



**UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE INGENIERÍAS

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del título de:

INGENIERO ELECTRÓNICO MENCIÓN EN SISTEMAS INDUSTRIALES

TEMA:

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MÓDULO ORIENTADO AL
DESARROLLO DE PRÁCTICAS PARA LA MATERIA DE CONTROL
AUTOMÁTICO BAJO LA PLATAFORMA DE MATLAB”**

PRESENTADA POR:

**EDGAR ANTONIO JURADO VALENCIA
GONZALO XAVIER SALAS BOHORQUEZ**

GUAYAQUIL-ECUADOR

2011

AGRADECIMIENTO:

A Dios, por traernos hasta este momento de nuestras vidas, donde un gran sueño se ve cumplir.

A nuestros padres por todo su esfuerzo, amor y apoyo de manera incondicional, durante nuestra formación tanto personal como profesional.

A nuestros docentes, por brindarnos su guía y sabiduría en el desarrollo de este trabajo.

Agradecimientos especiales al Ingeniero Juan del Pozo docente de la Escuela Superior Politécnica del Litoral por su ayuda en el desarrollo de las prácticas y de este proyecto.

DEDICATORIA

A mi madre, mis hermanos y mis tías.

Edgar Jurado

A mis Padres por haberme traído hasta este momento y a la Ingeniera Adela Santana por toda su ayuda y paciencia a lo largo de estos años.

Xavier Salas

RESUMEN

El diseño y construcción de estos módulos se basa en aplicaciones específicas de control. Los casos que tendremos son los siguientes: control de nivel de un tanque y control de temperatura de un líquido en un sistema de recirculación.

El objetivo de los mismos es ayudar a estudiantes a entender cómo trabajan dos diferentes sistemas de control desde la plataforma Simulink del software Matlab. Se ha procurado que cada uno de estos módulos sea diferente del otro para poder observar diferentes aplicaciones.

El módulo 1 está conformado por el sistema que controla el nivel de líquido en un tanque y el módulo 2 está conformado por el sistema que controla la temperatura.

Los diseños de los controladores se realizan en un computador con la respectiva instalación del software Matlab. El programa Matlab es un entorno de computación y desarrollo de aplicaciones totalmente integrado, orientado para el desarrollo de proyectos con elevados cálculos matemáticos. Matlab integra análisis numérico, cálculo matricial, procesamiento de señales, todo ello en un entorno fácil para el usuario.

Se complementan estos módulos con un amplio análisis que se desarrolla con experimentos y pruebas, que tendrán la finalidad de crear un apropiado sistema de prácticas para el estudiante que cursa la materia de control automático.

INDICE

Pag.

Capítulo I – Conceptos Teóricos	5
1. Control Automático.....	5
1.1 Función del Control Automático	6
1.2 Clasificación de los Sistemas de Control.....	7
1.3 Ajuste de control mediante Métodos Clásicos.....	12
1.4 Tipos de Respuesta del Controlador	15
1.4.1 Control ON-OFF	15
1.4.2 Control Proporcional	16
1.4.2.1 Acción Proporcional	17
1.4.2.2 Análisis Estático	18
1.4.3 Acción Integral.....	19
1.4.4 Acción Derivativa	22
1.5 Introducción al Controlador PID	24
2. Medición de Nivel.....	31
2.1 Introducción a la Medición de Nivel	31
2.2 Tipos de Medidores de Nivel para Líquidos.....	31
3. Medición de Temperatura	42
3.1 Introducción a la Medición de Temperatura.....	42
3.2 Tipos de Medidores de Temperatura	42

Capítulo II – Descripción de los Módulos.....	46
1. Módulo de Control de Nivel	46
1.1 Tanque	49
1.2 Bomba.....	50
1.3 Válvula Solenoide.....	50
1.4 Transmisor de Presión	51
1.5 Tuberías y Accesorios.....	51
2. Módulo de Control de Temperatura.....	53
2.1 Tanques.....	55
2.2 Bomba.....	56
2.3 Agitador	57
2.4 Válvulas Solenoides.....	57
2.5 Sensor Inductivo	58
2.6 Tacómetro	59
2.7 Enfriador	59
2.8 Resistencia Eléctrica.....	60
2.9 Tuberías y Accesorios.....	60
3. Sistema de Control	61
3.1 Introducción al Matlab.....	61
3.1.1 Entorno en Tiempo Real con Matlab	61
3.1.2 Real Time Windows Target	61
3.1.3 Kernel	62
3.1.4 Simulink	63
3.1.5 Características del PC.....	65
3.2 Tarjeta de Interfaz	65
3.2.1 Descripción de Placa de Adquisición de Datos NI PCI-6024E.....	67
3.2.2 Conexión Entrada/Salida.....	68

Capítulo III – Identificación de los Módulos de Control de Nivel y Temperatura	70
1. Introducción a la Identificación de Sistemas	70
2. Adquisición de Datos	71
2.1 Tiempo de Respuesta de Módulo de Control de Nivel.....	75
2.2 Tiempo de Respuesta de Módulo de Control de temperatura.....	77
3. Uso de la Herramienta “ <i>Identification Tool</i> ”	80
3.1 Aplicación de herramienta “ <i>Identification Tool</i> ” en módulo control nivel .	81
3.2 Aplicación de herramienta “ <i>Identification Tool</i> ” en módulo control Temperatura.....	84
 Capítulo IV – Diseño de control y Simulación de Módulos	87
1. Instalación de Herramienta Real Time Windows Target	87
2. Diseño de Controladores de Módulos.....	100
2.1 Diseño de Control de Módulo de Nivel.....	101
2.2 Diseño de Control de Módulo de temperatura.....	103
3. Simulación de Sistemas de Control en Módulos	107
3. 1 Simulación de control en módulo control Nivel.....	108
3.2 Simulación de control en módulo control Temperatura	109
 Capítulo V – Desarrollo de Prácticas.....	110
1. Práctica # 1 – Identificación de los Módulos.....	111
2. Práctica # 2 – Introducción a Matlab y Simulink	123
3. Práctica # 3 – Identificación de Sistemas	128
4. Práctica # 4 – Identificación de Sistemas en Control de Nivel.....	136

5. Práctica # 5 – Identificación de Sistemas en Control de Temperatura	141
6. Práctica # 6 – Selección de Sistemas de Control	147
7. Práctica # 7 – Selección de Control en Módulo de Temperatura ...	164
CONCLUSIONES	171
RECOMENDACIONES.....	172
BIBLIOGRAFIA	173
ANEXOS	174

CAPITULO # I

CONCEPTOS TEORICOS

1. CONTROL AUTOMÁTICO

El control automático de procesos es parte del progreso industrial desarrollado durante lo que ahora se conoce como la segunda revolución industrial. El uso intensivo de la ciencia de control automático es producto de una evolución que es consecuencia del uso difundido de las técnicas de medición y control. Su estudio intensivo ha contribuido al reconocimiento universal de sus ventajas.

