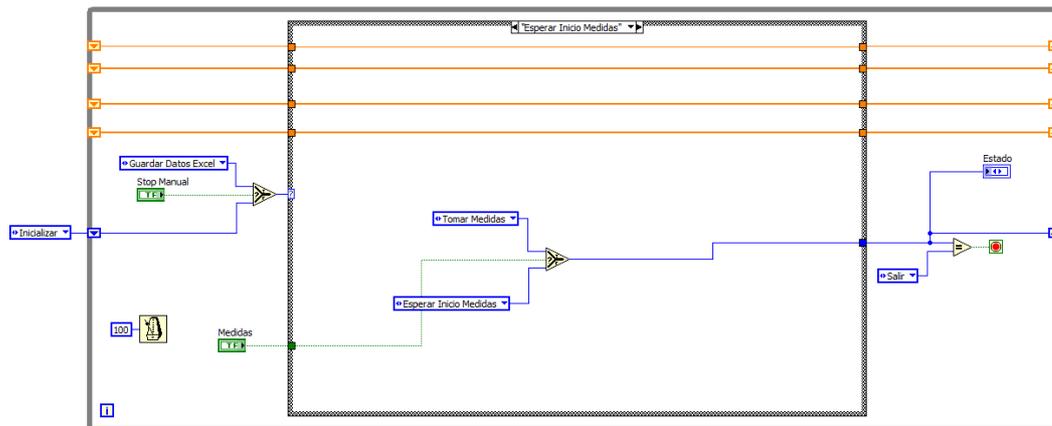


Figura 19. Diagrama estado código LabView P5\_DATOS PT100\_V\_2\_0.vi.

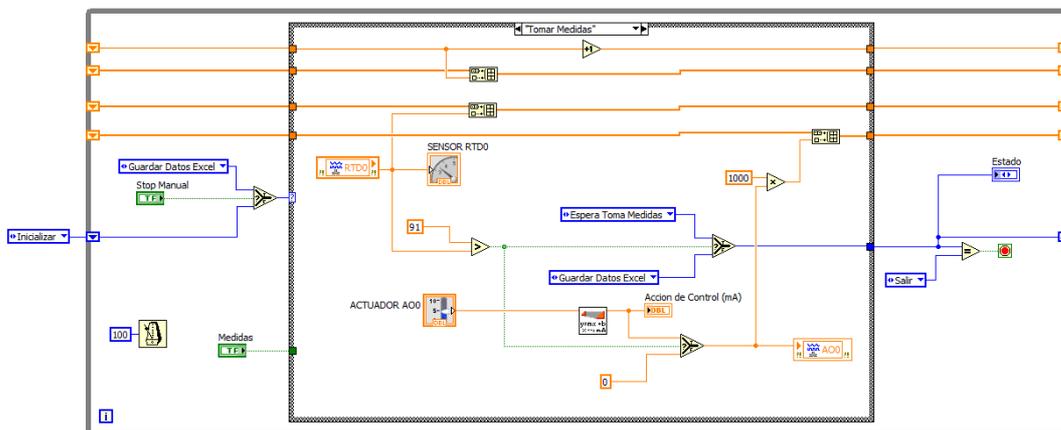
Estado.: Inicializar Valores.



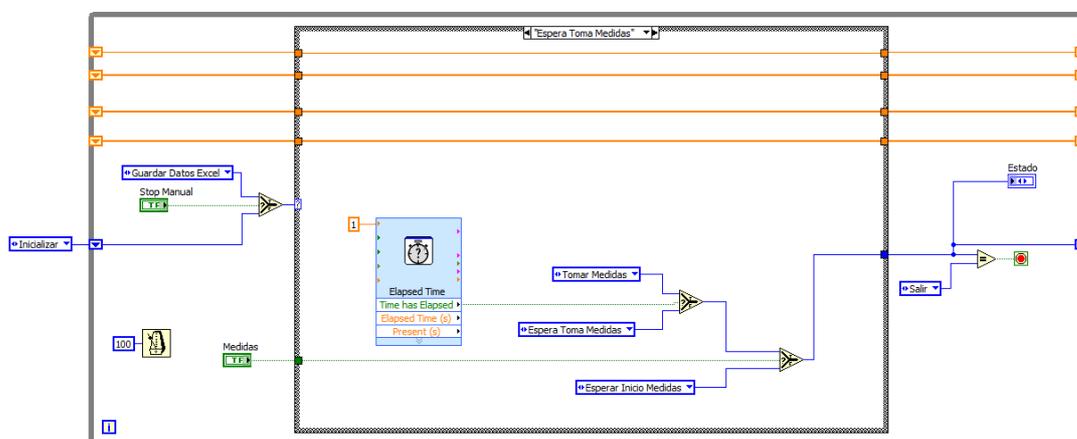
Estado.: Espera Inicio Medidas.



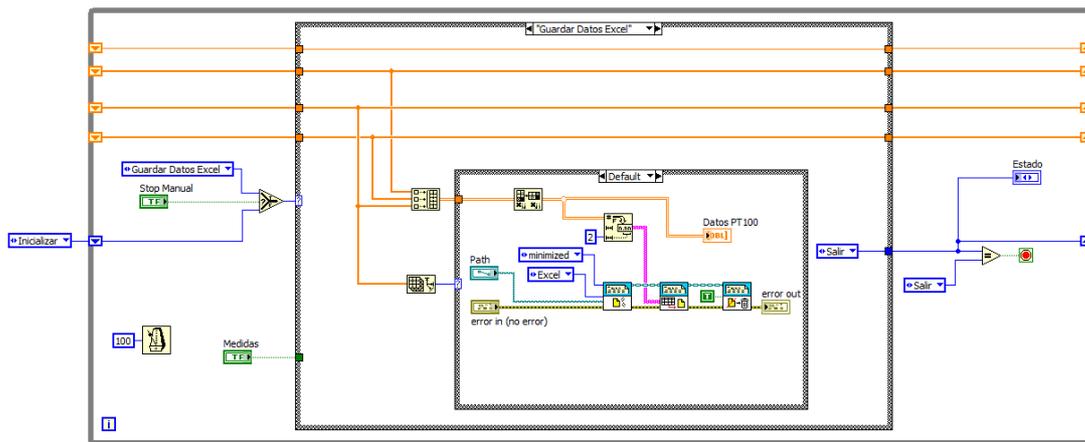
Estado.: Toma Medidas.



Estado.: Espera Toma Medidas.



Estado.: Guarda Datos Excel.



Fichero datos temporales calentamiento con 50% de acción de control, (CONEXIÓN).

Fichero datos temporales enfriamiento con 0% de acción de control, (DESCONEXIÓN).

116	115	0	88.116
117	116	0	87.908
118	117	0	87.829
119	118	0	87.761
120	119	0	87.715
121	120	0	87.725
122	121	0	87.739
123	122	0	87.678
124	123	0	87.645
125	124	0	87.623
126	125	0	87.590
127	126	0	87.605
128	127	0	87.629

116	115	0	26.157
117	116	0	26.158
118	117	0	26.157
119	118	0	26.158
120	119	0	26.157
121	120	0	26.156
122	121	0	26.156
123	122	50	26.155
124	123	50	26.156
125	124	50	26.156
126	125	50	26.156
127	126	50	26.156
128	127	50	26.154

Figura 20. Datos temporales ficheros Excel calentamiento y enfriamiento.

## 1.8.5 Sistemas dinámicos de orden reducido.

### 1.8.5.1 Identificación con Matlab sistema de primer orden (calentamiento).

Un sistema lineal de Primer Orden viene dado por la siguiente ecuación diferencial:

$$a * \frac{dy(t)}{dt} + b * y(t) = c * r(t) \rightarrow L \rightarrow a * s * y(s) + b * y(s) = c * r(s)$$

$$(a * s + b) * y(s) = c * r(s); G(s) = \frac{y(s)}{r(s)} = \frac{c}{a * s + b} = \frac{\frac{c}{b}}{a * \frac{s}{b} + 1} = \frac{K}{1 + \tau * s}$$

$$G(s) = \frac{K}{1 + \tau * s} \quad \text{Ganancia } K = \frac{c}{b} \quad \text{Cte. Tiempo } \tau = \frac{a}{b}$$

Cálculos en Matlab. Anexo Identificación con Matlab sistema de primer orden (calentamiento).

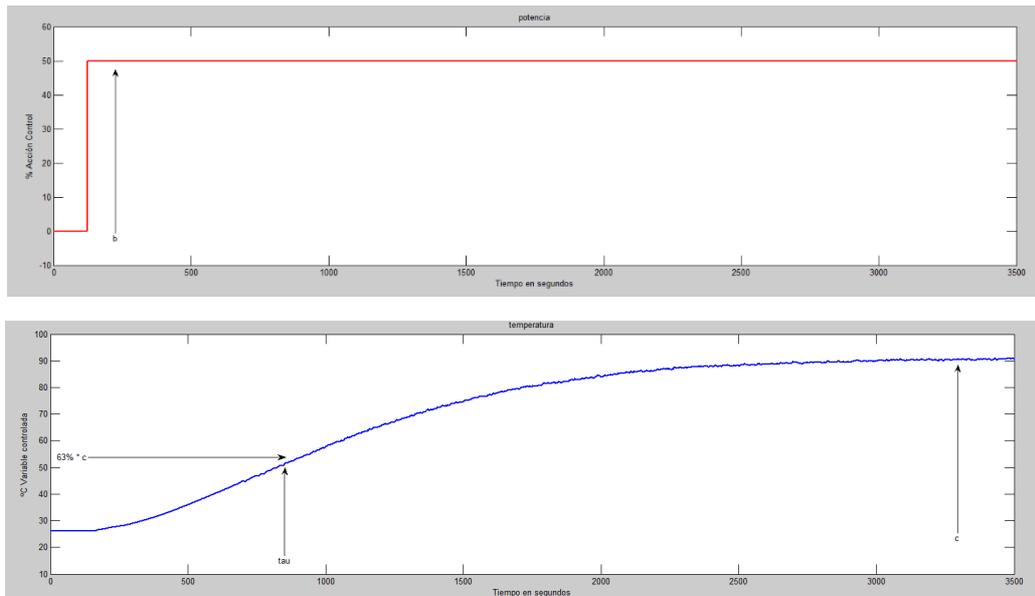


Figura 21. Grafica fichero Excel datos temporales calentamiento.

$$G(s) = \frac{1,289}{1115 * s + 1}$$

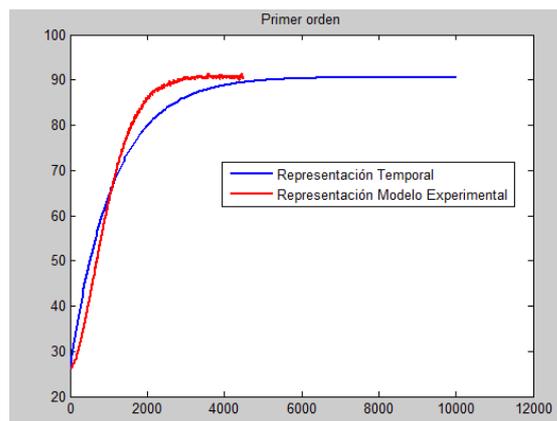


Figura 22. Datos temporales y modelo experimental Primer Orden.

**NO COINCIDENCIA**

### 1.8.5.2 Identificación con Matlab sistema de primer orden con retardo (calentamiento).

$$G(s) = \frac{K}{1 + \tau * s} * e^{-T*s} \quad T = \text{retardo en segundos}$$

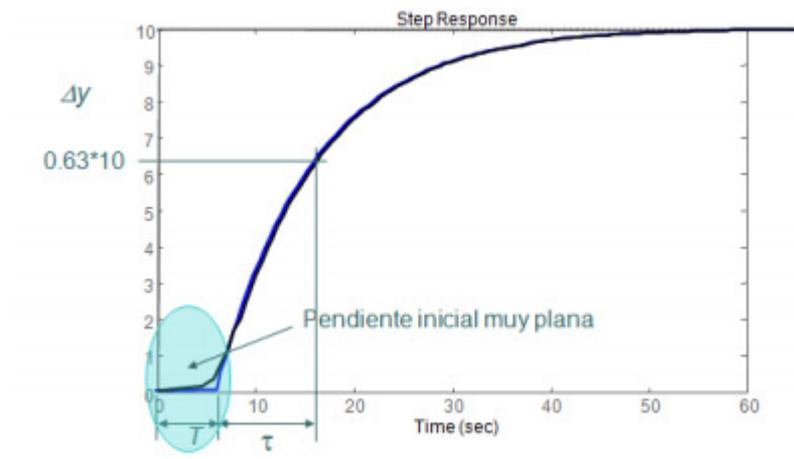


Figura 23. Sistema Primer Orden con Retardo.

(Apuntes profesor Angel Martinez Bueno)

Cálculos en Matlab. Anexo Identificación con Matlab sistema de primer orden con retardo (calentamiento).

$$G(s) = \frac{1,289}{998 * x + 1} * e^{-1,6*s}$$

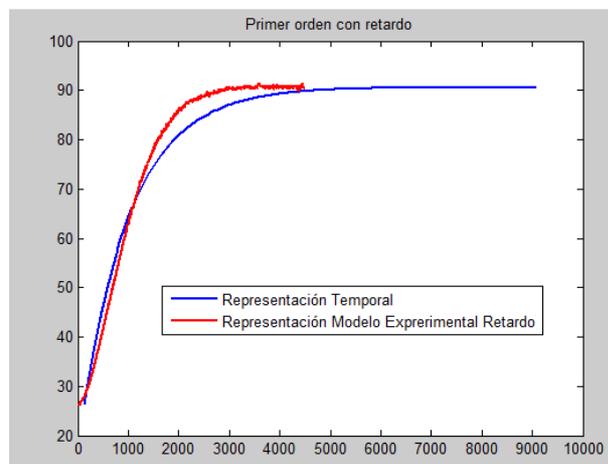


Figura 24. Datos temporales y modelo experimental Primer Orden.

**NO COINCIDENCIA**

### 1.8.5.3 Identificación con Matlab sistema de segundo orden (calentamiento).

Un sistema lineal de Segundo Orden viene dado por la siguiente ecuación diferencial:

$$a_1 * \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_2 * \frac{dy(t)}{dt} + a_3 * y(t) = b_1 * \frac{dr(t)}{dt} + b_2 * r(t)$$

siendo su FDT.

$$G(s) = \frac{b_1 * s + b_2}{a_1 * s^2 + a_2 * s + a_3}$$

Para el estudio solo consideramos sistema con  $b_2 \neq 0$  y para el caso que no ocupa solo el caso  $b_1=0$  (sistema con FDT sin ceros).

$$G(s) = \frac{b_2}{a_1 * s^2 + a_2 * s + a_3}$$

$$G(s) = \frac{\frac{b_2}{a_3}}{\frac{a_1}{a_3} * s^2 + \frac{a_2}{a_3} * s + 1} \quad (1)$$

Definición parámetros característicos:

Kest. Ganancia estática del sistema. Representa la relación salida/entrada cuando la respuesta del sistema se ha estabilizado.

$$K = \frac{b_2}{a_3}$$

Wn. Pulsación natural no amortiguada (rad/seg). Representa la frecuencia de las oscilaciones.

$$Wn^2 = \frac{a_3}{a_1}$$

$\zeta$  (xi). Coeficiente amortiguamiento relativo. Determina la rapidez con la que las oscilaciones de la respuesta son amortiguadas hasta desaparecer.

$$\zeta = \frac{\text{amortiguamiento real}}{\text{amortiguamiento critico}} = \frac{a_2}{2 * \sqrt{a_1 * a_3}}$$

$$2 * \zeta = \frac{a_2}{\sqrt{a_1 * a_3}} = \frac{a_2}{\sqrt{a_1} * \sqrt{a_3}} = \frac{a_2 * \sqrt{a_3}}{\sqrt{a_1} * \sqrt{a_3} * \sqrt{a_3}} = \frac{a_2 * \sqrt{a_3}}{a_3 * \sqrt{a_1}} = \frac{a_2}{a_3} * Wn$$

$$2 * \zeta = \frac{a_2}{a_3} * Wn \quad ; \quad \frac{2 * \zeta}{Wn} = \frac{a_2}{a_3}$$

sustituyendo en (1),

$$G(s) = \frac{\frac{b_2}{a_3}}{\frac{a_1}{a_3} * s^2 + \frac{a_2}{a_3} * s + 1} = \frac{K}{\frac{1}{Wn^2} * s^2 + \frac{2 * \zeta}{Wn} * s + 1} = \frac{K * Wn^2}{s^2 + 2 * \zeta * Wn * s + Wn^2}$$

La respuesta transitoria viene dada por la dinámica del sistema. Para ello se estudia la respuesta entrada Escalón unitario.

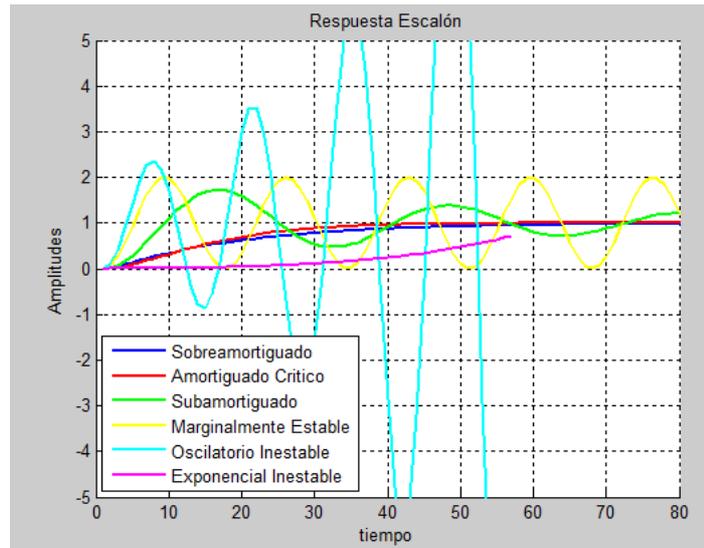


Figura 25. Respuesta Escalón en función de  $\zeta$ .

La respuesta se puede clasificar en función del Factor de Amortiguamiento Relativo  $\zeta$  (xi).