El control automático de procesos se usa fundamentalmente porque reduce el costo de los procesos industriales, lo que compensa con creces la inversión en equipo de control. Además hay muchas ganancias intangibles, como por ejemplo la eliminación de mano de obra pasiva, la cual provoca una demanda equivalente de trabajo especializado. La eliminación de errores es otra contribución positiva del uso del control automático.

El principio del control automático o sea el empleo de una realimentación o medición para accionar un mecanismo de control, es muy simple. El mismo principio del control automático se usa en diversos campos, como control de procesos químicos y del petróleo, control de hornos en la fabricación del acero, control de máquinas herramientas, y en el control y trayectoria de un proyectil.

El uso de las computadoras analógicas y digitales ha posibilitado la aplicación de ideas de control automático a sistemas físicos que hace apenas pocos años eran imposibles de analizar o controlar.

Es necesaria la comprensión del principio del control automático en la ingeniería moderna, por ser su uso tan común como el uso de los principios de electricidad o termodinámica, siendo por lo tanto, una parte de primordial importancia dentro de la esfera del conocimiento de ingeniería. También son tema de estudio los aparatos para control automático, los cuales emplean el principio de realimentación para mejorar su funcionamiento.

El control automático es el mantenimiento de un valor deseado dentro de una cantidad o condición, midiendo el valor existente, comparándolo con el valor deseado, y utilizando la diferencia para proceder a reducirla. En consecuencia, el control automático exige un lazo cerrado de acción y reacción que funcione sin intervención humana.

El elemento más importante de cualquier sistema de control automático es lazo de control realimentado básico. El concepto de la realimentación no es nuevo, el primer lazo de realimentación fue usado en 1774 por James Watt para el control de la velocidad de cualquier máquina de vapor. A pesar de conocerse el concepto del funcionamiento, los lazos se desarrollaron lentamente hasta que los primeros sistemas de transmisión neumática comenzaron a volverse comunes en los años 1940's, los años pasados han visto un extenso estudio y desarrollo en la teoría y aplicación de los lazos realimentados de control. En la actualidad los lazos de control son un elemento esencial para la manufactura económica y próspera de virtualmente cualquier producto, desde el acero hasta los productos alimenticios. A pesar de todo, este lazo de control que es tan importante para la industria está basado en algunos principios fácilmente entendibles y fáciles. Este artículo trata éste lazo de control, sus elementos básicos, y los principios básicos de su aplicación

1.1 FUNCIÓN DEL CONTROL AUTOMÁTICO.

La idea básica de lazo realimentado de control es más fácilmente entendida imaginando qué es lo que un operador tendría que hacer si el control automático no

existiera.

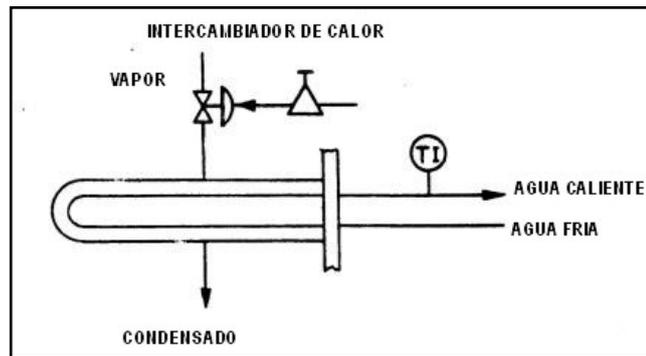


Figura 1.1 Sistema de Intercambio de calor

Fuente:

http://www.sapiensman.com/control_automatico/

La figura 1 muestra una aplicación común del control automático encontrada en muchas plantas industriales, un intercambiador de calor que usa calor para calentar agua fría. En operación manual, la cantidad de vapor que ingresa al intercambiador de calor depende de la presión de aire hacia la válvula que regula el paso de vapor. Para controlar la temperatura manualmente, el operador observaría la temperatura indicada, y al compararla con el valor de temperatura deseado, abriría o cerraría la válvula para admitir más ó menos vapor. Cuando la temperatura ha alcanzado el valor deseado, el operador simplemente mantendría esa regulación en la válvula para mantener la temperatura constante. Bajo el control automático, el controlador de temperatura lleva a cabo la misma función. La señal de medición hacia el controlador desde el transmisor de temperatura (o sea el sensor que mide la temperatura) es continuamente comparada con el valor de consigna (set-point en Inglés) ingresado al controlador. Basándose en una comparación de señales, el controlador automático puede decir si la señal de medición está por arriba o por debajo del valor de consigna y mueve la válvula de acuerdo a ésta diferencia hasta que la medición (temperatura) alcance su valor final.

1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL.

Los sistemas de control se clasifican en sistemas de lazo abierto y a lazo cerrado. La distinción la determina la acción de control, que es la que activa al sistema para producir la salida.

Un sistema de control de lazo abierto es aquel en el cual la acción de control es independiente de la salida.

Un sistema de control de lazo cerrado es aquel en el que la acción de control es en cierto modo dependiente de la salida.

Los sistemas de control a lazo abierto tienen dos rasgos sobresalientes :

a) La habilidad que éstos tienen para ejecutar una acción con exactitud está determinada por su calibración. Calibrar significa establecer o restablecer una relación entre la entrada y la salida con el fin de obtener del sistema la exactitud deseada.

b) Estos sistemas no tienen el problema de la inestabilidad, que presentan los de lazo cerrado.

Los sistemas de control de lazo cerrado se llaman comúnmente sistemas de control por realimentación (o retroacción).

Ejemplo 1

Un tostador automático es un sistema de control de lazo abierto, que está controlado por un regulador de tiempo. El tiempo requerido para hacer tostadas, debe ser anticipado por el usuario, quien no forma parte del sistema. El control sobre la calidad de la tostada (salida) es interrumpido una vez que se ha determinado el tiempo, el que constituye tanto la entrada como la acción de control.

Ejemplo 2

Un mecanismo de piloto automático y el avión que controla, forman un sistema de control de lazo cerrado (por realimentación). Su objetivo es mantener una dirección específica del avión, a pesar de los cambios atmosféricos. El sistema ejecutará su tarea midiendo continuamente la dirección instantánea del avión y ajustando

automáticamente las superficies de dirección del mismo (timón, aletas, etc.), de modo que la dirección instantánea coincida con la especificada. El piloto u operador, quien fija con anterioridad el piloto automático, no forma parte del sistema de control.

EL LAZO REALIMENTADO

El lazo de control realimentado simple sirve para ilustrar los cuatro elementos principales de cualquier lazo de control, (figura 1.2).

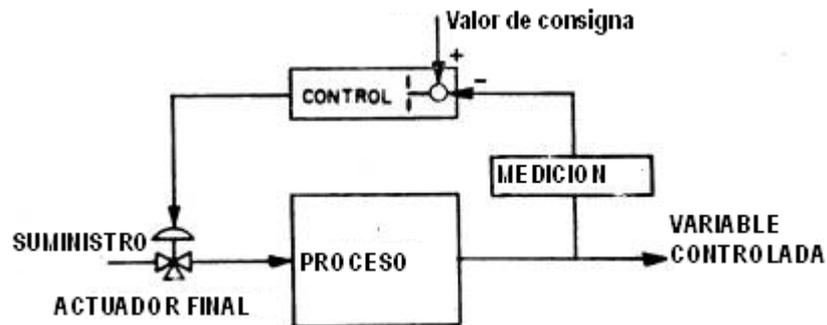


Figura 1.2 Lazo de Control automático control de realimentación

Fuente:

http://www.sapiensman.com/control_automatico/

La medición debe ser hecha para indicar el valor actual de la variable controlada por el lazo. Mediciones corrientes usadas en la industria incluyen caudal, presión, temperatura, mediciones analíticas tales como pH, conductividad y muchas otras específicas de cada industria.

Realimentación:

Es la propiedad de una sistema de lazo cerrado que permite que la salida (o cualquier otra variable controlada del sistema) sea comparada con la entrada al sistema (o con una entrada a cualquier componente interno del mismo con un subsistema) de manera tal que se pueda establecer una acción de control apropiada como función de la diferencia entre la entrada y la salida.

Más generalmente se dice que existe realimentación en un sistema cuando existe una secuencia cerrada de relaciones de causa y efecto entre las variables del sistema.

El concepto de realimentación está claramente ilustrado en el mecanismo del piloto automático del ejemplo dado.

La entrada es la dirección especificada, que se fija en el tablero de control del avión y la salida es la dirección instantánea determinada por los instrumentos de navegación automática. Un dispositivo de comparación explora continuamente la entrada y la salida.

Cuando los dos coinciden, no se requiere acción de control. Cuando existe una diferencia entre ambas, el dispositivo de comparación suministra una señal de acción de control al controlador, o sea al mecanismo de piloto automático. El controlador suministra las señales apropiadas a las superficies de control del avión, con el fin de reducir la diferencia entre la entrada y la salida. La realimentación se puede efectuar por medio de una conexión eléctrica o mecánica que vaya desde los instrumentos de navegación que miden la dirección hasta el dispositivo de comparación.

Características de la realimentación.

Los rasgos más importantes que la presencia de realimentación imparte a un sistema son:

- a) Aumento de la exactitud. Por ejemplo, la habilidad para reproducir la entrada fielmente.
- b) Reducción de la sensibilidad de la salida, correspondiente a una determinada entrada, ante variaciones en las características del sistema.
- c) Efectos reducidos de la no linealidad y de la distorsión.
- d) Aumento del intervalo de frecuencias (de la entrada) en el cual el sistema responde satisfactoriamente (aumento del ancho de banda).

e) Tendencia a la oscilación o a la inestabilidad.

El actuador final.

Por cada proceso debe haber un actuador final, que regule el suministro de energía o material al proceso y cambie la señal de medición. Más a menudo éste es algún tipo de válvula, pero puede ser además una correa o regulador de velocidad de motor, posicionador, etc.

El proceso

Los tipos de procesos encontrados en las plantas industriales son tan variados como los materiales que producen. Estos se extienden desde lo simple y común, tales como los lazos que controlan caudal, hasta los grandes y complejos como los que controlan columnas de destilación en la industria petroquímica.

El controlador automático.

El último elemento del lazo es el controlador automático, su trabajo es controlar la medición. “Controlar” significa mantener la medición dentro de límites aceptables. En éste trabajo, los mecanismos dentro del controlador automático no serán considerados. Por lo tanto, los principios a ser tratados pueden ser aplicados igualmente tanto para los controladores neumáticos como para los electrónicos y a controladores de todos los fabricantes. Todos los controladores automáticos usan las mismas respuestas generales, a pesar de que los mecanismos internos y las definiciones dadas para estas respuestas pueden ser ligeramente diferentes de un fabricante al otro.

Un concepto básico para que el control realimentado automático exista, es que el lazo de realimentación esté cerrado. Esto significa que la información debe ser continuamente transmitida dentro del lazo. El controlador debe poder mover a la válvula, la válvula debe poder afectar a la medición, y la señal de medición debe ser reportada al controlador. Si la conexión se rompe en cualquier punto, se dice que el lazo está abierto. Tan pronto como el lazo se abre, como ejemplo, cuando el controlador automático es colocado en modo manual, la unidad automática del

controlador queda imposibilitada de mover la válvula. Así las señales desde el controlador en respuesta a las condiciones cambiantes de la medición no afectan a la válvula y el control automático no existe.