- $\zeta = 0$  No amortiguado “*unstable*”, polos imaginarios puros.
- $\zeta < 1$  Subamortiguado “*underdamped*”, polos complejos conjugados.
- $\zeta = 1$  Amortiguado “*critically damped*”, polos reales dobles.
- $\zeta > 1$  Sobreamortiguado “*overdamped*”, polos reales distingos.

La representación temporal de los datos del proceso durante el calentamiento corresponde a un sistema Sobreamortiguado. La FDT de un sistema Sobreamortiguado incluyendo un retardo es:

$$G(s) = \frac{K}{(T1 * s + 1) * (T2 * s + 1)} * e^{-L*s}$$

La ganancia estática del sistema “*Kest*” es determinada por el mismo procedimiento que para un sistema de Primer Orden. El tiempo de retardo “*time delay*” denotado como L, viene dado por el tiempo que transcurre desde que se aplica el Escalón de entrada y el valor inicial de salida del sistema. Se determina de igual forma que para un sistema de Primer Orden con Retardo. Así pues, el problema queda reducido a determinar las constantes de tiempo T1 y T2.

**Método de Harriott’s.** Es un método gráfico sencillo para determinar la FDT de un sistema Sobreamortiguado. (<http://www.users.abo.fi/khagblo/PDC/PDC5milver.pdf>).

Descripción del método:

1º. Todos los sistemas Sobreamortiguados tienen una respuesta al Escalón que llega al 72% del valor final en un tiempo igual a:

$$t = L + 1,25(T1 + T2)$$

Primero se debe calcular el tiempo de retardo L con ello se puede determinar la suma de las constantes de tiempo de la respuesta Escalón en dicho punto.

$$T1 + T2 = \frac{t - L}{1,25}$$

2°. Se utiliza un parámetro “z” el cual proporciona información sobre los distintos comportamientos del sistema. La respuesta del sistema a un Escalón para diferentes valores de “z” tiene la particularidad que la máxima separación entre respuestas se produce en el instante  $t = L + 1,25(T_1 + T_2)$ .

$$z = \frac{T_1}{T_1 + T_2}$$

$z = 1$ , sistema Primer Orden.

$z = 0,5$ , sistema Segundo Orden Amortiguado Crítico.

$0,5 < z < 1$ , sistema Segundo Orden Sobreamortiguado.

La figura muestra la respuesta a un Escalón de un sistema Sobreamortiguado para diferentes valores de z.

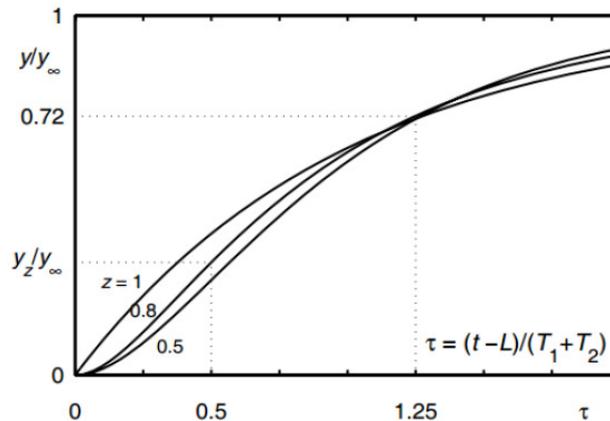


Figura 26. Escalón de un sistema Sobreamortiguado diferentes valores de z.

Las respuesta al Escalón están normalizadas respecto el valor en régimen permanente ( $y/y_\infty$ ). El tiempo está indicado por:

$$\tau = \frac{t - L}{(T_1 + T_2)}$$

3°. La respuesta al Escalón alcanza el 72% del régimen permanente en un tiempo igual

$$\tau = T_{72} \approx 1,25$$

4°. Las diferentes respuestas se encuentran máximamente separadas en

$$\tau = \tau_z \approx 0,5$$

5°. La suma de las constantes de tiempo ( $T_1+T_2$ ) puede ser estimado usando el tiempo  $T_{72}$ .

6°. El valor de la respuesta al escalón en  $\tau_z$  se puede utilizar para estimar el parámetro “z” según la siguiente gráfica.

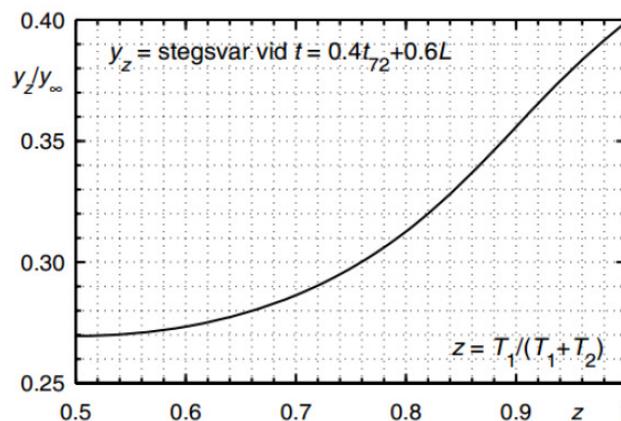


Figura 27. Valor de  $y_z$  normalizada para diferentes valores de z.

7°. Cuando sea conocido:

$$T1 + T2 = T_{72}$$

$$\frac{T1}{T1 + T2} = z$$

Será posible determinar T1 y T2. Gracias a la normalización del eje de tiempo de la figura 26 en dónde la respuesta al escalón alcanza el 72% en el mismo tiempo normalizado  $T_{72}$  y tener una buena separación en el tiempo normalizado  $\tau z$ . Esta normalización precisa conocer la suma de las constantes de tiempo y el posible retardo, el cual no conocemos al identificar al sistema.

#### PROCEDIMIENTO:

La fortuna hace que se pueda usar la variable de tiempo de la respuesta al Escalón. Cuando la respuesta alcanza el 72% del valor final podemos determinar qué tiempo  $T_{72}$  le corresponde. Se calcular la suma de constantes de tiempo como:

$$T1 + T2 = 0,8 * (T_{72} - L)$$

El retardo L se determina por separado. A menudo se puede asumir que  $L = 0$ ; a no ser que se sospeche de la presencia de un retardo el cual se determina por prueba y error tal como se hizo en el apartado Identificación con Matlab sistema Primer Orden con Retardo.

La respuesta a un escalón en diferentes tipos de sistemas varía en función del tiempo  $\tau z$

$$\tau z = 0,4 * T_{72} + 0,6 * L$$

se van dando valores a L por prueba y error.

La figura 26 es la respuesta al Escalón, podemos encontrar la relación entre “ $\tau z$ ” y “ $yz$ ”.  $y_{\infty}$  es la salida del sistema en régimen permanente.

A partir de la figura 26 y conociendo  $\tau z$  podemos determinar la relación  $y/y_{\infty}$ . A partir de la figura 27 podemos determinar “z”. Para cada valor dado a L se debe determinar el nuevo  $\tau z$  que corresponda.

Si  $yz/y_{\infty} < 0,27$  el tiempo de retardo L se debe incrementar.

Si  $yz/y_{\infty} < 0,40$  el tiempo de retardo L se debe decrementar.

El cálculo de las constantes de tiempo del sistema T1 y T2 se realiza así:

$$z = \frac{T1}{(T1 + T2)}$$

$$T1 = z * (T1 + T2)$$

$$T2 = (T1 + T2) - T1$$

#### Iteración mejorada.

El método anterior de forma general ofrece una precisión suficiente de T1 y T2. Dicho método se basa en el supuesto que  $T_{72} = 1,25$ , pero  $T_{72}$  varía con z tal como muestra la figura siguiente.

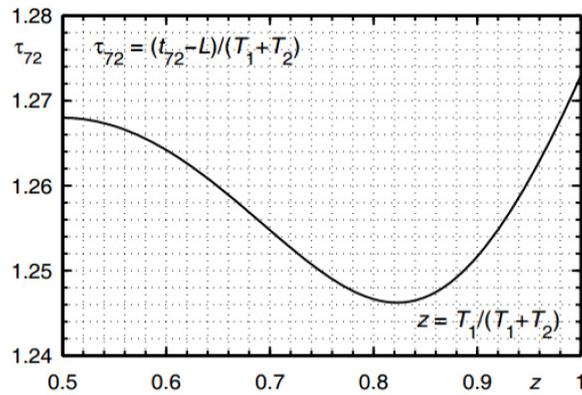


Figura 28.  $T_{72}$  para diferentes valores de  $z$ .

Si  $T_{72}$  varía respecto 1,25, la estimación de los instantes de tiempo  $T_1$  y  $T_2$  puede ser mejorado de la siguiente forma:

1°. Leer en la figura 28 la  $T_{72}$  para la  $z$  correspondiente.

2°. Calcular la nueva estimación de  $(T_1+T_2)$  a partir de

$$(T_1 + T_2) = \frac{T_{72} - L}{T_{72}'}$$

$T_{72}$ , se determina por la expresión  $t = L + 1,25(T_1 + T_2)$

$T_{72}'$ , se determina para la  $z$  dada.

3°. Calcular la nueva estimación de las constantes de tiempo.

Tener en cuenta que la estimación de  $z$ , según la figura 27, no se ve afectada porque “ $yz$ ” no cambia.

Método de Harriott’s implementado con Matlab. Anexo Identificación con Matlab sistema de segundo orden (calentamiento).

$$G(s) = \frac{1,289}{2,135 * 10^5 * s^2 + 975,4 * s + 1}$$

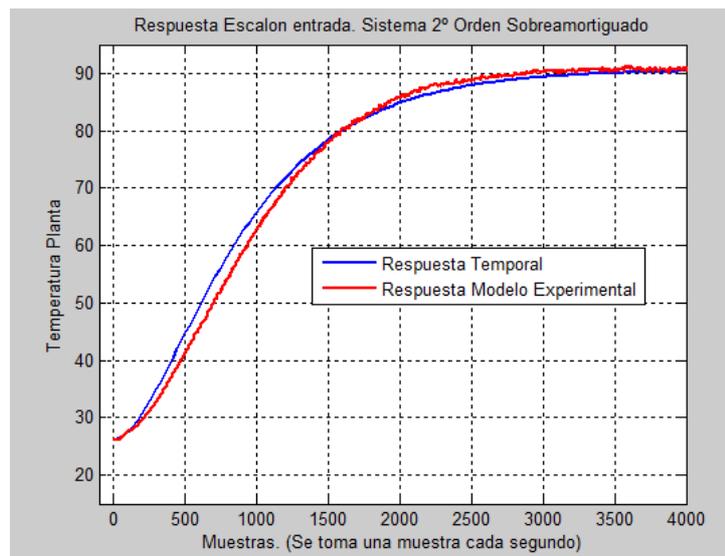


Figura 29. Datos temporales y modelo experimental Segundo Orden.

**PRACTICAMENTE COINCIDE**

FDT del proceso en calentamiento expresado en constantes de tiempo:

$$G(S) = \frac{1,289}{(643 * s + 1) * (331 * s + 1)}$$

FDT del proceso en calentamiento expresado en polos y ceros:

$$G(s) = \frac{6,057 * 10^{-6}}{(s + 0,0015) * (s + 0,0030)}$$

Se observa que aunque el proceso es térmico no se ha obtenido un sistema de Primer Orden, esto es debido a que la FDT no corresponde exclusivamente a la Planta sino a todo el conjunto de equipos del proceso más la Planta.

#### 1.8.5.4 Identificación con Matlab sistema de primer orden (enfriamiento).

Debido a no tener el proceso una enfriadora hace que todo el sistema sea No Lineal. Es decir, no existe una acción de control que actúe de igual manera para enfriar. Si para el calentamiento la acción de control va tomando valores positivos para el enfriamiento debería tomar valores negativos y eléctricamente el controlador no puede dar un valor negativo. Un valor negativo se traduce como una acción de control  $u(t) = 0$  con lo cual se perdería el control haciéndose inestable el proceso.

En cualquier caso, también es posible determinar el modelo experimental del enfriamiento natural del proceso. El cual será un sistema de Primer Orden por ser un sistema térmico.

De forma similar se implementa el cálculo del modelo en Matlab:

Cálculos en Matlab. Anexo Identificación con Matlab sistema de primer orden con (enfriamiento).

$$G(s) = \frac{1,289}{2262 * s + 1}$$

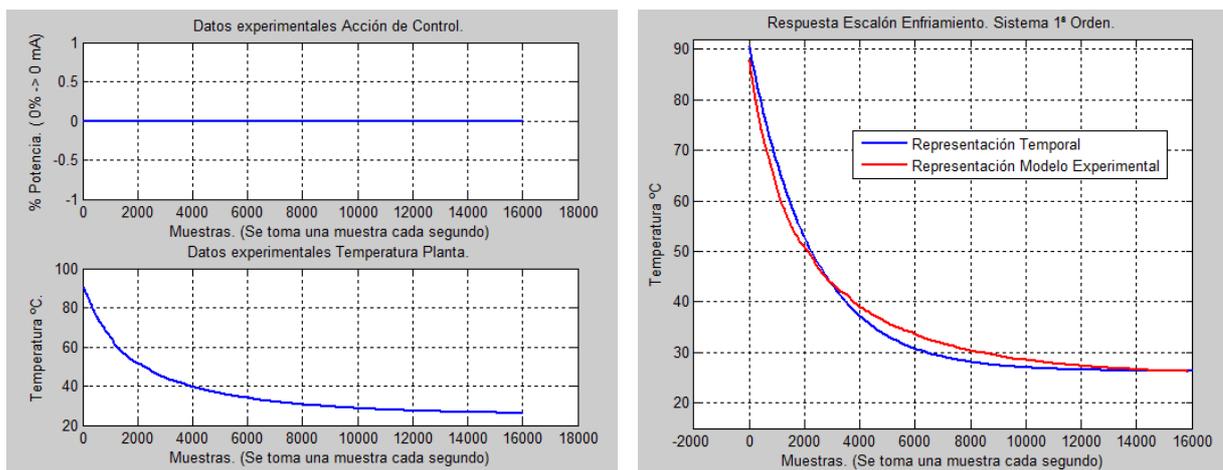


Figura 30. Datos temporales y modelo experimental 1º Orden Enfriamiento.

**PRACTICAMENTE COINCIDE**

## 1.9 Acción de Control.

La acción de control  $u(t)$  la genera el regulador o controlador, siendo sus objetivos:

- 1°. Hacer que la respuesta transitoria sea rápida y sin excesivas sobreoscilaciones.
- 2°. Reducir el error al menor posible, es decir, tener buen seguimiento de la referencia.
- 3°. Buen rechazo a perturbaciones y ruidos.

Los reguladores permiten modificar la respuesta dinámica del sistema para ajustarla a unas determinadas especificaciones de funcionamiento. Los reguladores ajustan los parámetros que caracterizan un sistema:

- Tiempo establecimiento,  $t_s$ .
- Tiempo pico,  $t_p$ .
- Sobreimpulso,  $\delta$ .
- Error,  $\epsilon$ .

También introducen inconvenientes, ya que pueden empeorar el comportamiento final del sistema.

Características de los reguladores:

- Robustos. Buen comportamiento a pesar de derivas en la Planta.
- Simplicidad. Pocos parámetros y fáciles de ajustar.
- Sentido físico, es fácil de entender en que se basa su funcionamiento.

### 1.9.1 Proporcional (P).

Ganancia variable como elementos de control. Está presente en todos los controladores. La acción de control es proporcional al error. Errores grandes acciones de control grandes y errores pequeños acciones de control pequeñas.

El LdR es una buena herramienta para el diseño de este tipo de regulador ya que representa todo lo que se puede conseguir con este sencillo regulador.

Al ser una acción proporcional al error es una acción de presente ya que actúa sobre la Planta en función del valor actual de la señal de error.

Para una  $K$  constante, si la acción de control aumenta el error disminuye y viceversa.

$$u(t) = K * \epsilon(t)$$

La acción de control es una amplificación del error, normalmente positiva. Con un regulador proporcional nunca llegará la salida a tener el valor de referencia por mucho que se aumente la ganancia, más aún, a partir de un valor de ganancia  $K$  puede según el sistema:

- Grandes Sobreoscilaciones.
- Incluso llegar a inestabilidades.

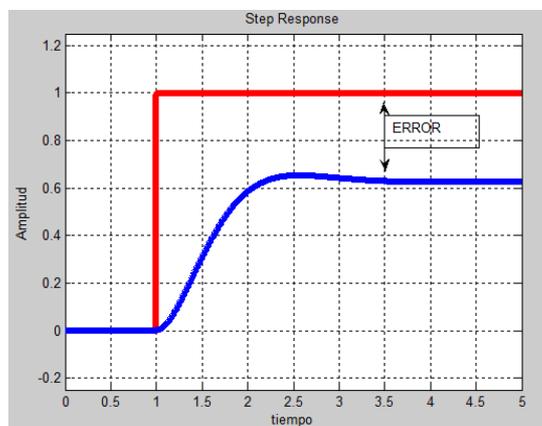


Figura 31. Acción de control Proporcional ante un Escalón.

## 1.9.2 Proporcional e Integral (PI).

Mejora el comportamiento en régimen permanente por reducir el error, es decir, mejora la precisión. Se utiliza cuando es preciso reducir el error mucho y la acción proporcional no lo consigue. La acción de control es proporcional a la suma de errores de los instantes anteriores (acumulación de errores).

$$u(t) = Ki \int_0^{Tn} \epsilon(t) * dt$$

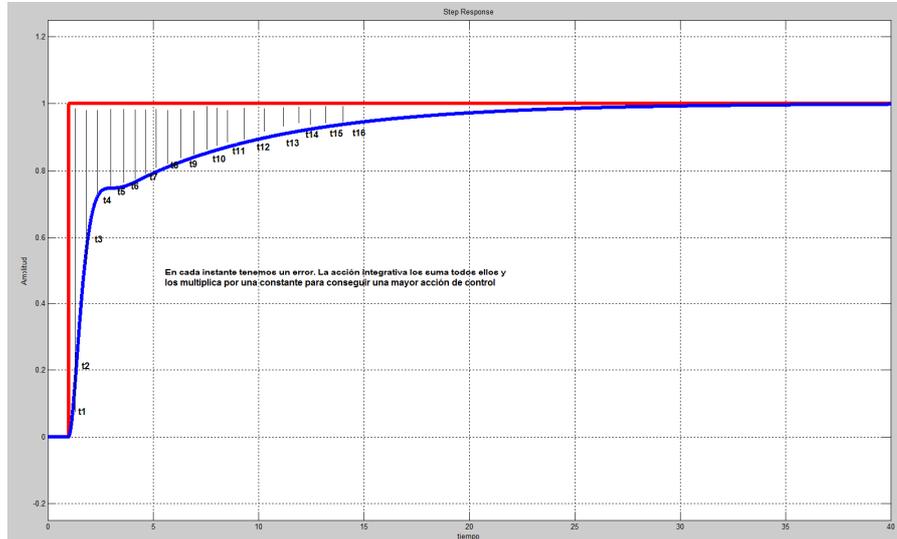


Figura 32. Acción de control Proporcional-Integrativa ante un Escalón.

$$u(t) = \int_0^{Tn} \epsilon(t) * dt = Ki * \epsilon_0 + Ki * \epsilon_0 + Ki * \epsilon_1 + Ki * \epsilon_2 + \dots + Ki * \epsilon_n$$

Al ser la acción de control  $u(t)$  más fuerte hace que la respuesta del sistema  $y(t)$  llega al valor de referencia  $r(t)$ .

Tiene el inconveniente de si la acumulación de errores es demasiado rápida puede que según el sistema llegue hacerse inestable.

Si la acción integral se implementa situando solo un polo en el origen para aumentar el tipo del sistema, el LdR puede cambiar completamente dejando de cumplirse las especificaciones dinámicas ajustadas con la acción proporcional.

Para evitarlo, además del polo en el origen se añade un cero próximo para que se compense con el polo y la respuesta dinámica de todo el conjunto se vea afectada lo menos posible.

$$GPI = K + \frac{Ki}{s} = \frac{K * s + Ki}{s} = K * \left( \frac{s + \frac{Ki}{K}}{s} \right) = K * \frac{\left( s + \frac{1}{Ti} \right)}{s} = K * \left( 1 + \frac{1}{Ti * s} \right)$$

Expresión analítica:

$$GPD = K * \left( 1 + \frac{1}{Ti * s} \right)$$

Expresión industrial:

$$GPD = K + \frac{Ki}{s}$$

$$Ki = \frac{K}{Ti}$$

$Ti$ , determina la posición del cero, fija el tiempo que el sistema tarda en cancelar el error.

Ti grande implica cero cercano al polo.

- El LdR se modifica poco.
- Acción integral pequeña, lento en cancelar error.

Ti pequeño implica cero separado polo.

- El LdR se modifica mucho llegando a cambiar el punto de diseño, no cumpliendo las especificaciones.
- Acción integral grande, rápida en cancelar error.

Criterio calculo valor tiempo integración Ti:

$$\frac{\sigma}{10} < \frac{1}{Ti} < \frac{\sigma}{5}$$

$\sigma$ , parte real polo dominante elegido en L.C (punto diseño)

### 1.9.3 Proporcional y Derivativa (PD).

Mejora el comportamiento en régimen transitorio, tp. Se puede decir que mejora la estabilidad. Se utiliza cuando se precisa alta sensibilidad al error. Produce una corrección significativa antes de que la magnitud de error se vuelva demasiado grande.

La derivada  $e(t)$  en el instante  $t_1$ , es decir, la tangente en  $t_1$ . Proyectando la derivada hasta el instante  $t_2$  (ecuación recta) se consigue estimar el error futuro.

$$\text{ecuación recta } e(t) + \frac{de(t)}{dt} * (t_2 - t_1) \quad ; \quad e(t) \text{ error}$$

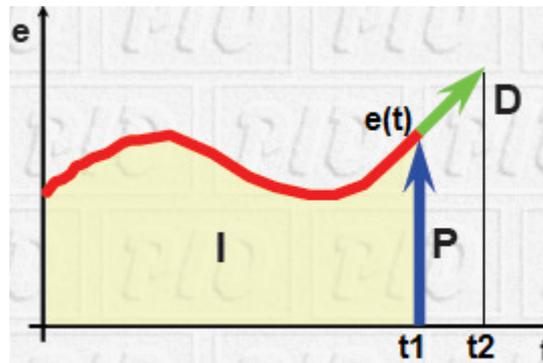


Figura 33. Acción de control Proporcional-Derivativa.

(<http://roblogtica2.blogspot.com.es/2010/10/control-pid.html>)

La acción derivativa es proporcional a una predicción del error, determina la tendencia del error, es decir, determina que fuerza de control aplicar. Añade Amortiguación adicional al sistema, es decir, disminuye  $\zeta$  ( $\xi$ ) luego también disminuye la sobreoscilación  $\delta$ , lo cual permite aplicar valores mas grandes de ganancia. Esto provoca una mejora en la precisión en régimen permanente.

$$u(t) = K[e(t) + \frac{de(t)}{dt} * t]$$

$$u(t) = K * e(t) + K * Td * \frac{de(t)}{dt} = K * e(t) + Kd * \frac{de(t)}{dt}$$

$$u(t) = Kd * \frac{de(t)}{dt}$$

Kd, determina la cantidad de acción derivativa presente en el regulador.

La acción derivativa desaparece cuando:

- El error se hace constante.
- El sistema se estabiliza.

Así pue, la acción derivativa permite mejorar la respuesta transitoria del sistema al modificar la forma del LdR, haciendo que pase el LdR por el punto del plano complejo correspondiente a las especificaciones dinámicas que se desea conseguir.

Se utiliza la acción derivativa cuando las ramas dominantes del LdR no pasan por los puntos correspondientes a las especificaciones dinámicas. El cero añadido, siempre a la izquierda del LdR, modificará la forma del LdR haciendo que pase por el punto deseado.

$$GPD = K + Kd * s = Kd * \left( \frac{K}{Kd} + s \right) = Kd * \left( \frac{1}{Td} + s \right) = \frac{Kd}{Td} * (1 + Td * s) = K * (1 + Td * s)$$

Expresión analítica:

$$GPD = K * (1 + Td * s)$$

Expresión industrial:

$$\begin{aligned} GPD &= K + Kd * s \\ Kd &= K * Td \end{aligned}$$

El regulador PD añade un cero en  $\frac{1}{Td}$ . El parámetro Td determina la posición del cero, recibe el nombre de tiempo derivación. La posición del cero se debe ajustar para hacer que el LdR pase por los puntos deseados.

#### 1.9.4 Proporcional, Integrativa y Derivativa (PID).

El proceso de diseño de un regulador PID consiste en determinar la cantidad de cada una de las acciones básicas de control.

Existe un procedimiento analítico, aunque también se puede ajustar de forma intuitiva los parámetros a partir de la observación y sus consecuencias en el comportamiento del sistema.

En la industria no existe un estándar en la utilización de un algoritmo PID, cada fabricante lo implementa según su criterio. Las tres clasificaciones principales de los algoritmos PID son:

Ideal:

$$GPID(s) = Kr * \left( 1 + \frac{1}{Ti * s} + Td * s \right)$$

Paralelo:

$$GPID(s) = Kp + \frac{Ki}{s} + Kd * s$$

Serie:

$$\begin{aligned} GPID(s) &= Kr \left( 1 + \frac{1}{Ti * s} \right) * (1 + Td * s) \\ Kp &= Kr \quad ; \quad Ki = \frac{Kp}{Ti} \quad ; \quad Kd = Kp * Td \end{aligned}$$

Industrial:

$$GPID(s) = Kp * \left( 1 + Td * s + \frac{1}{Ti * s} \right)$$

igualando,  $Kr * (1 + Td * s) * \left(1 + \frac{1}{Ti * s}\right) = K\bar{r} * (1 + T\bar{d} * s + \frac{1}{T\bar{i} * s})$   
 se obtienen los parámetros del regulador PID Industrial:

$$K\bar{r} = Kr * \left(1 + \frac{Td}{Ti}\right) \quad ; \quad T\bar{i} = Ti * \left(1 + \frac{Td}{Ti}\right) \quad ; \quad T\bar{d} = \frac{Td}{\left(1 + \frac{Td}{Ti}\right)}$$

Nota.:

$Ki \rightarrow$  precisión ;  $Ki \uparrow \rightarrow Ti \downarrow \rightarrow$  menos acción integral  $\rightarrow$  mas error  
 $Kd \rightarrow$  estabilidad ;  $Kd \uparrow \rightarrow Td \uparrow \rightarrow$  menos acción derivativa  $\rightarrow$  mas lento

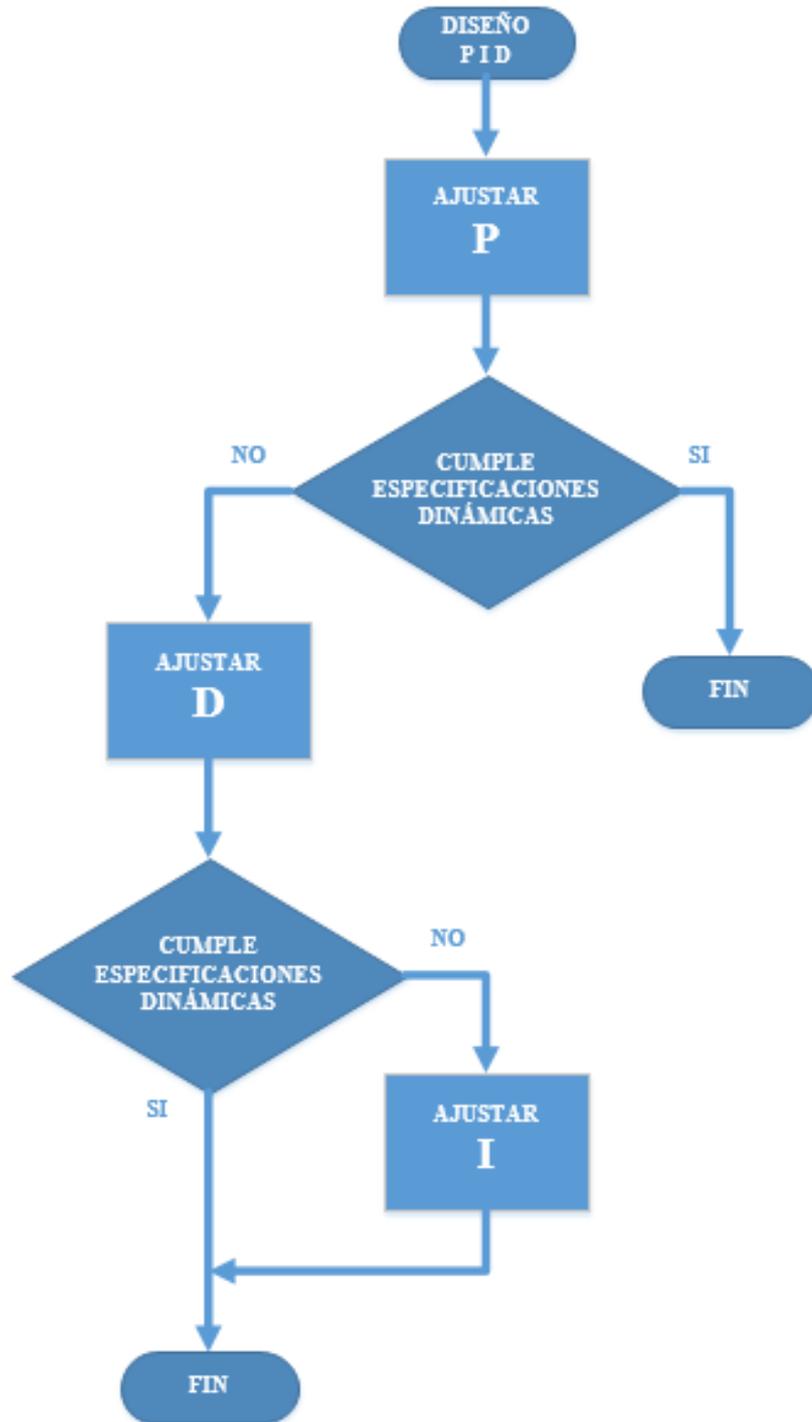


Figura 34. Algoritmo diseño PID.

## 1.10 Cálculos analíticos PID.

En función de los objetivos las especificaciones de diseño deseadas son:

- Sobreoscilación menores del 5% ( $\delta \leq 5\%$ ).
- Precisión superior al 2,5% ( $\varepsilon \leq 2,5\%$ ).
- Tiempo establecimiento, los objetivos indican ninguna especificación al respecto por ser un sistema muy lento. No obstante se establece un tiempo ambicioso de 1300 segundos.

La FDT obtenida corresponde al proceso en lazo abierto del sistema:

$$G(s) = \frac{1,289}{(643 * s + 1) * (331 * s + 1)}$$

Para el diseño analítico se considera:

$$H(s) = 1$$

Cálculo del punto diseño deseado:

$$ts \leq \frac{4}{\sigma} ; \sigma \leq \frac{4}{ts} ; \sigma \leq \frac{4}{1300} ; \sigma \leq -0,003$$

$$\delta \leq e^{-\sigma * tp} ; \ln \delta \leq -\sigma * tp * \ln e ; \ln \delta \leq -\sigma * \frac{\pi}{\omega n} * \ln e ; \omega n \leq \frac{-\sigma * \pi}{\ln \delta}$$

$$\omega n \leq \frac{-0,003 * \pi}{\ln 0,05} ; \omega n \leq 0,003$$

$$\nabla = -0,003 \pm 0,003 j \notin LdR \rightarrow PD$$

```
s=tf('s');
G=1.289/((643*s+1)*(331*s+1));
H=1;
% LdR para valores de K del regulador desde 0 hasta infinito.
% Los parámetros de rlocus son para Lazo Cerrado y ganancia del regulador
K=linspace(0,10,100); % se especifica el rango de K=0 a K=10 en 100 pasos
rlocus(G*H,K)
```

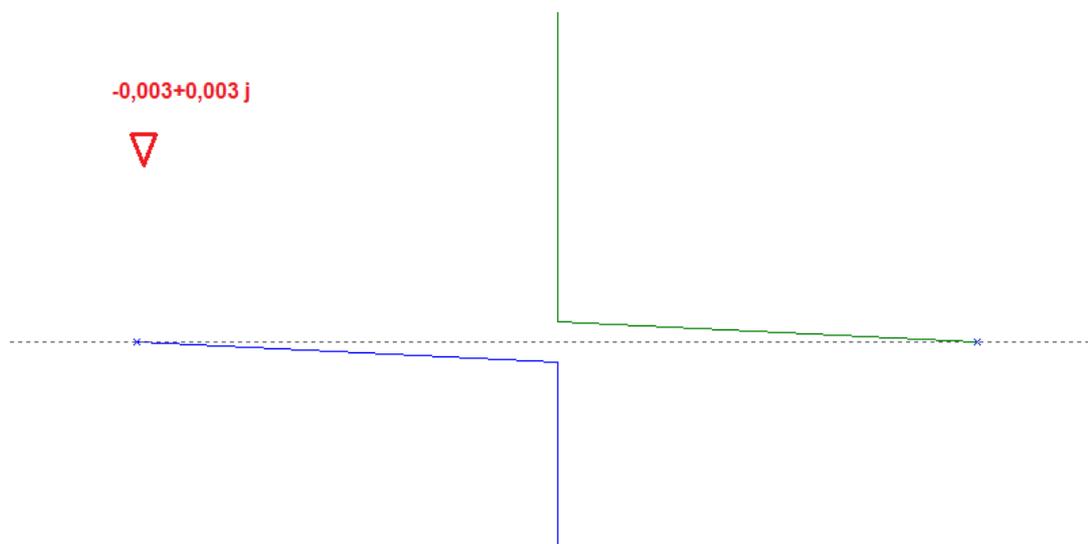


Figura 35. LdR en Lazo Cerrado.

Se desea que el LdR del proceso en lazo cerrado pase por el punto de diseño, con un regulador proporcional el punto de diseño no pertenece al LdR en lazo cerrado tal como se ve en la figura.