1.3 AJUSTE DE CONTROL MEDIANTE MÉTODOS CLÁSICOS

Un sistema de control consiste en un conjunto de componentes, coordinados de tal manera que proporcionen una respuesta deseada en un determinado proceso o planta.

Los componentes básicos de todo sistema de control son:

- Sensor capta las diferentes variables a medir en un proceso.
- Transmisor, capta la salida del sensor y la convierte en una señal lo suficiente intensa como para transmitirla al controlador.
- Controlador, recibe la señal medida y la compara con el valor que se desea, y según el resultado de la comparación decide que hacer.
- Elemento final, actúa sobre la variable manipulada dependiendo de la decisión que el controlador envía a este elemento, puede ser una válvula de control, un motor, etc.

Estos componentes se encargan de realizar las 3 operaciones básicas presentes en todo sistema de control:

- Medición, de la variable que se controla se hace por lo general mediante la combinación del sensor y transmisor.
- Decisión, con base en la medición, el controlador decide que hacer para mantener la variable en el valor que se desea.

- Acción, como resultado de la decisión del controlador se debe efectuar una acción en el sistema, generalmente esta es realizada por el elemento final del control.

Por lo tanto se puede definir como:

- Variable controlada, a la variable que se debe mantener o controlar dentro de algún valor deseado.
- Punto de control, valor que se desea tenga la variable controlada.
- Variable Manipulada, a la variable que se utiliza para mantener a la variable controlada en el punto de control.
- Perturbación, cualquier variable que ocasione que la variable de control se desvíe del punto de control.

Transformada de Laplace

La transformada de Laplace se puede definir como la habilidad para obtener aproximaciones lineales de sistemas físicos, este método sustituye por ecuaciones algebraicas de resolución relativamente fácil las ecuaciones diferenciales más complicadas. La solución para la respuesta en función del tiempo se obtiene al realizar las siguientes operaciones:

- Obtención de las ecuaciones diferenciales y la transformada de Laplace de dichas ecuaciones diferenciales.
- Resolver las ecuaciones algebraicas resultantes para las variables de interés.

Función de Transferencia de Sistemas Lineales

La función de transferencia de un sistema se define como la relación entre la transformada de Laplace de la variable de salida y la transformada de Laplace de la variable de entrada, suponiendo que todas las condiciones iniciales se hacen iguales a cero, la función de transferencia de un sistema representa la relación que describe la dinámica del sistema en consideración.

La función de transferencia puede definirse para un sistema lineal y estacionario (de parámetro constante), no siendo así para un sistema no estacionario, es decir, que varía con el tiempo, puesto que tienen uno o más parámetros que varían en dicha forma.

La función de transferencia describe el compartimiento de la relación entrada-salida de un sistema.

La representación por diagramas de bloques para las relaciones de los siguientes sistemas predomina en la ingeniería de control, los diagramas de bloques constan de bloques operacionales y unidireccionales que representan la función de transferencia de las variables de interés.

La representación en diagramas de bloques para los sistemas de control con retroalimentación es un método muy valioso y gráfico de las relaciones entre las variables controladas y las de entrada.

Además se puede visualizar con facilidad las posibilidades de agregar bloques al diagrama existente del sistema con la finalidad de modificar y mejorar el funcionamiento del sistema.

Referencia del autor: www.sapiensman.com

1.4 TIPOS DE RESPUESTAS DEL CONTROLADOR.

La primera y más básica característica de la respuesta del controlador ha sido indicada como la acción directa o reversa. Una vez que esta distinción se ha llevado a cabo, existen varios tipos de respuestas que pueden ser usadas para controlar un proceso. Estas son:

- Control Si/No (ó On/Off con sus siglas en Inglés), ó control de dos posiciones.
- Control proporcional.
- Acción integral (reset)
- Acción derivativa.

1.4.1 CONTROL ON-OFF

El mecanismo de realimentación más simple se puede describir matemáticamente como sigue:

$$\mathbf{u} = \begin{cases} \mathbf{u}_{max} & e > 0 \\ \mathbf{u}_{min} & e < 0 \end{cases}$$

Ecuación 1

Donde $\mathbf{e} = \mathbf{y}_u - \mathbf{y}$ (diferencia entre la referencia especificada por el operador y la salida medida del proceso) es el denominado “*error de control*”. Esta ley de control implica que siempre se usa la acción correctiva máxima. De esta manera, la variable manipulada tiene su valor más grande cuando el error es positivo y su valor más pequeño cuando el error es negativo. La realimentación de este tipo se llama “*control on-off*”. Es simple y no tiene parámetros que configurar, aparte de las acciones mínima y máxima que se ejecutan en el cálculo de la señal de control. El control on-off muchas veces es apropiado para mantener la variable controlada del proceso cerca del valor de la referencia que fue especificada, pero típicamente resulta en un sistema donde las variables oscilan. Note en la ecuación (1) que la variable de control

no está definida cuando el error es cero. Es común tener algunas modificaciones ya sea introduciendo histéresis o una zona muerta como se muestra en la Fig. 1.3.

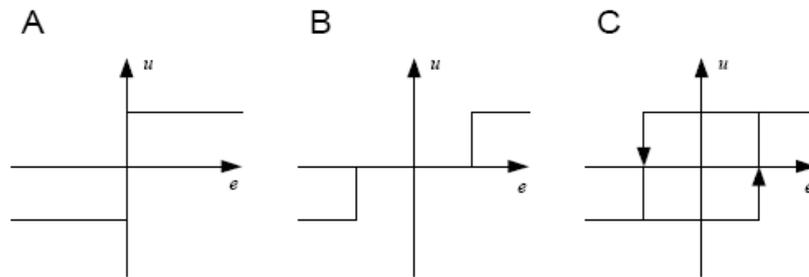


Figura 1.3 Característica de un controlador on-off y modificaciones con (B) zona muerta y (C) histéresis

Fuente: Apuntes de control PID
Ing. Mauricio Amestegui Moreno

1.4.2 CONTROL PROPORCIONAL

La razón por la que el control on-off resulta en oscilaciones es que el sistema sobreactúa cuando ocurre un pequeño cambio en el error que hace que la variable manipulada cambie sobre su rango completo. Este efecto se evita en el *control proporcional*, donde la característica del controlador es proporcional al error de control cuando éstos son pequeños. La Figura 1.4 muestra la característica de un controlador proporcional. De esta manera, el controlador está caracterizado por la función no lineal $\mu = fc(e)$, dependiente del error de control, que se muestra en la figura.