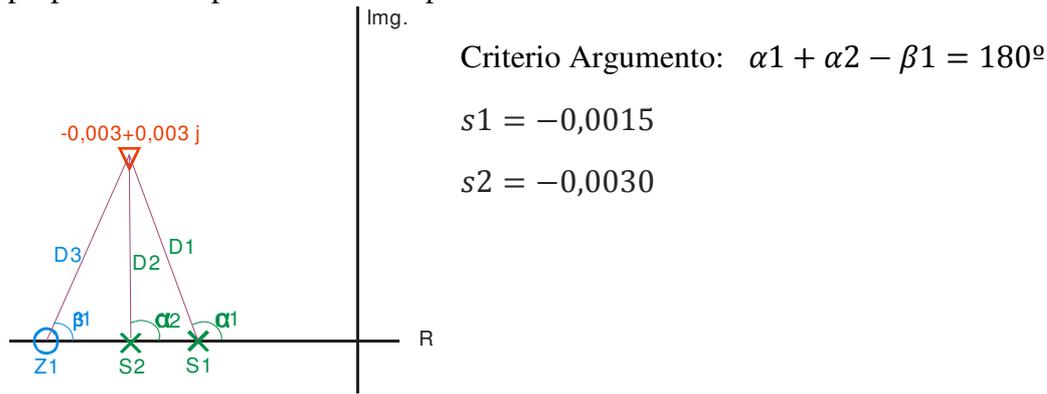


Figura 36. Punto de diseño paso LdR.

$$\alpha_1 = 180^\circ - \arctg \frac{0,0030}{0,0030 - 0,0015} = 116,56^\circ$$

$$\alpha_2 = \arctg \frac{0,003}{0} = 90^\circ$$

$$\beta_1 = 116,56^\circ + 90^\circ - 180^\circ = 26,56^\circ$$

$$\operatorname{tg} 26,56^\circ = \frac{0,0030}{z_1 - 0,0030} ; z_1 = \frac{0,0030}{\operatorname{tg} 26,56^\circ} + 0,003 = 0,0090 ; z_1 = -0,0090$$

$$\frac{1}{T_d} = 0,0090 ; T_d = 111,11$$

Criterio Módulo:  $KLdR = \frac{D_1 * D_2}{D_3}$

$$KLdR = KG * KH * Kd ; Kd = Kp * T_d ; KLdR = KG * KH * Kp * T_d$$

$$Kp = \frac{KLdR}{KG * KH * T_d}$$

$$D_1 = \sqrt{0,0030^2 + (0,0030 - 0,0015)^2} = 0,0033$$

$$D_2 = 0,0030$$

$$D_3 = \sqrt{0,0030^2 + (0,0090 - 0,0030)^2} = 0,0067$$

$$KLdR = \frac{D_1 * D_2}{D_3} = \frac{0,0033 * 0,0030}{0,0067} = 0,0014$$

Nota, en el cálculo analítico es mejor representar las funciones de transferencia G(s) como polos y ceros en lugar de constante de tiempo:

FDT en función de constantes de tiempo:

$$G(s) = \frac{1,289}{(643 * s + 1) * (331 * s + 1)}$$

$$\frac{1,289}{(643 * s + 1) * (331 * s + 1)} = \frac{6,056 * 10^{-6}}{(s + 0,0015) * (s + 0,0030)}$$

FDT en función de polos y ceros:

$$\text{Utilizar para el cálculo analítico} \rightarrow G(s) = \frac{6,056 * 10^{-6}}{(s + 0,0015) * (s + 0,0030)}$$

$$KG = 6,056 * 10^{-6}$$

$$Kp = \frac{KLdR}{KG * KH * Td} = \frac{0,0014}{6,056 * 10^{-6} * 1 * 111,11} = 2,08$$

$$Kp = 2,08 = K$$

$$Kd = K * Td ; Kd = 2,08 * 111,11 = 231,17$$

$$GPD(s) = Kp + Kd * s = (2,08 + 231,17 * s)$$

$$(2,08 + 231,17 * s) = 2,08 * \frac{231,17}{2,08} * \left( \frac{1}{\frac{231,17}{2,08}} + s \right) = 231,17 * (0,0090 + s)$$

$$GPD(s) = 231,17 * (0,0090 + s)$$

$$\varepsilon = \lim_{s \rightarrow 0} s * \frac{1}{1 + GPD(s) * G(s) * H(s)} * r(s)$$

$$r(s) = \frac{1}{s} \quad \text{Transformada Laplace Escalón}$$

$$\varepsilon = \lim_{s \rightarrow 0} s * \frac{1}{1 + (2,08 + 231,17 * s) * \frac{1,289}{(643 * s + 1) * (331 * s + 1)} * 1} * \frac{1}{s}$$

$$\varepsilon = \frac{1}{1 + (2,08 + 231,17 * 0) * \frac{1,289}{(643 * 0 + 1) * (331 * 0 + 1)} * 1} = 0,27$$

$$\varepsilon = 27\% \rightarrow PID$$

Para el cálculo de la acción integral se mantiene los valores calculados de Kp=2,08 y Kd=231,17

$$\text{Criterio Máxima Acción Integral: } \frac{\sigma}{5} \leq \frac{1}{Ti}$$

$\sigma = 0,0015$  Polo dominante.

$$\frac{\sigma}{5} \leq \frac{1}{Ti} ; Ti \leq \frac{5}{\sigma} ; Ti \leq \frac{5}{0,0015} ; Ti \leq 3333,33$$

$$Ki = \frac{Kp}{Ti} = \frac{0,0097}{333,33} = 2,91 * 10^{-6}$$

$$GPI(s) = \left(1 + \frac{1}{T_i * s}\right) = \frac{s + \frac{1}{T_i}}{s} = \frac{s + 0,0003}{s}$$

Aunque normalmente no es necesario, puede ser conveniente recalcular los parámetros del regulador PD teniendo en cuenta que la inclusión de la acción integral supone un nuevo punto inicial y un nuevo punto final. Esto implica dos nuevos ángulos para el criterio del argumento y dos nuevas distancias para el criterio del módulo. Sin embargo, es cierto que los ángulos y las distancias son prácticamente iguales ya que la pareja polo-cero del integrador está muy próximos por lo que la influencia sobre los parámetros del regulador PD será pequeña.

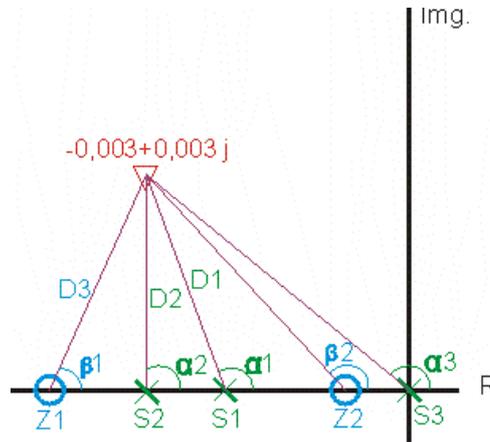


Figura 37. Punto diseño paso LdR teniendo en cuenta polos y ceros PID.

De esta forma, no se ha diseñado realmente un regulador PID sino un regulador PD puesto en serie con un PI.

$$GPID(s) = (2,08 + 231,17 * s) * \frac{s + 0,0003}{s} = 2,08 * \left(1 + \frac{231,17}{2,08} * s\right) * \left(1 + \frac{1}{3333 * s}\right)$$

$$GPID(s) = 2,08 * (1 + 111,11 * s) * \left(1 + \frac{1}{3333 * s}\right) = K_{\text{D}} * (1 + T_{\text{D}} * s + \frac{1}{T_{\text{I}} * s})$$

Los parámetros del regulador PID se obtienen a partir de los anteriores mediante las siguientes expresiones, que son las que proporcionan los valores de los tres parámetros característicos de un regulador PID Industrial:

$$K_{\text{D}} = 2,08 * \left(1 + \frac{111}{3333}\right) \quad ; \quad T_{\text{D}} = 3333 * \left(1 + \frac{111}{3333}\right) \quad ; \quad T_{\text{I}} = \frac{111}{\left(1 + \frac{111}{3333}\right)}$$

$$K_{\text{D}} = 2,15 \quad ; \quad T_{\text{D}} = 3444 \quad ; \quad T_{\text{I}} = 107$$

$$GPID(s) = 2,15 * \left(1 + 107 * s + \frac{1}{3444 * s}\right)$$

## 1.11 Diseño PID con función “sisotools” de Matlab.

Es importante seleccionar la preferencia en la representación de las FDT desde la barra de menús de SISO Tool, Edit, Preference. Es posible elegir entre:

- Polos y Ceros.
- Constante de Tiempo.
- Frecuencia.

Ya que trabajamos con Polos y Ceros en el cálculo analítico lo mejor es seleccionar lo mismo, aunque en este caso se ha elegido Constante de Tiempo para mostrar que se llegan a los mismos resultados solo cambia el valor de la ganancia.

```
s=tf('s');
G=1.289/((643*s+1)*(331*s+1));
H=1;
sisotools
```

Iniciamos el ajuste de la acción derivativa. Por los cálculos analíticos sabemos que el cero debe estar en  $z = -0,0090$

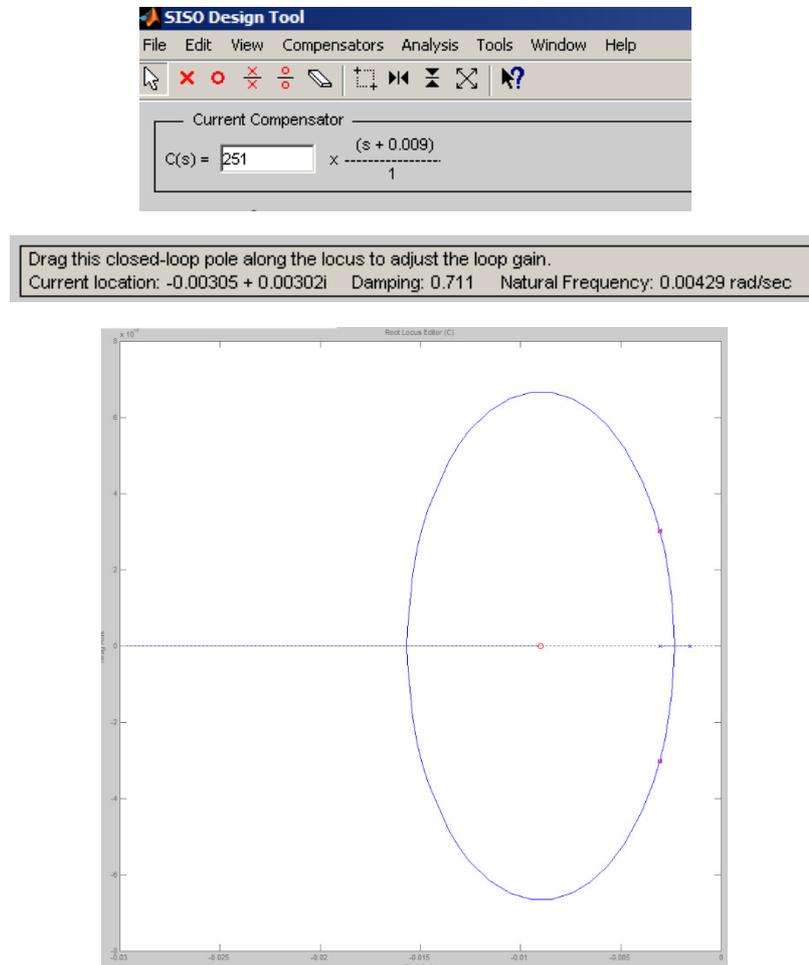


Figura 38. Diseño PD con la función sisotool de Matlab.

$$PD(s) = 251 * (0,0090 + s) = 2,26 + 252 * s$$

$$Kp = 2,26 ; Kd = 252 ; Td = \frac{252}{2,26} = 111$$

Para añadir la acción integrativo comenzamos ubicando el polo en el origen y el cero lo situamos según el criterio de Máxima Acción Integral calculada analíticamente  $z = 0,0003$

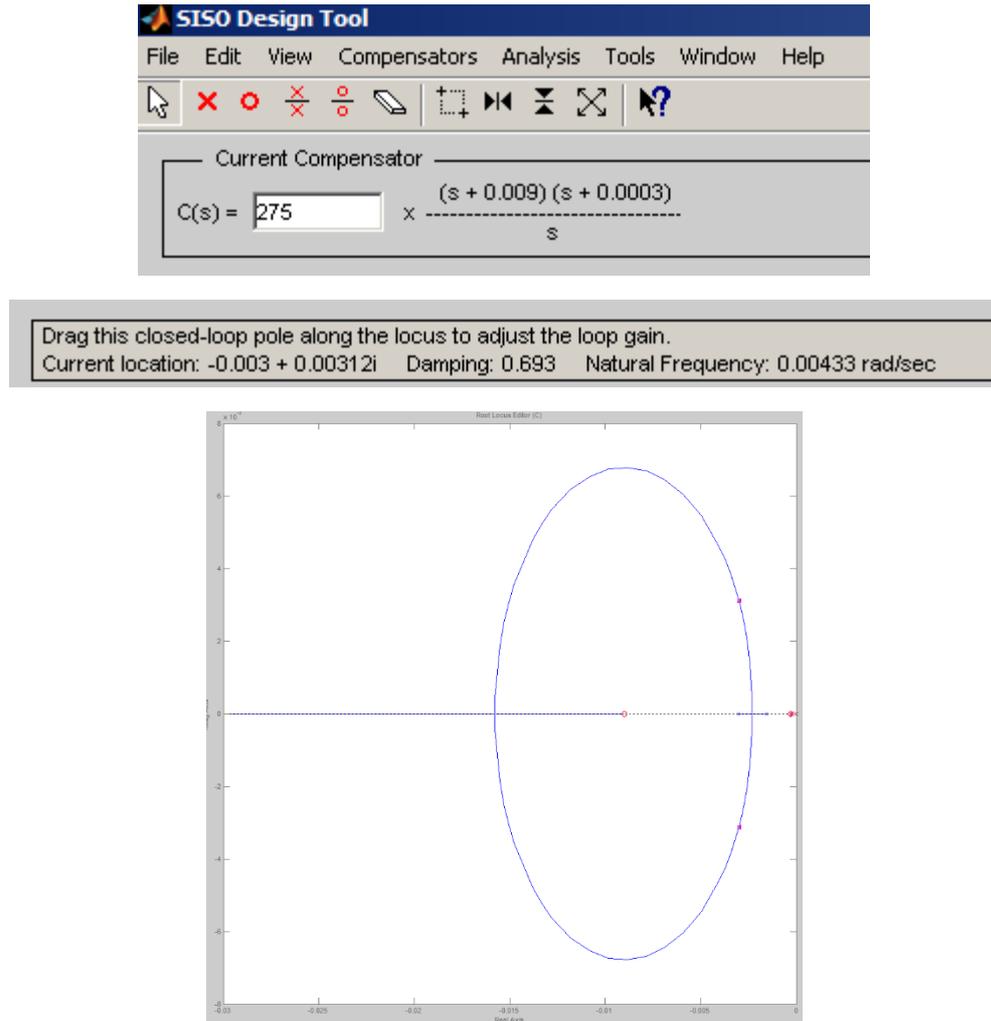


Figura 39. Diseño PID con la función sisotool de Matlab.

$$PID(s) = 275 * \frac{(s + 0,009) * (s + 0,0003)}{s} = 2,47 * (1 + 111 * s) * (1 + \frac{1}{3333 * s})$$

$$Kp = 2,47 ; Kd = Kp * Td = 2,47 * 111 = 275 ; Ki = \frac{Kp}{Ti} = \frac{2,47}{3333} = 0,74 * 10^{-3}$$

PID Industrial

$$K_{\text{tr}} = 2,47 * \left(1 + \frac{111}{3333}\right) ; T_{\text{tr}} = 3333 * \left(1 + \frac{111}{3333}\right) ; T_{\text{dl}} = \frac{111}{\left(1 + \frac{111}{3333}\right)}$$

$$K_{\text{tr}} = 2,55 ; T_{\text{tr}} = 3444 ; T_{\text{dl}} = 107$$

$$GPID(s) = 2,55 * \left(1 + 107 * s + \frac{1}{3444 * s}\right)$$

## 1.12 Simulación proceso y ajuste PID con entorno Simulink de Matlab.

Para resolver la No Linealidad se recurre a disponer de un conmutador el cual cierra el circuito de calentamiento cuando la acción de control es positiva y cerraría el circuito de enfriamiento cuando la acción de control fuera negativa, pero esta posibilidad. El regulador solo proporciona niveles eléctricos positivos. Este esquema representa el proceso completo.

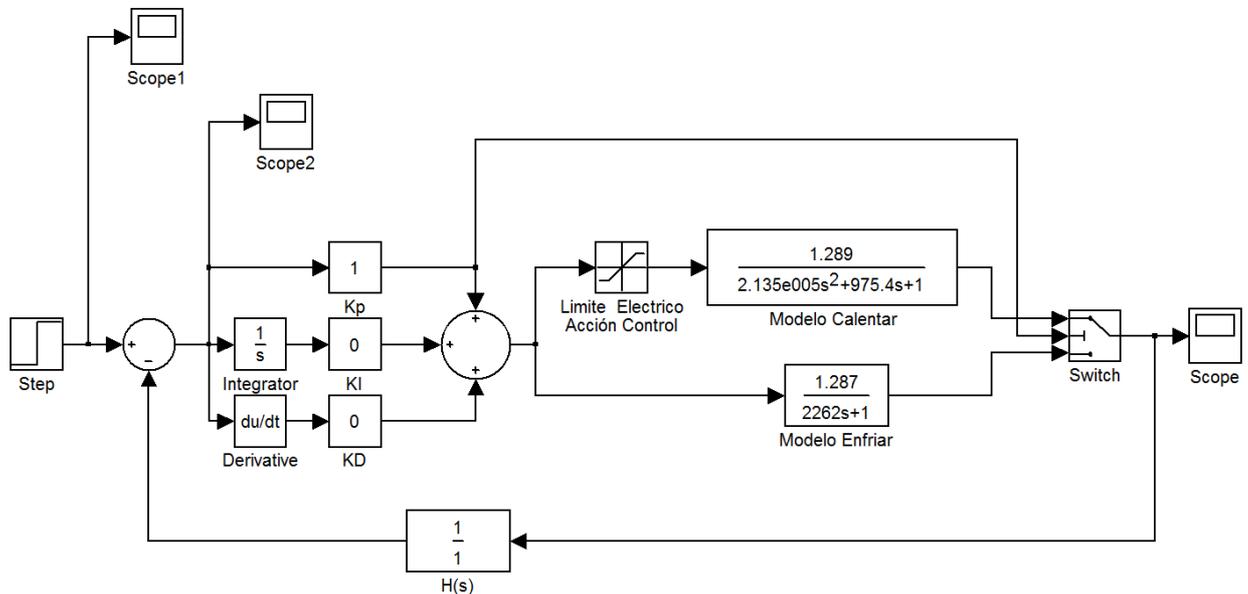


Figura 40. Simulink proceso completo modelado.

Parámetros configuración simulación:

- Tiempos de muestreo 1 segundo.
- Resolver FDT superiores a Segundo Orden
- Tiempo simulación 6000 segundos
- El escalón se aplica a los 3000 segundos para dar tiempo al sistema a estabilizarse.
- Valor inicial Escalón temperatura ambiente 25°C
- Valor final Escalón 90°C.

El siguiente esquema se utiliza para la simulación de la parte de calentamiento. El bloque saturación evitar sobre pasar la acción de control máxima (las acciones de control implementadas en Labview va del 0% al 100%, 4-20 mA).

$$Kp = 2,55; \quad Ki = \frac{2,55}{3444} = 0,00074; \quad Kd = 2,55 * 107 = 272,85$$

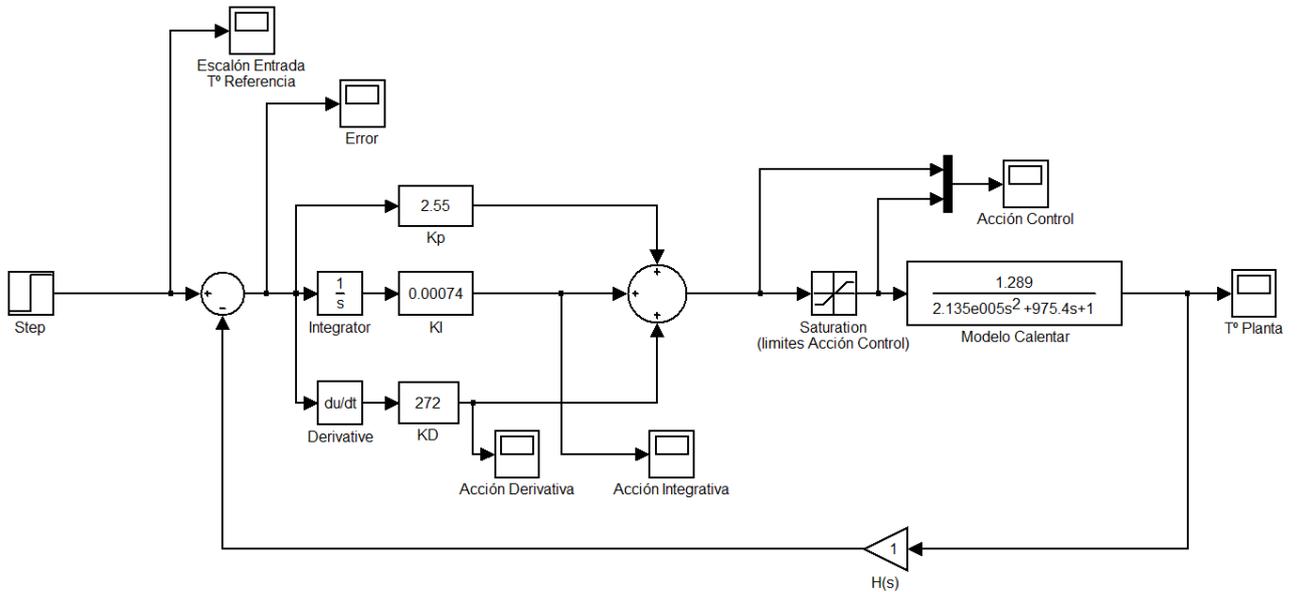


Figura 41. Simulink proceso calentamiento.

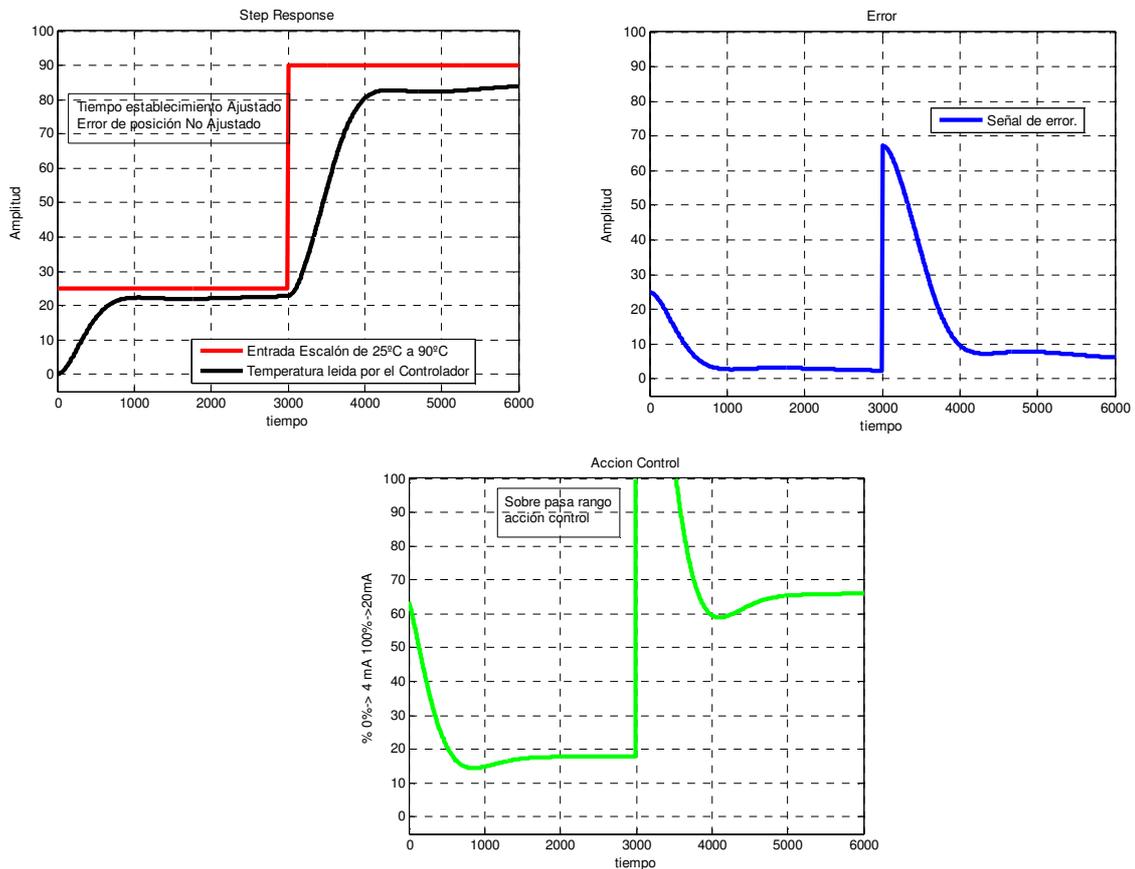


Figura 42. Simulación proceso calentamiento con parámetros PID teóricos.

Se observa que la magnitud de la acción de control no es asumible por el controlador por superar ampliamente los márgenes eléctricos. Las acciones de control del equipo disponible e implementado en LabView van desde 4 mA (0%) hasta 20 mA (100%). Los tiempos de

establecimiento es bueno y también el error. Así pues se debe ajustar por prueba y error los parámetros del regulador siendo los siguientes los admisibles por la acción de control.

$$Kp = 1; \quad Ki = 0,001; \quad Kd = 0,15$$

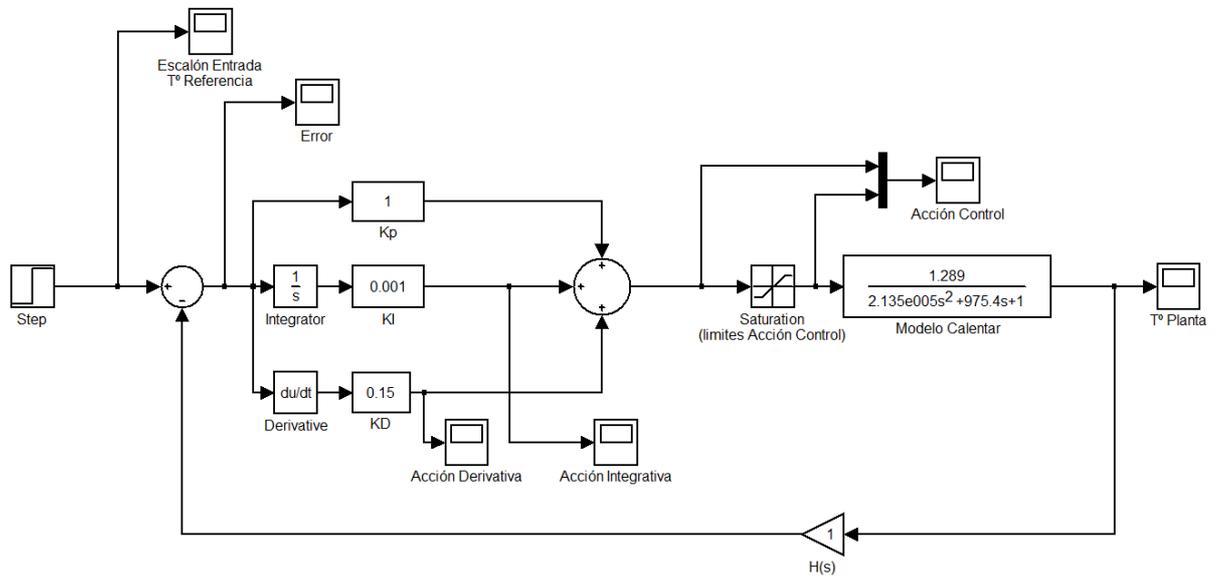


Figura 43. Simulink calentamiento parámetros PID ajustados por prueba-error.

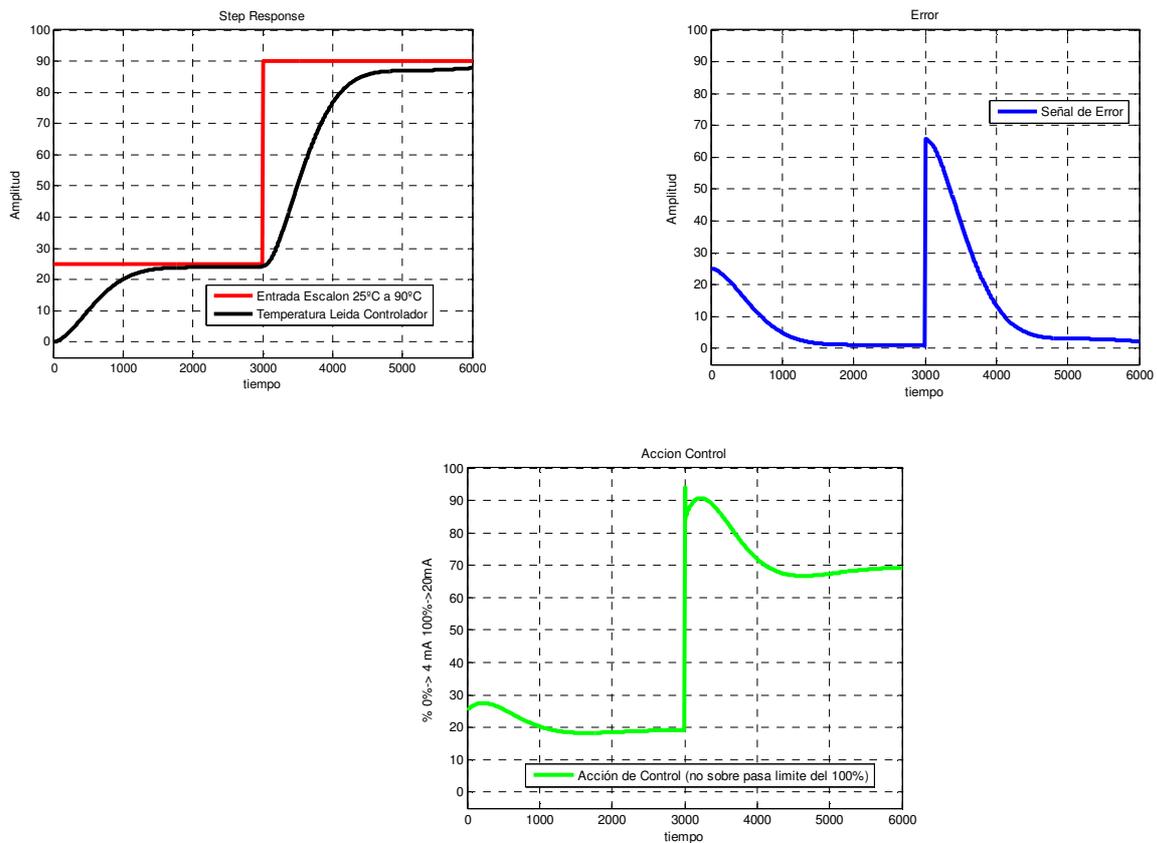


Figura 44. Simulación calentamiento con parámetros PID ajustados.

## 1.13 Implementación PID en LabView.

### 1.13.1 Funciones Vi integral y derivativa.

A partir de las funciones matemáticas se implementa la ecuación del controlador PID.

Las funciones se encuentran en: Functions-Programming-Signal Processing-Point By Point-Integral & Differential PtByPt.

La función Integral x (t) PtByPt VI realiza la integración discreta de la variable. Tiene la condición que la variable este discretizada a intervalos constante de tiempo. Calcula la integral definida. El valor de x(t) integrales es el área bajo la curva de la serie de datos entre 0 y (n-1) dt. La condición inicial en cada llamada a esta VI debe mantenerse entre una inicialización y la siguiente.

La función Derivada x (t) PtByPt VI realiza la derivada discreta de la variable. No tiene la condición que la variable este discretizada a intervalos constante de tiempo.

En el presente proyecto el PID se ha implementado de esta forma para que coincida con el bloque PID implementado en Simulink.

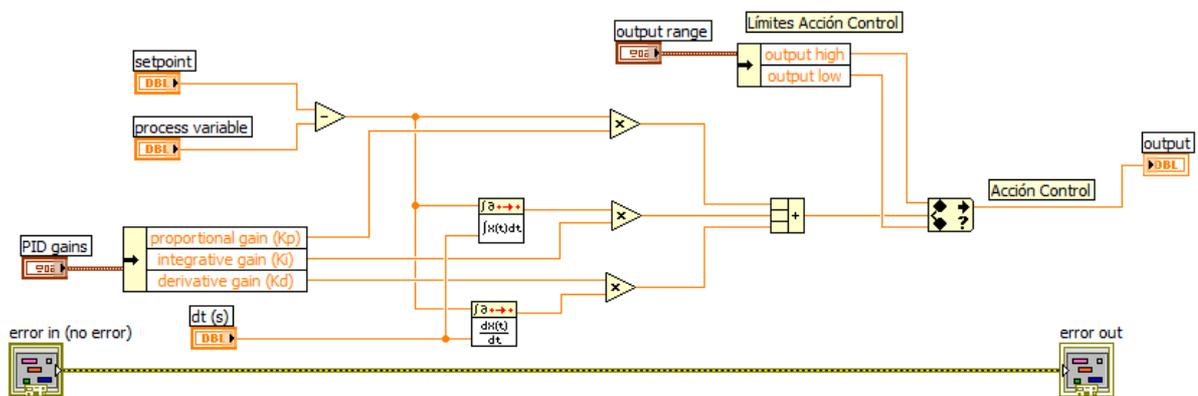


Figura 45. Implementación PID teórico con parámetros industriales.

### 1.13.2 Función PID paleta “control toolkist”.

Implementa el controlador PID utilizando un algoritmo PID para aplicaciones PID simples o aplicaciones de control de alta velocidad que requieren un algoritmo eficiente. El algoritmo PID cuenta con rango de salida de control que limita con el integrador de anti-windup y salida del controlador sin perturbaciones para los cambios de ganancia PID. Utilice la instancia DBL de este VI para implementar un solo lazo de control. Utilice la instancia de Array DBL para implementar el control multi-loop paralelo.

La función disponible en: Functions-Programming-Control Design & Simulation-PID-PID.VI

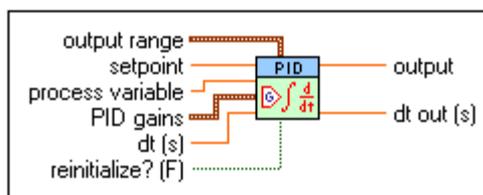


Figura 46. VI PID creado por LabView.

No se utiliza esta función en el presente proyecto por razones de coincidencia entre el PID simulado e implementado.

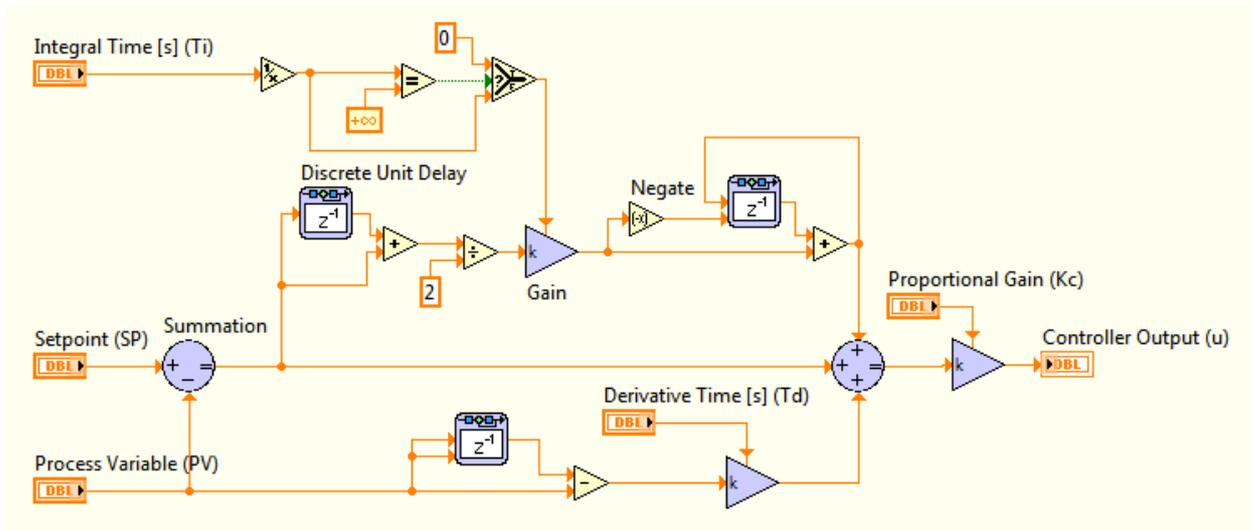


Figura 47. Algoritmo función PID.VI de LabView.

## 1.14 Conclusiones.

1°.- La acción de control expresada en tanto por ciento da una información más intuitiva de la potencia aplicada al calefactor en todo momento.

2°.- El lazo de corriente 4-20 mA como señal de actuación además de proporcionar un control proporcional introduce inmunidad electromagnéticas.

3°.- Implementar la función PID.VI por estar más optimizada. La obtención de los parámetros sería sintonizando el controlador por prueba y error hasta ajustar las especificaciones transitorias y permanentes o simularlo con Simulink el algoritmo de la función.

4°.- La utilización de LabView junto con el controlador compactRIO de flexibilidad para futuras ampliaciones en el proceso.

5°.- La obtención experimental de la FDT del proceso es una aproximación con poca utilizada práctica para el cálculo de los parámetros característicos del controlador ya sea por procedimiento analítico o utilizando la herramienta sisotool. Por no tener en cuenta las limitaciones eléctricas de la acción de control.

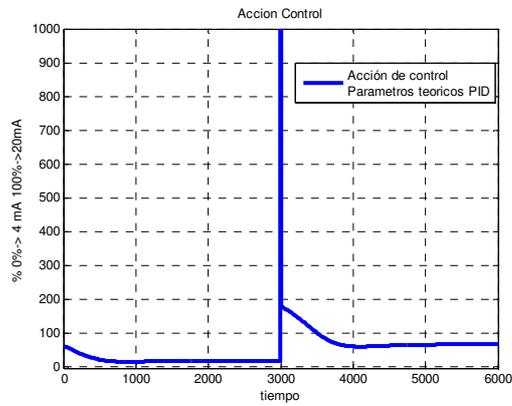


Figura 48. Acción de Control con parámetros PID cálculo teórico.

Se observan picos de acción control muy superiores al 100%, lo cual es imposible porque el modulo NI 9265 solo proporciona corrientes máximas de 20 mA.