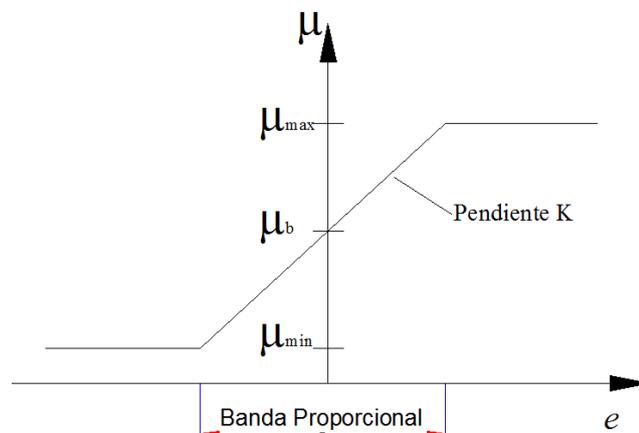


Figura 1.4 Característica de un controlador proporcional. La entrada es el error de control e y la salida es la señal de control u .

Fuente: Apuntes de control PID
Ing. Mauricio Amestegui Moreno

Para describir la característica del controlador proporcional se debe dar los límites u_{\max} y u_{\min} de la variable de control. El rango lineal puede ser especificado, ya sea, por la pendiente dada en la curva característica (ganancia K del controlador) o, bien, por el rango donde la curva característica es lineal (conocida como *banda proporcional* P_b). Este rango está normalmente centrado alrededor de la referencia. La banda proporcional y la ganancia del controlador están relacionadas a través de:

$$u_{\max} - u_{\min} = KP_b \quad \text{Ecuación 2}$$

Normalmente se asume que $u_{\max} - u_{\min} = 100\%$, lo cual implica que

$$K = \frac{100}{P_b} \quad \text{Ecuación 3}$$

Note que un controlador proporcional actúa como un controlador on-off cuando los errores de control son grandes.

1.4.2.1 ACCION PROPORCIONAL

En el caso de un control proporcional puro, la ecuación del sistema es:

$$\mathbf{u}(t) = K\mathbf{e}(t) + \mathbf{u}_b \quad \text{Ecuación 4}$$

La acción de control es simplemente proporcional al error de control. La variable U_b es una señal de polarización o un reset. Cuando el error de control e es cero, la variable de control toma el valor $\mathbf{u}(t) = \mathbf{u}_b$. La polarización U_b a menudo se la fija en $(\mathbf{u}_{\max} + \mathbf{u}_{\min})^{1/2}$, pero, algunas veces, puede ser ajustada manualmente de forma que el error de control en estado estacionario sea cero en una referencia dada.

1.4.2.2 ANÁLISIS ESTÁTICO

Muchas de las propiedades del control proporcional se pueden entender mediante el siguiente argumento, que está basado en consideraciones estáticas puras. Considere un lazo realimentado simple, como el mostrado en la Figura 1.5, que consiste de un proceso y un controlador, sometidos a perturbaciones.

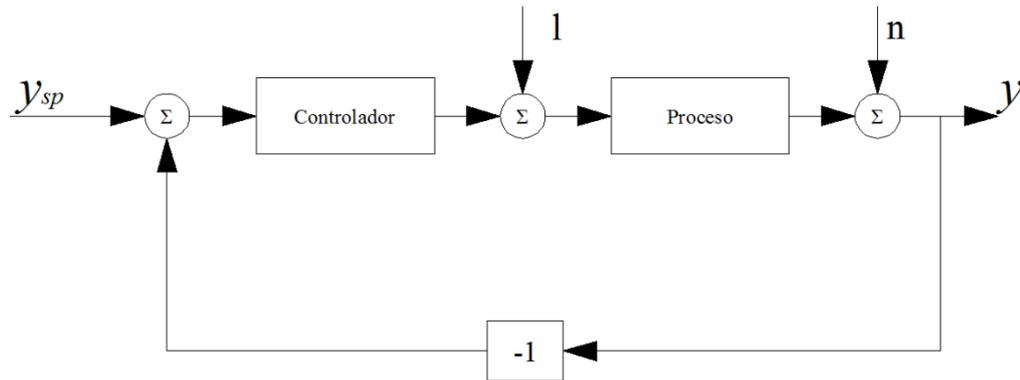


Figura 1.5 Diagrama de bloques de un lazo de realimentación simple.

Fuente: Apuntes de control PID
Ing. Mauricio Amestegui Moreno

Un ejemplo típico del control proporcional se ilustra en la Figura 1.6. La figura muestra el comportamiento de la salida del proceso y de la señal de control, después de un cambio al escalón en la señal de referencia. El término de polarización U_b , la perturbación de carga l y el ruido de medición n son cero en la simulación. Con una ganancia del controlador $K=1$ y una ganancia estática del proceso $K_p=1$, se obtiene un error de control del 50%. La figura muestra que el error en estado estacionario decrece a medida que se incrementa la ganancia del controlador. Note también que la respuesta se vuelve más oscilatoria al incrementar la ganancia del controlador. Esto se debe a la dinámica del proceso.

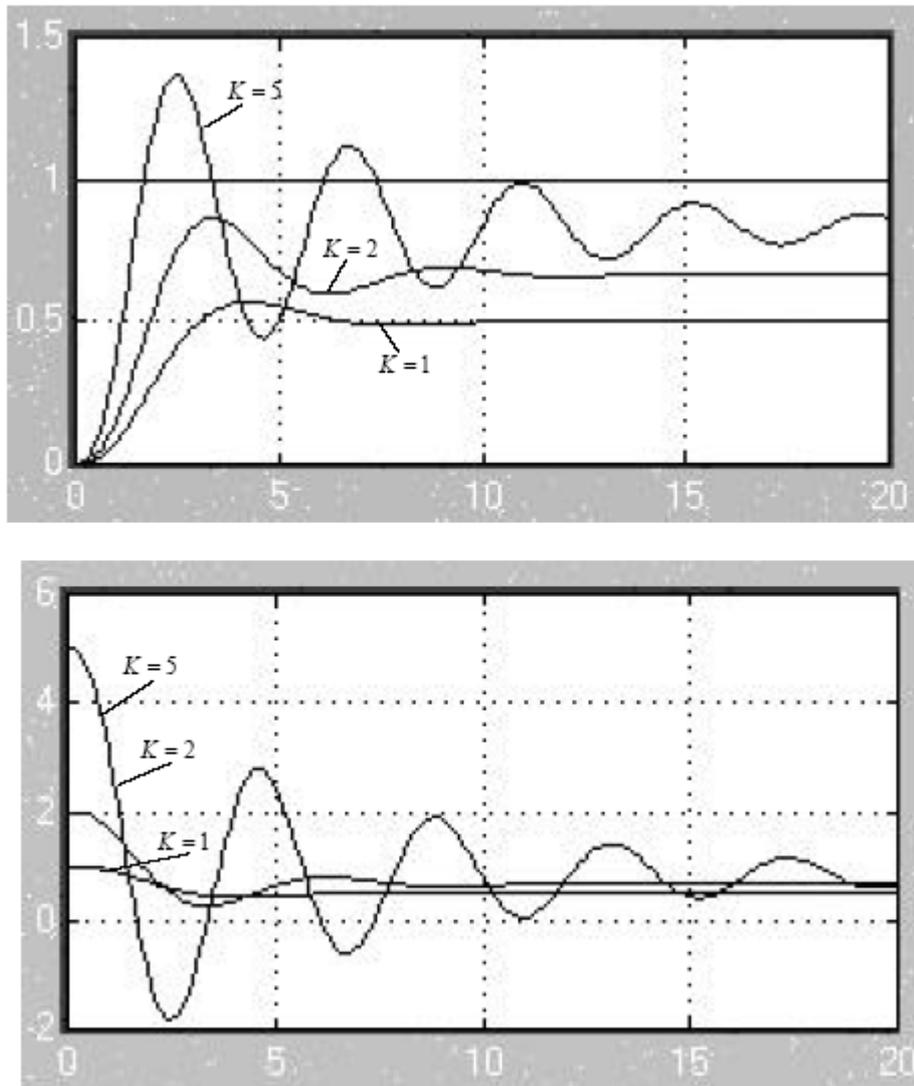


Figura 1.6 Simulación de un sistema de control en lazo cerrado con control proporcional. La función de transferencia del proceso es: $G(s) = (s + 1)^{-3}$. El Diagrama muestra la referencia $y_{sp} = 1$ y la salida del proceso y para diferentes valores de la ganancia del controlador K . El diagrama inferior muestra la señal de control u para las respectivas ganancias del controlado.

Fuente: Apuntes de control PID
Ing. Mauricio Amestegui Moreno

1.4.3 ACCION INTEGRAL

La función principal de la acción integral es asegurar que la salida del proceso concuerde con la referencia en estado estacionario. Con el controlador proporcional, normalmente existiría un error en estado estacionario. Con la acción integral, un pequeño error positivo siempre producirá un incremento en la señal de control y, un error negativo siempre dará una señal decreciente sin importar cuán pequeño sea el error.

El siguiente argumento simple muestra que el error en estado estacionario siempre será cero con la acción integral. Asuma que el sistema está en estado estacionario con una señal de control constante u_0 , y un error constante e_0 . Se tiene que la señal de control está dada por:

$$u_0 = K \left(e_0 + \frac{e_0}{T_i} t \right)$$

Ecuación 5

Como se tiene que $e_0 \neq 0$, claramente se contradice el supuesto de que la señal de control u_0 se mantiene constante. Por tanto, como resultado de esto, un controlador con acción integral siempre dará un error en estado estacionario cero.

La acción integral también puede ser vista como un dispositivo que automáticamente restablece el término de polarización u_0 de un controlador proporcional. Esto se ilustra en el diagrama de bloques de la Figura 1.7, que muestra un controlador proporcional con un “reset” que se ajusta automáticamente. El ajuste se hace realimentando una señal, que es un valor filtrado de la salida del controlador, a un punto de suma. El “reset automático” fue el que dió origen a la acción integral del controlador del tipo PID.

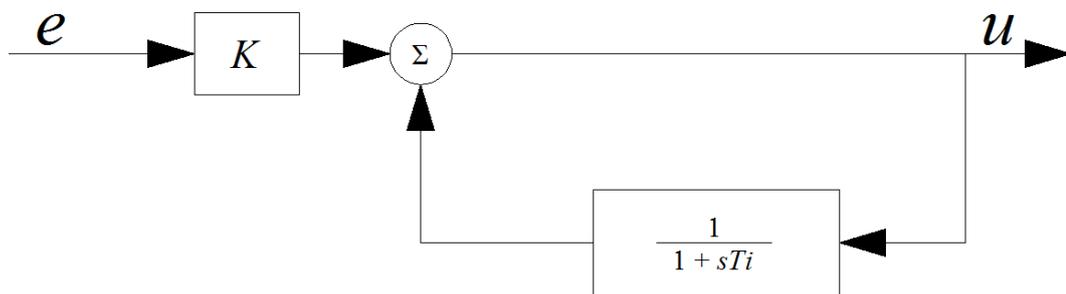


Figura 1.7 Implementación de la acción integral concebida como un reset automático.