## **2 PLIEGO CONDICIONES.**

### **2.1 Conductores eléctricos.**

Los conductores y cables tendrán las características para corrientes de hasta 1 A y en todo momento cumplirán con las prescripciones generales establecidas en la ICT-BT-19 del REBT. Estos serán de cobre o aluminio y serán siempre aislados, excepto cuando vayan montados sobre aisladores, tal y como se indica en la ICT-BT-20 del REBT.

El cobre utilizado en la fabricación de cables o realización de conexiones de cualquier tipo o clase, cumplirá las especificaciones contenidas en la Norma UNE que le sea de aplicación y el REBT, siendo de tipo comercial puro, de calidad y resistencia mecánica uniforme y libre de todo defecto mecánico.

### **2.2 Protecciones conductores eléctricos y canalizaciones.**

Sirven para unir eléctricamente las masas de una instalación a ciertos elementos con el fin de asegurar la protección contra contactos indirectos. En el circuito de conexión a tierra, los conductores de protección unirán las masas al conductor de tierra. Su sección vendrá determinada por los valores de la Tabla 2 de la ICT-BT-19.

En otros casos reciben igualmente el nombre de conductores de protección, aquellos conductores que unen las masas: al neutro de la red o a un relé de protección. En todos los casos los conductores de protección que no forman parte de la canalización de alimentación serán de cobre con una sección, al menos de: 2,5 mm<sup>2</sup> (con protección mecánica) o 4 mm<sup>2</sup> (sin protección mecánica).

Como conductores de protección pueden utilizarse conductores en los cables multiconductores, conductores aislados o desnudos que posean una envolvente común con los conductores activos, o conductores separados desnudos o aislados. Cuando la instalación consta de partes de envolventes de conjuntos montadas en fábrica o de canalizaciones prefabricadas con envolvente metálica, estas envolventes pueden ser utilizadas como conductores de protección si satisfacen, simultáneamente, las tres condiciones siguientes:

- Su continuidad eléctrica debe ser tal que no resulte afectada por deterioros mecánicos, químicos o electroquímicos.
- Su conductibilidad debe ser, como mínimo, igual a la que resulta por la aplicación del presente apartado.
- Deben permitir la conexión de otros conductores de protección en toda derivación predeterminada.

### **2.3 Identificación de los conductores eléctricos.**

Los conductores de la instalación deben ser fácilmente identificados, especialmente por lo que respecta al conductor neutro y al conductor de protección. Esta identificación se realizará por los colores que presenten sus aislamientos o por inscripciones sobre el mismo, cuando se utilicen aislamientos no susceptibles de coloración. El conductor neutro se identificará por el color azul claro y el conductor de protección por el doble color amarillo-verde. Los conductores de fase se identificarán por los colores marrón, negro. Cuando se considere necesario identificar tres fases diferentes, podrá utilizarse el color gris para la tercera.

### **2.4 Aparatos de protección, mando y maniobra.**

Estarán contruidos con materiales adecuados no inflamables y convenientemente dotados de los mecanismos de control necesarios por exigencia de su aplicación.

Su envolvente se ajustará a las Normas UNE que le son de aplicación, con un grado de protección IP30 e IK07. La envolvente para el Interruptor de Control de Potencia (ICP) será homologado oficialmente, de tipo precintable y de dimensiones aprobadas por la compañía suministradora de energía eléctrica, acorde a lo estipulado en la ITC-BT-17 del REBT. Dispondrá de los dispositivos generales e individuales de mando y protección y como mínimo:

- Un interruptor general automático de corte omnipolar de accionamiento manual dotado de elementos de protección frente a sobrecargas y cortocircuitos, siendo independiente del interruptor de control de potencia.
- Un interruptor diferencial general para protección contra contactos indirectos de todos los circuitos.
- Dispositivos de corte omnipolar para protección de sobrecargas y cortocircuitos por cada circuito interior del local, Industria o vivienda del usuario.
- Dispositivos de protección contra sobretensiones según ITC-BT-23 del REBT, si fuera necesario.

## **2.5 Instalación termoresistencia.**

La longitud de inmersión debe ser lo suficientemente largo para que el sensor este en equilibrio térmico con el medio a medir, para líquidos un mínimo de 8 veces el diámetro del sensor.

Evitar Vibraciones y choques mecánicos.

Conexión a 3 o 4 hilos para evitar errores de medida debidos a la compensación de la resistencia utilizado en la conexión con el equipo de medida, en el caso de conexiones a dos hilos aumenta el error con la longitud de cable utilizado.

Respetar los códigos de colores de las conexiones, aunque las termoresistencia no tienen polaridad es necesario respetar las conexiones.

Grandes longitudes de cable, En caso de conexiones a 2 hilos no se recomienda superar una resistencia de 1 Ohm En el caso de conexiones a 3 o 4 hilos se puede llegar a longitudes de 1Km siempre y cuando no superemos una resistencia máxima de 15 Ohm, siempre dependiendo del método de medida del visualizador.

Para mayores longitudes se pueden utilizar convertidor de señal 4-20 mA.

Se deben tener ciertas precauciones de limpieza y protección en la instalación de los Pt100 para prevenir errores por fugas de corriente. En general, no se debe montar un Pt100 en lugares sometidos a mucha vibración, pues es probable que se fracture. Además, es frecuente que cables en ambientes muy húmedos se deterioren y se produzca un paso de corriente entre ellos a través de humedad condensada. Aunque mínima, esta corriente "fugada" hará aparecer en el lector una temperatura menor que la real. Estas fugas también pueden ocurrir en óxido, humedad o polvo que cubre los terminales.

## 2.6 Requisitos ordenador aplicación LabView.

Queda especificado en <http://www.ni.com/labview/requirements/esa/>

Windows		
	Run-Time Engine	Entorno de Desarrollo
Procesador	Pentium III/Celeron 866 MHz o equivalente	Pentium 4/M o equivalente
RAM	256 MB	1 GB
Resolución de Pantalla	1024 x 768 píxeles	1024 x 768 píxeles
Sistema Operativo	Windows 8.1/8/7/Vista (32 bits y 64 bits) Windows XP SP3 (32 bits) Windows Server 2003 R2 (32 bits) Windows Server 2008 R2 (64 bits)	Windows 8.1/8/7/Vista (32 bits y 64 bits) Windows XP SP3 (32 bits) Windows Server 2003 R2 (32 bits) Windows Server 2008 R2 (64 bits)
Espacio en Disco	407 MB	3.5 GB (Incluye controladores predeterminados del DVD de Controladores de Dispositivos de NI)
Mac OS X		
	Run-Time Engine	Entorno de Desarrollo
Procesador	Procesador basado en Intel	Procesador basado en Intel
RAM	256 MB	1 GB
Resolución de Pantalla	1024 x 768 píxeles	1024 x 768 píxeles
Sistema Operativo	Mac OS X 10.5, 10.6, 10.7, 10.8 o 10.9	Mac OS X 10.7, 10.8 o 10.9
Espacio en Disco	656 MB - 1.2 GB	1.2 GB para la instalación completa (excluyendo controladores)
Linux		
	Run-Time Engine	Entorno de Desarrollo
Procesador	Pentium III/Celeron 866 MHz o equivalente	Pentium 4/M o equivalente
RAM	256 MB	1 GB
Resolución de Pantalla	1024 x 768 píxeles	1024 x 768 píxeles
Sistema Operativo	Linux kernel 2.2x, 2.4x, 2.6x o 3.x y GNU C Library (glibc) Versión 2.4.4 o posterior para la arquitectura Intel x86  <i>La Guía de Instalación de LabVIEW omite de un modo incorrecto Linux kernel 3.x de esta lista.</i>	Red Hat Enterprise Linux Desktop + Workstation 5 o posterior, open SUSE 12.1 o posterior o Scientific Linux 6 o posterior.
Espacio en Disco	115 MB	1.1 GB para la instalación completa (excluyendo controladores).

## **2.7 Mantenimiento equipos y actualizaciones aplicación.**

Una vez puesto en marcha el desarrollo no precisa mantenimiento. En caso de avería de cualquier equipo eléctrico fuera del periodo de garantía se asumirá el gasto de la reparación.

Las actualizaciones de la aplicación constituirán un nuevo desarrollo.

### 3 PRESUPUESTO.

#### 3.1 Honorarios.

CONCEPTO Laboral	HORAS Trabajo	COSTE/HORA Euros sin IVA	TOTAL Coste base
Mecanizado caja	5	35	175 €
Cableado y montaje	2	35	70 €
Toma datos temporales proceso	16	35	560 €
Modelizar proceso	12	50	600 €
Diseño PID	24	50	1.200 €
Simular PID	8	50	400 €
Desarrollo aplicación LabView	40	50	2.000 €
Redactar proyecto	64	35	2.240 €

#### 3.2 Material.

CONCEPTO Referencia Fabricante	UNIDADES	PRECIO/UNIDAD Euros sin IVA	TOTAL Coste base
Caja Eléctrica pared RS-Amidata 775-5827	1	126,50	126,10 €
Carril montaje DIN Tyco Electronics 7-1437685-6	2	17,40	34,80 €
Soporte montaje carril DIN National Instruments NI 9915	1	28,70	28,70 €
CompactRIO Ethernet 8 ranuras National Instruments NI c-RIO 9074	1	885,00	885,00 €
Modulo salida analógica 4 canales 100 KS/s, 16 bits, 0-20 mA National Instruments NI 9265	2	450,12	900,24 €
Módulo entrada analógica 24 bits 4 canales 100 Ohmios RTD National Instruments NI 9217	2	495,00	990 €
Relé estado sólido carril DIN 240V AC 25 A control 4-20mA ENDA ERCA1-225PA	8	55,00	440 €
Sensor PT100 Reckman R14-1B2-4/50T2000 RS-Amidata 370-8555	8	23,48	187,84 €

### 3.3 Condiciones de pago.

CONCEPTO	COSTE BASE	TOTAL NETO
Honorarios	<b>7.245,00 €</b>	<b>8.766,45 €</b>
Material	<b>3.592,68 €</b>	<b>4.347,15 €</b>
IVA 21%	<b>2.275,92 €</b>	
Presupuesto Neto		<b>13.113,60 €</b>

FORMA DE PAGO	PRESUPUESTO	IMPORTE
Firma contrato	<b>20%</b>	<b>2.622,72 €</b>
Compra material	<b>40%</b>	<b>5.245,44 €</b>
Puesta en marcha	<b>20%</b>	<b>2.622,72 €</b>
Entrega aplicación	<b>20%</b>	<b>2.622,72 €</b>

# 4 CODIGO.

## 4.1 Matlab.

### 4.1.1 Identificación sistema de primer orden (calentamiento).

```
datos=load('DATOS_TEMPORALES_CALENTAMIENTO.txt');
tiempo=datos(:,1);
potencia=datos(:,2);
temperatura=datos(:,3);
nMuestras=size(temperatura,1);
figure(1)
title('Datos experimentales')
subplot(2,1,1)
plot(potencia,'r','linewidth',2)
title('potencia')
axis([0,3500,-10,60])
subplot(2,1,2)
plot(temperatura,'b','linewidth',2)
title('temperatura')
axis([0,3500,10,100])
instante=1;
while(potencia(instante)==potencia(instante+1))
    instante=instante+1;
end
disp('El escalón se aplica en el instante:')
instanteEscalon=instante
%% Identificación del sistema con un modelo de 1er orden en el que solo hay que
calcular la ganancia y la constante de tiempo
cteTiempo=0.63*(temperatura(nMuestras)-temperatura(instanteEscalon));
while temperatura(instante)<(cteTiempo+temperatura(instanteEscalon))
    instante=instante+1;
end
disp('Parámetros del sistema:')
cteTiempo=instante-instanteEscalon
amplitudEscalon=(potencia(nMuestras)-potencia(instanteEscalon));
ganancia=(temperatura(nMuestras)-temperatura(instanteEscalon))/amplitudEscalon
modelo=tf(ganancia,[cteTiempo,1])
% la función setpDataOptions solo está disponible para Matlab 2013b
opciones = stepDataOptions('InputOffset',0,'StepAmplitude',amplitudEscalon);
[y,t] = step(modelo,opciones);
El escalón se aplica en el instante:
InstanteEscalon = 122
Parámetros del sistema:
cteTiempo = 1115
ganancia = 1.2893
Transfer function:
    1.289
-----
1115 s + 1
% con esta figura se comprueba que la respuesta no coincide con un modelo
% de primer orden
figure(2)
hold off
plot(t,y+temperatura(instanteEscalon))
hold on
plot([0:(nMuestras-instanteEscalon)],temperatura(instanteEscalon:nMuestras),'r')
title('Primer orden')
```

## 4.1.2 Identificación sistema de primer orden con retardo (calentamiento).

```
datos=load('DATOS_TEMPORALES_CALENTAMIENTO.txt');
tiempo=datos(:,1);
potencia=datos(:,2);
temperatura=datos(:,3);
nMuestras=size(temperatura,1);
figure(1)
title('Datos experimentales')
subplot(2,1,1)
plot(potencia,'r','linewidth',2)
title('potencia')
axis([0,3500,-10,60])
subplot(2,1,2)
plot(temperatura,'b','linewidth',2)
title('temperatura')
axis([0,3500,10,100])
instante=1;
while(potencia(instante)==potencia(instante+1))
    instante=instante+1;
end
disp('El escalón se aplica en el instante:')
instanteEscalon=instante
%% Identificación de un modelo de primer orden con retardo
% La ganancia es la misma que para la del primer orden.
% Queda por calcular el retardo y la nueva constante de tiempo.
cteTiempo=0.63*(temperatura(nMuestras)-temperatura(instanteEscalon));
while temperatura(instante)<(cteTiempo+temperatura(instanteEscalon))
    instante=instante+1;
end
disp('Parámetros del sistema:')
cteTiempo=instante-instanteEscalon
amplitudEscalon=(potencia(nMuestras)-potencia(instanteEscalon));
ganancia=(temperatura(nMuestras)-temperatura(instanteEscalon))/amplitudEscalon
% El número 1,6 corresponde al instante de muestreo en que la temperatura
% es 1,6°C mayor que en el instante Escalón. Por prueba y error se ajusta
% el posible retardo
instante=instanteEscalon;
while temperatura(instante)<(temperatura(instanteEscalon)+1.6)
    instante=instante+1;
end
retardo=instante-instanteEscalon
cteTiempo=cteTiempo-retardo
modelo=tf(ganancia,[cteTiempo,1])

El escalón se aplica en el instante:
instanteEscalon = 122
Parámetros del sistema:
cteTiempo = 1115
ganancia = 1.2893
retardo = 117
cteTiempo = 998
modelo =

    1.289
-----
    998 s + 1

% la función setpDataOptions solo esta disponible para Matlab 2013b
opciones = stepDataOptions('StepAmplitude',amplitudEscalon);
[y,t] = step(modelo,opciones);
figure(2)
hold off
plot(t+retardo,y+temperatura(instanteEscalon),'linewidth',2)
```

```

hold on
plot([0:(nMuestras-
instanteEscalon)],temperatura(instanteEscalon:nMuestras),'r','linewidth',2)
title('Primer orden con retardo')

```

### 4.1.3 Identificación sistema de segundo orden (calentamiento).

```

clc
clear all
close all
% El calentamiento se inicia al aplicarse un escalón de potencia.
datos=load('DATOS_TEMPORALES_CALENTAMIENTO.txt');
tiempo=datos(:,1);
potencia=datos(:,2);
temperatura=datos(:,3);
nMuestras=size(temperatura,1);
figure(1)
subplot(2,1,1)
plot(potencia,'linewidth',2)
grid on
axis([-100 4000 0 60]);
title('Datos experimentales Acción de Control. ');
xlabel('Muestras. (Se toma una muestra cada segundo)');
ylabel('% Potencia. ( 0 % -> 0 mA)');
subplot(2,1,2)
plot(temperatura,'linewidth',2)
grid on;
axis([-100 4000 15 95]);
title('Datos experimentales Temperatura Planta. ');
xlabel('Muestras. (Se toma una muestra cada segundo)');
ylabel('Temperatura Planta');
instante=1;
while(potencia(instante)==potencia(instante+1))
    instante=instante+1;
end
disp('El escalon se aplica en el instante:')
instanteEscalon=instante;
% Identificación de un modelo de segundo orden con retardo
% La ganancia es la misma que para la del primer orden.
% Queda por calcular la nueva constante de tiempo.
amplitudEscalon=(potencia(nMuestras)-potencia(instanteEscalon));
ganancia=(temperatura(nMuestras)-temperatura(instanteEscalon))/amplitudEscalon;
instante=instanteEscalon;
t72=0.72*(temperatura(nMuestras)-temperatura(instanteEscalon));
while temperatura(instante)<t72
    instante=instante+1;
end
t72=instante-instanteEscalon;
L=-612; %Este valor está calculado con prueba y error hasta que le respuesta
%del modelo se ha ajustado completamente a la respuesta real del proceso
Ti=0.8*(t72-L);
tz=0.4*t72+0.6*L;
yz=temperatura(instanteEscalon+round(tz));
Yz_YKA=yz/temperatura(nMuestras);
% con el valor que sale de la division se busca en la tabla de la figura
% 5.13 de las transparencias de Identificación de procesos y la z tiene
% este valor
z=0.66;
tau72=1.258;
Ti=(t72-L)/tau72;
T1=z*Ti
T2=Ti-T1

```

```

syms s
modelo=tf(ganancia,sym2poly((T1*s+1)*(T2*s+1)))
opciones = stepDataOptions('StepAmplitude',amplitudEscalon);
[y,t] = step(modelo,opciones);
figure(2)
hold off
plot(t,y+temperatura(instanteEscalon),'linewidth',2)
hold on
plot(0:(nMuestras-
instanteEscalon),temperatura(instanteEscalon:nMuestras),'r','linewidth',2)
grid on;
axis([-100 4000 15 95]);
title('Respuesta Escalon entrada. Sistema 2° Orden Sobreamortiguado');
xlabel('Muestras. (Se toma una muestra cada segundo)');
ylabel('Temperatura Planta');
El escalón se aplica en el instante:
T1 = 643.7361
T2 = 331.6216
modelo =
      1.289
-----
2.135e05 s^2 + 975.4 s + 1