Fuente: Apuntes de control PID
Ing. Mauricio Amestegui Moreno

La implementación mostrada en la Figura 1.7 todavía es usada por muchos fabricantes de controladores. Sin embargo, a partir del diagrama de bloques, se pueden deducir las siguientes ecuaciones:

$$u = Ke + I$$

$$T_i \frac{dI}{dt} + I = u \quad \text{Ecuación 6}$$

De donde, la eliminación de u entre estas ecuaciones produce:

$$T_i \frac{dI}{dt} + I = Ke + I$$

y, de aquí:

$$T_i \frac{dI}{dt} = Ke \quad \text{Ecuación 7}$$

Que muestra que el controlador de la Figura 1.7 es, en los hechos, un controlador del tipo PI. Las propiedades de la acción integral se ilustran en la Figura 1.8, que muestra la simulación de un sistema de control PI. La ganancia proporcional es $K=1$ en todas las curvas. El caso $T_i = \infty$ corresponde a un control proporcional puro, que es idéntico al de $K=1$ de la Figura 1.7, donde el error final es del 50%. El error es eliminado cuando T_i toma valores finitos. Para valores grandes de T_i , la respuesta se desliza lentamente hacia la referencia.

El acercamiento es aproximadamente exponencial con constante de tiempo T_i/KK_p y es más rápido para valores pequeños de T_i ; pero es, también, más oscilatorio.

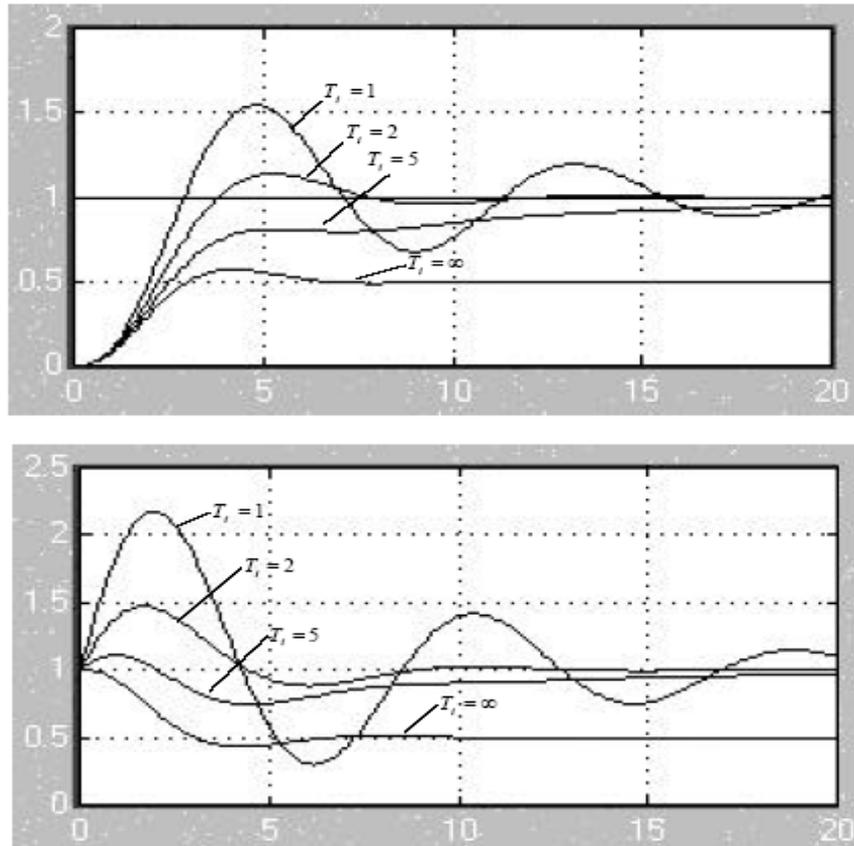


Fig. 1.8: Simulación de un sistema en lazo cerrado con control proporcional e integral. La función de transferencia del proceso es $G(s) = (s + 1)^{-3}$, y la ganancia del controlador es $K=1$. El diagrama superior muestra la referencia y_{sp} y la salida del proceso y para diferentes valores del tiempo integral T_i . El diagrama inferior muestra la señal de control u para los respectivos valores del tiempo integral.

Fuente: Apuntes de control PID
Ing. Mauricio Amestegui Moreno

1.4.4 ACCION DERIVATIVA

El propósito de la acción derivativa es mejorar la estabilidad de lazo cerrado. El mecanismo de inestabilidad puede ser descrito intuitivamente como sigue. Debido a la dinámica del proceso, pasa algún tiempo antes de que la variable de control se note en la salida del proceso. De esta manera, el sistema de control tarda en corregir el error. La acción de un controlador con acción proporcional y derivativa puede ser interpretada como si el control proporcional fuese hecho para predecir la salida del proceso. La predicción se hace por la extrapolación del error de control en la dirección de la tangente a su curva respectiva, como se muestra en la Figura 1.9.

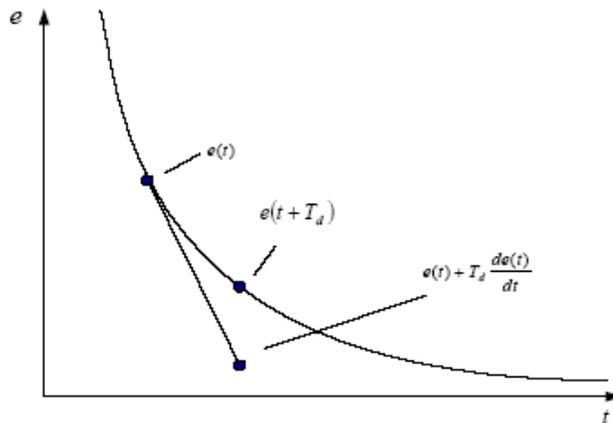


Fig. 1.9: Interpretación geométrica de la acción derivativa como un control predictivo, donde la predicción se obtiene mediante extrapolación lineal.

Fuente: Apuntes de control PID
Ing. Mauricio Amestegui Moreno

La estructura básica de un controlador PD está dada por:

$$u(t) = K \left(e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad \text{Ecuación 8}$$

La expansión en series de Taylor de $e(t + T_d)$ da:

$$e(t + T_d) \approx e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \quad \text{Ecuación 9}$$

De esta manera, la señal de control es proporcional a un estimado del error de control en un tiempo Td hacia adelante, donde el estimado se obtiene mediante extrapolación lineal, como fue mostrado en la Figura 1.9.