```

#### 4.1.4 Identificación sistema de primer orden (enfriamiento).

```

clc
clear all
close all
% El enfriamiento se inicia por dejar de aplicarse el escalón de potencia.
% Con matemáticas es como aplicar un escalón negativo al nivel potencia
% aplicado hasta dicho momento del inicio enfriamiento.
datos=load('DATOS_TEMPORALES_CALENTAMIENTO.txt');
tiempo=datos(:,1);
potencia=datos(:,2);
temperatura=datos(:,3);
nMuestras=size(temperatura,1);
instante=1;
while(potencia(instante)==potencia(instante+1))
    instante=instante+1;
end
disp('El escalon se aplica en el instante:')
instanteEscalon=instante
disp('Escalón aplicado para el enfriamiento:')
amplitudEscalon=-(potencia(nMuestras)-potencia(instanteEscalon))
datos=load('datosEnfriamientop.txt');
tiempo=datos(:,1);
potencia=datos(:,2);
temperatura=datos(:,3);
nMuestras=size(temperatura,1);
figure(1)
subplot(2,1,1)
plot(potencia,'linewidth',2)
grid on
title('Datos experimentales Acción de Control. ');
xlabel('Muestras. (Se toma una muestra cada segundo)');
ylabel('% Potencia. ( 0% -> 0 mA)');
subplot(2,1,2)
plot(temperatura,'linewidth',2)
grid on
title('Datos experimentales Temperatura Planta. ');
xlabel('Muestras. (Se toma una muestra cada segundo)');
ylabel('Temperatura °C. ');

```

```

% Identificación sistema. El sistema pierde temperatura de forma natural.
% Por ello es un sistema de 1ª orden.
% Hay que calcular la ganancia y la constante de tiempo.
cteTiempo=0.367*(temperatura(1)-temperatura(nMuestras))+temperatura(nMuestras);
instante=1
while ((temperatura(instante))>cteTiempo)
    instante=instante+1;
end
disp('Parámetros del sistema:')
cteTiempo=instante
ganancia=(temperatura(nMuestras)-temperatura(1))/amplitudEscalon
disp('Modelo experimental enfriamiento:')
modelo=tf(ganancia,[cteTiempo,1])
opciones = stepDataOptions('InputOffset',-
amplitudEscalon,'StepAmplitude',amplitudEscalon);
[y,t] = step(modelo,opciones);
% Comprobación modelo experimental corresponde a la respuesta temporal.
figure(2)
hold off
plot(t,y+temperatura(nMuestras),'linewidth',2)
hold on
plot(0:(nMuestras-
instanteEscalon),temperatura(instanteEscalon:nMuestras),'r','linewidth',2)
title('Respuesta Escalón Enfriamiento. Sistema 1ª Orden.')
xlabel('Muestras. (Se toma una muestra cada segundo)');
ylabel('Temperatura °C');
grid on
axis([-2000,16000,15,92]);
El escalon se aplica en el instante:
instanteEscalon = 122
Escalón aplicado para el enfriamiento:
amplitudEscalon = -50
instante = 1
Parámetros del sistema:
cteTiempo = 2262
ganancia = 1.2866
Modelo experimental enfriamiento:
modelo =

    1.287
-----
2262 s + 1

```

## 4.2 Monitorización y sensorizado proceso.

### 4.2.1 Proyecto LabView. Archivo lvproj.

Los proyectos son usados para agrupar archivos usados por LabView. Al crear un proyecto se crea un archivo con la extensión (.lvproj). Es necesario utilizar los proyectos para crear aplicaciones, librerías compartidas o cualquier documento que se vaya a utilizar. También debe utilizar un proyecto para trabajar con una plataforma en tiempo real, programar la FPGA del dispositivo, archivos bases datos, etc.

Los pasos para la creación de un proyecto son:

1º. Abrir proyecto en blanco.

Create Project – Blank Project – File Save As – P1.vproj

2º. Añadir al proyecto códigos VI. Seleccionar en el árbol del proyecto My Computer.

My Computer – Add – File - \*.vi

3°. Al proyecto se le puede añadir otros ficheros como por ejemplo Hojas de Calculo

My Computer – Add – File - \*.exl

4°. También se puede añadir al proyecto recursos hardware.

Project: P1.vproj – New – Targets and Devices – Real Time CompactRIO – NI-cRIO9074-01948719

5°. En este caso el hardware permite mantener en memoria también ficheros

NI-cRIO9074-01948719 – Add – File - \*.vi (códigos VI)

NI-cRIO9074-01948719 – Add – File - \*.xls (hojas calculo)

6°. File - Save

7°. Para añadir Entradas/Salidas a un programa VI seleccionamos el objeto de E/S en el proyecto (el puerto del módulo deseado) y lo arrastramos al diagrama de bloques de su VI, esto crea una “variable compartida” (variable global). Esta variable se puede cablear como cualquier icono del diagrama de bloques. File – Save. Al pulsar el botón RUM se inicia la compilación del VI que se ejecutará y guardará en el compactRIO.

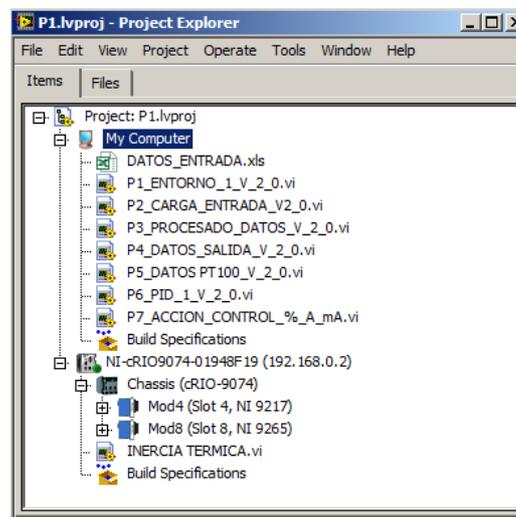


Figura 49. Ventana explorador proyecto.

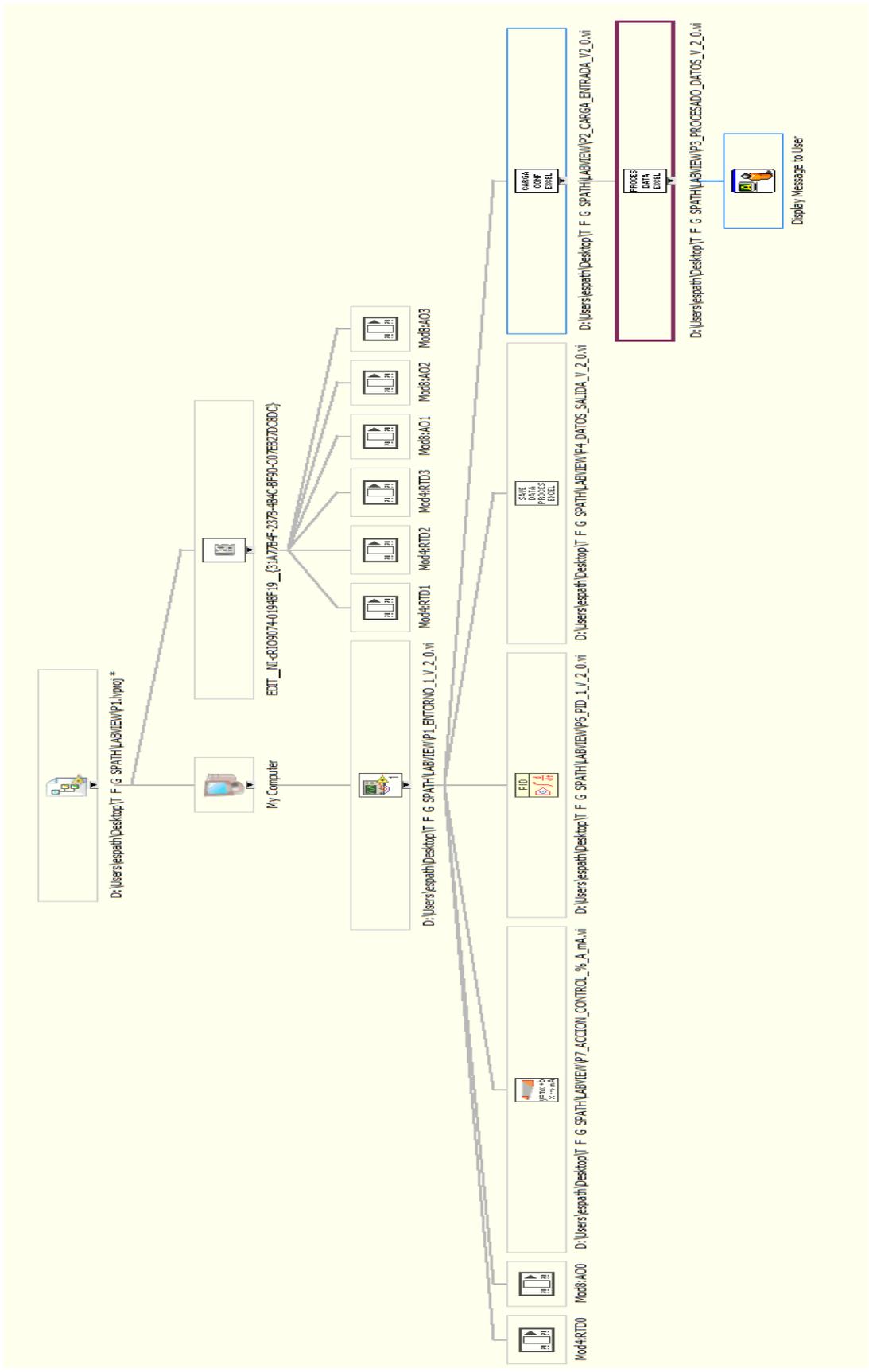


Figura 50. Jerarquías de las VI y subVi utilizadas en la aplicación.

# Código LabView.

## 4.2.2 P1\_ENTORNO\_V2\_0.VI.

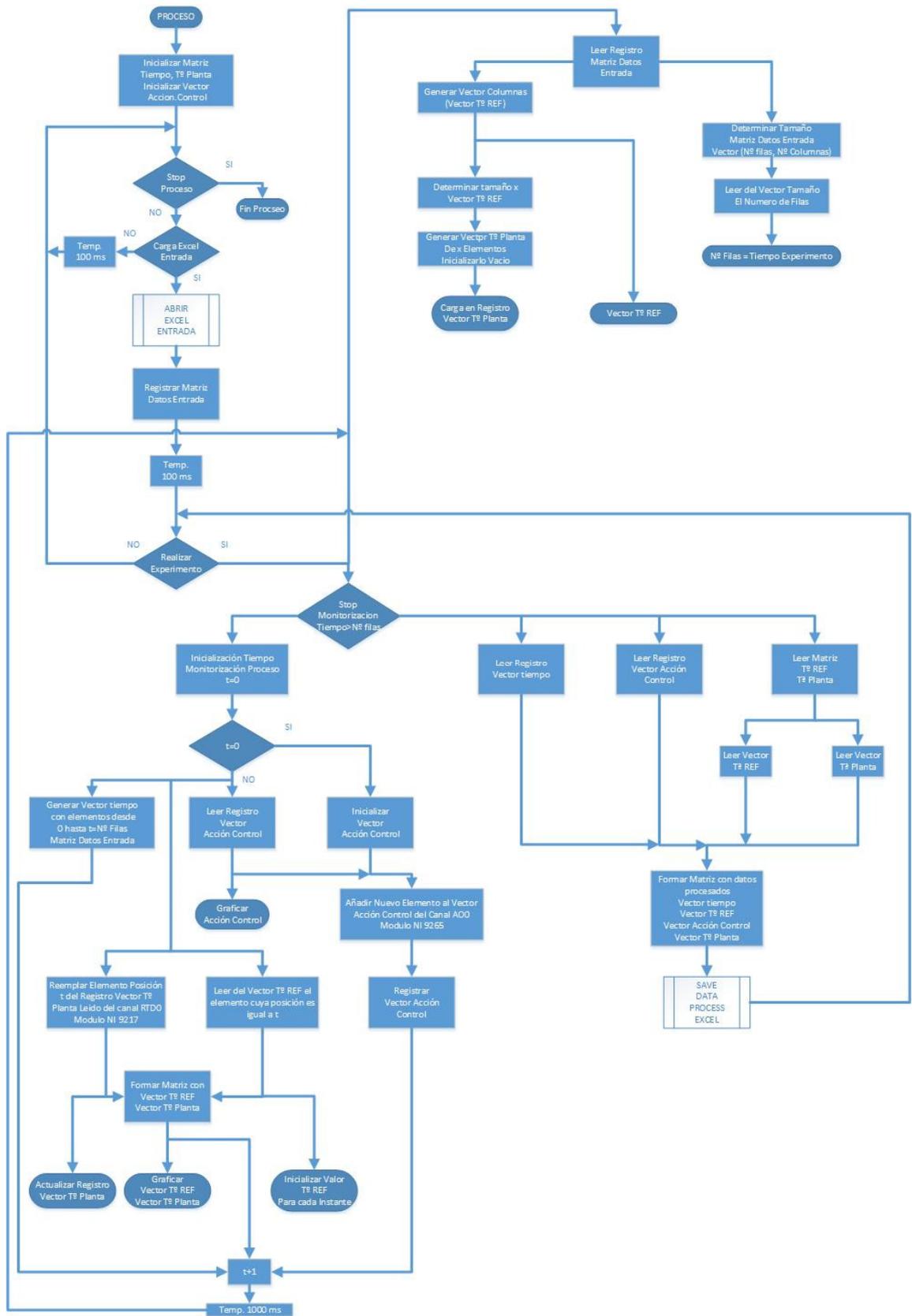


Figura 51. Flujo Diagrama Bloques P1\_ENTORNO\_V2\_0.VI.

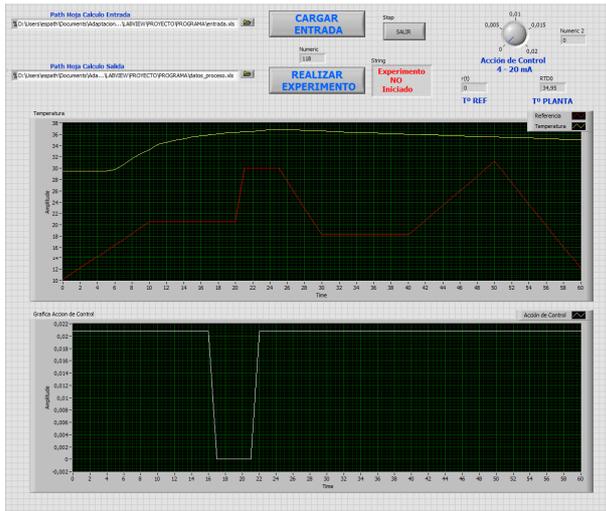


Figura 52. Panel Frontal P1\_ENTORNO\_V2\_0.VI.

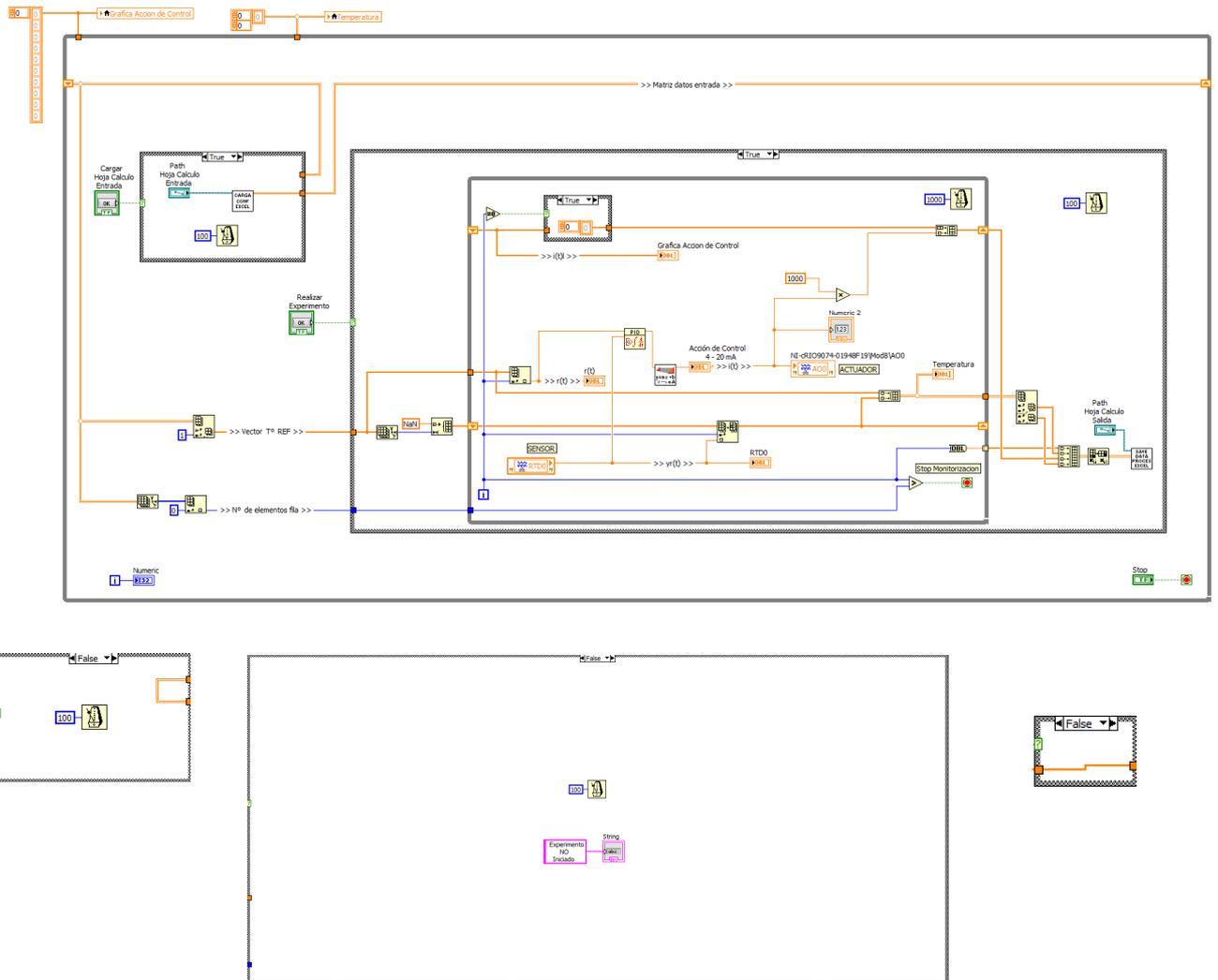


Figura 53. Diagrama Bloques P1\_ENTORNO\_V2\_0.VI.

### 4.2.3 P2\_CARGA\_ENTRADA\_V2\_0.VI.



Figura 54. Flujo Diagrama Bloques P2\_CARGA\_ENTRADA\_V2\_0.VI.

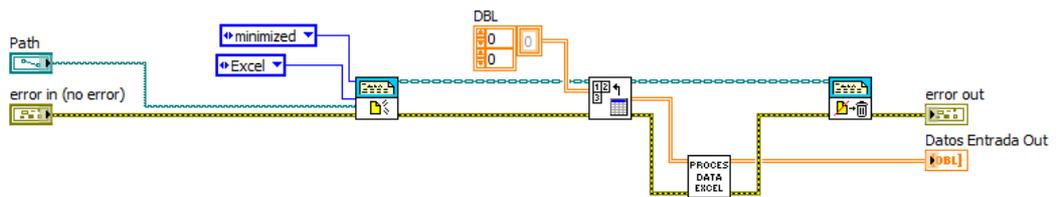


Figura 55. Diagrama Bloques P2\_CARGA\_ENTRADA\_V2\_0.VI.

#### 4.2.4 P3\_PROCESADO\_DATOS\_V2\_0.VI.

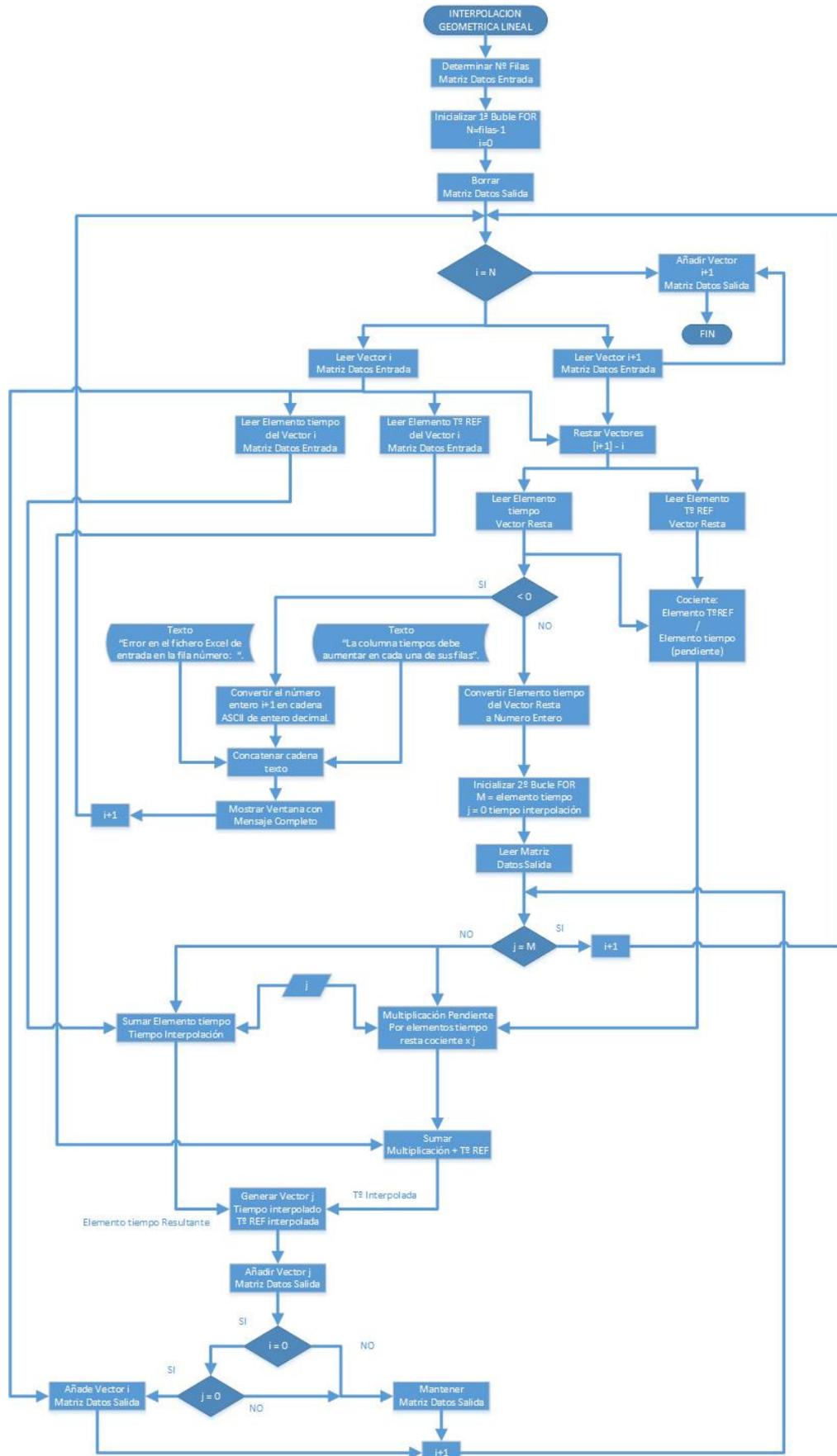


Figura 56. Flujo Diagrama Bloques P3\_PROCESADO\_DATOS\_V2\_0.VI.

$$y = m * x + b$$

$$m = \text{pendiente} = \text{tg } \alpha = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

$$x = x_1 + (x - x_1) \text{ tiempo interpolación}$$

$$\text{tg } \alpha = \frac{y - y_1}{x - x_1} ; y = (x - x_1) * \text{tg } \alpha + y_1 = m * (x - x_1) + y_1$$

$$y = m * (x - x_1) + y_1 ; T^{\circ} \text{ REF interpolación}$$

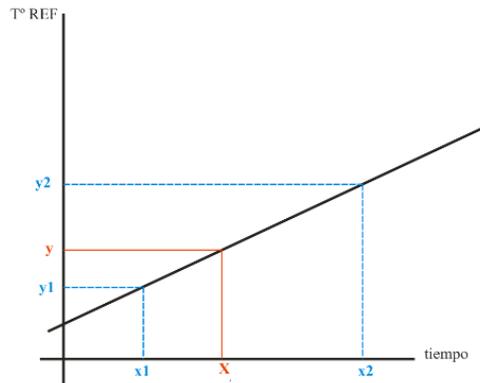


Figura 57. Ecuación de la recta no pasa por origen.

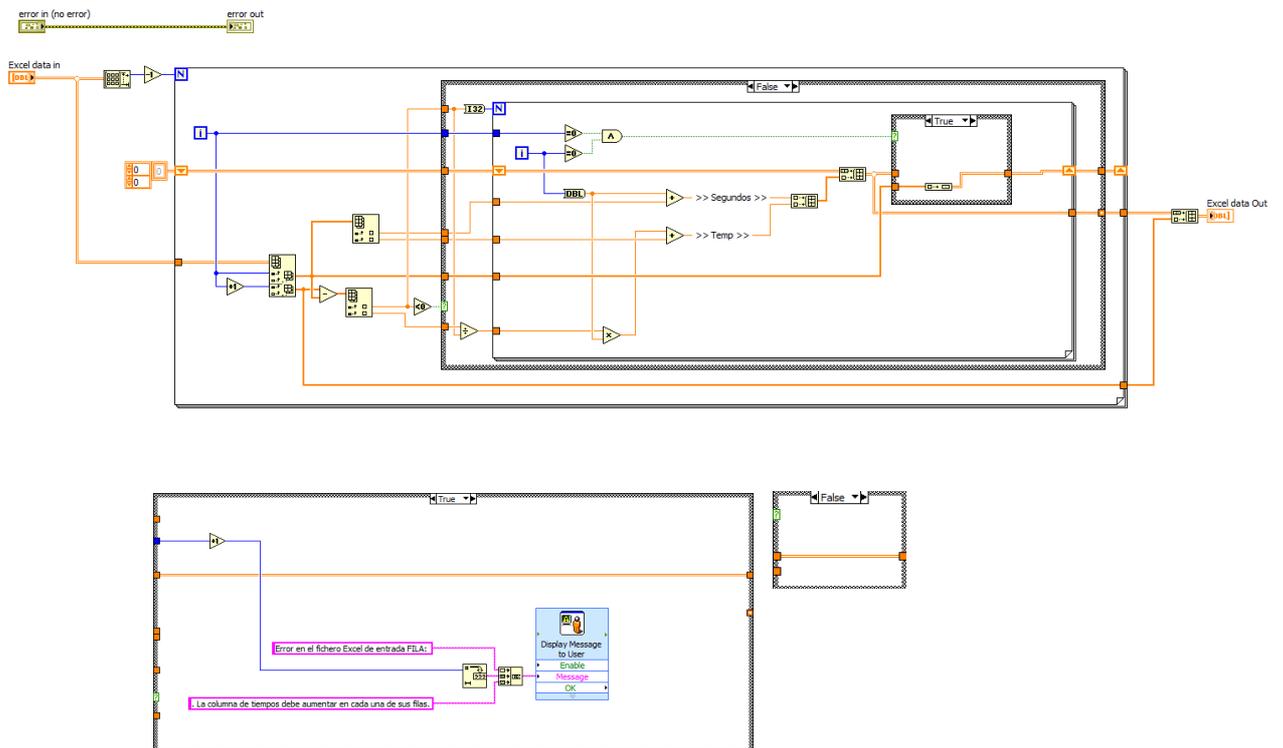


Figura 58. Diagrama Bloques P3\_PROCESADO\_DATOS\_V2\_0.VI.

## 4.2.5 P4\_DATOS\_SALIDA\_V2\_0.VI.

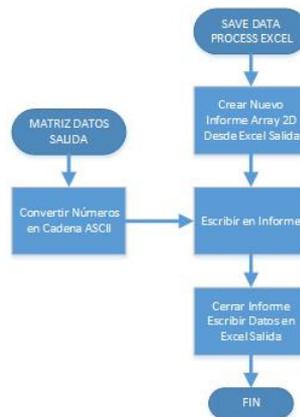


Figura 59. Flujo Diagrama Bloques P4\_DATOS\_SALIDA\_V2\_0.VI

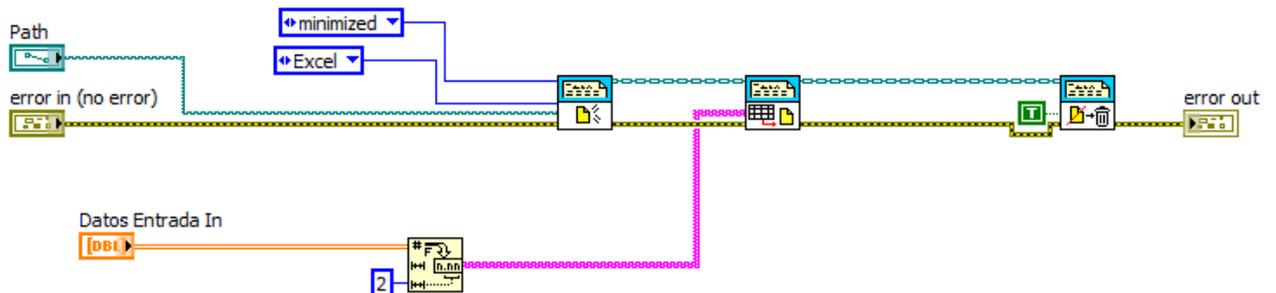


Figura 60. Diagrama Bloques P4\_DATOS\_SALIDA\_V2\_0.VI.

## 4.2.6 P6\_PID\_V2\_0.VI.

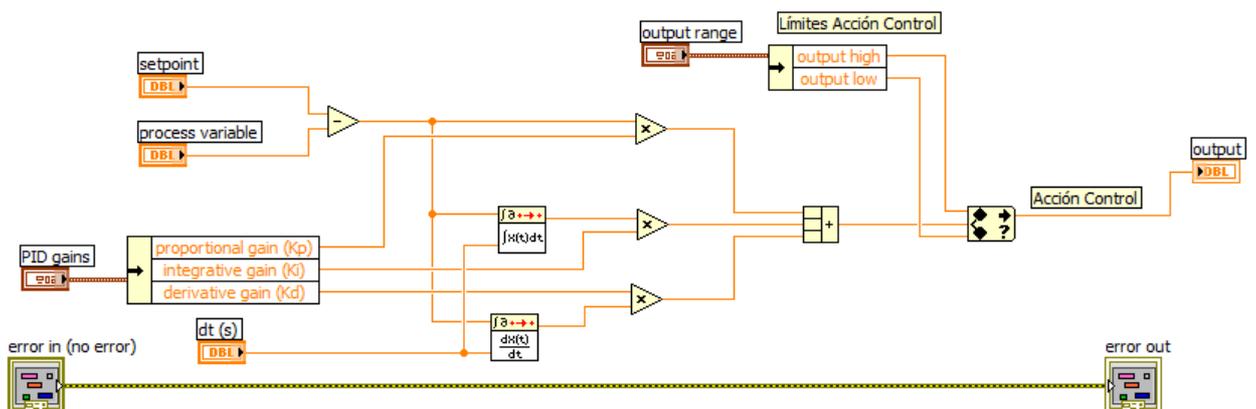


Figura 61. Diagrama Bloques P6\_PID\_V2\_0.VI.

#### 4.2.7 P7\_ACCION\_CONTROL\_%\_mA\_V2\_0.VI

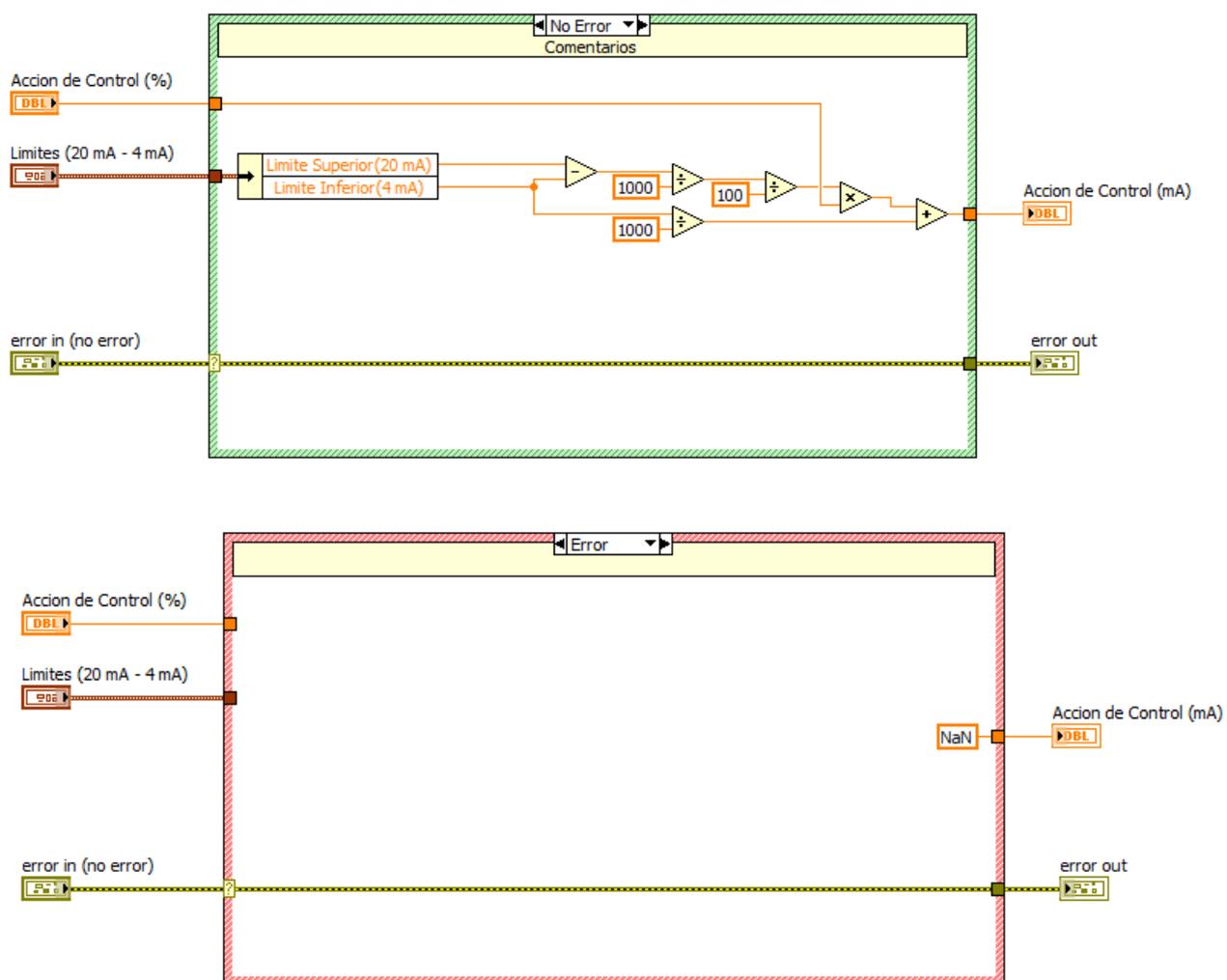


Figura 62. Diagrama Bloques P6\_PID\_V2\_0.VI.

## 5 ANEXOS.

### 5.1 Manuales equipos.

Controlador NI c-RIO 9072/3/4. <http://www.ni.com/pdf/manuals/374639e.pdf>

Módulo NI 9217. <http://www.ni.com/pdf/manuals/374187c.pdf>

Módulo NI 9265. <http://www.ni.com/pdf/manuals/374067e.pdf>

Actuador ENDA ERCA1-225PA. <http://www.enda.com.tr/ENG/Downloads/Default.aspx>

Sensor PT100. <http://es.rs-online.com/web/b/reckmann/>

### 5.2 Bibliografía.

Apuntes y practicas asignatura Automática Básica UPV Escuela Diseño.

Sistemas de medida y regulación. Autor: Jose A. Navarro Márquez.

Ejercicios resueltos de medida y regulación. Autor: Jose A. Navarro Márquez.

LabView PID Universidad Politécnica Cataluña.

Apuntes asignatura Instrumentación Avanzada UPV Campus Gandia.

LabView Core 1 National Instruments.

LabView Core 2 National Instruments.

LabView Core 3 National Instruments.