Las propiedades de la acción derivativa se ilustran en la Figura 1.10, que muestra la simulación de un sistema con control PID. La ganancia del controlador y el tiempo de estimación se mantienen constantes con $K=3$ y $T_i=2$, y se varía el tiempo derivativo T_d . Para $T_d = 0$, se tiene un control PI puro. El sistema de lazo cerrado es oscilatorio con los parámetros elegidos. Inicialmente el amortiguamiento se incrementa con el incremento del tiempo derivativo, pero disminuye cuando el tiempo derivativo se vuelve más grande.

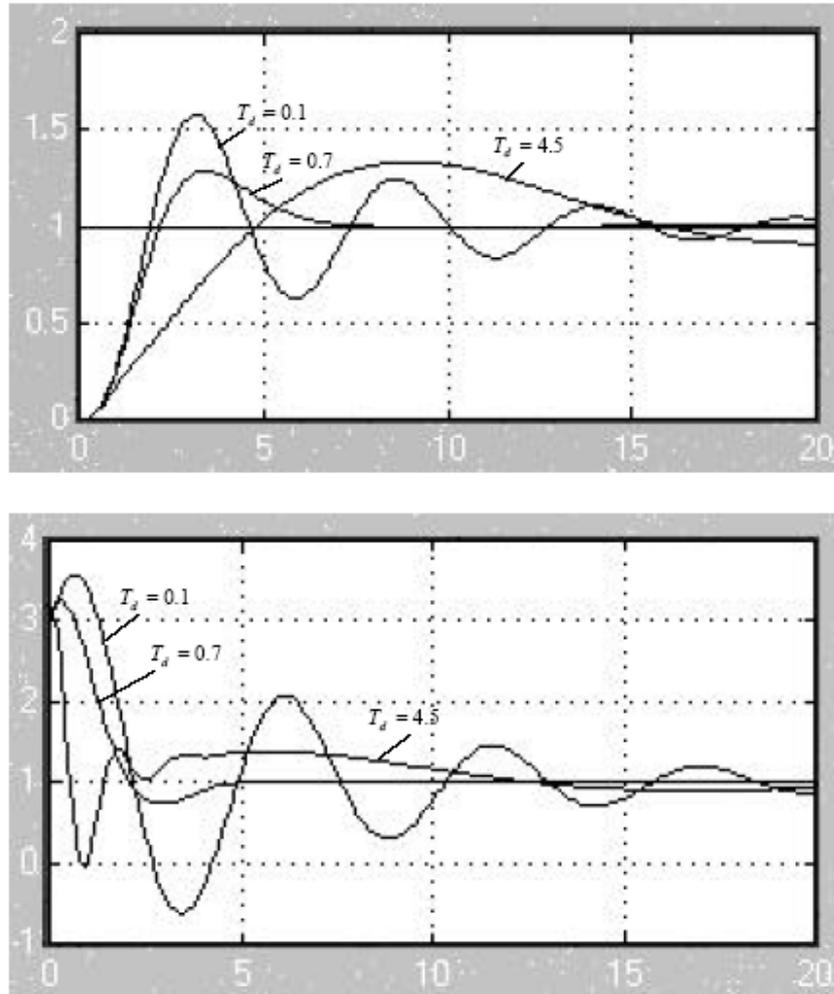


Figura 1.10 Simulación de un sistema en lazo cerrado con control proporcional, integral y derivativo. La función de transferencia del proceso es $G(s) = (s + 1)^{-3}$, la ganancia del controlador es $K=3$ y el tiempo integral es $T_i = 2$. El diagrama superior muestra la referencia $y_{sp} = 1$ y la salida del proceso y para diferentes valores del tiempo derivativo T_d . El diagrama inferior muestra la señal de control u para los respectivos valores del tiempo derivativo.

Fuente: Apuntes de control PID
Ing. Mauricio Amestegui Moreno

1.5 INTRODUCCION AL CONTROLADOR PID

El controlador PID (Proporcional, Integral y Derivativo) es un controlador realimentado cuyo propósito es hacer que el error en estado estacionario, entre la señal de referencia y la señal de salida de la planta, sea cero de manera asintótica en el tiempo, lo que se logra mediante el uso de la acción integral. Además el controlador tiene la capacidad de anticipar el futuro a través de la acción derivativa que tiene un efecto predictivo sobre la salida del proceso.

Los controladores PID son suficientes para resolver el problema de control de muchas aplicaciones en la industria, particularmente cuando la dinámica del proceso lo permite (en general procesos que pueden ser descritos por dinámicas de primer y segundo orden), y los requerimientos de desempeño son modestos (generalmente limitados a especificaciones del comportamiento del error en estado estacionario y una rápida respuesta a cambios en la señal de referencia).

Los fabricantes proporcionan los controladores PID de variadas formas. Existen sistemas del tipo “stand alone” con capacidad para controlar uno o varios lazos de control.

Estos dispositivos son fabricados en el orden de cientos de miles al año. El controlador PID es también un ingrediente importante en los sistemas de control distribuido, ya que proporciona regulación a nivel local de manera eficaz. Por otro lado, pueden también venir empotrados, como parte del equipamiento, en sistemas de control de propósito especial, formando así parte integrante de la aplicación.

Su uso extensivo en la industria revela que un gran porcentaje de los lazos de control que existen en las aplicaciones son del tipo PID, de los cuales la mayoría son controladores PI, lo que muestra la preferencia del usuario en el uso de leyes de control muy simples.

En general, el usuario no explota todas las características de estos controladores, quizás por falta de una mejor comprensión desde el punto de vista de la teoría de control.

En la actualidad, el control PID dispone de una serie de prestaciones, que en el pasado han sido consideradas como secretos de los fabricantes. Un par de ejemplos típicos de este tipo de prestaciones son las técnicas de conmutación de modos de control y el anti-windup del integrador.

Los algoritmos actuales se combinan con funciones lógicas y secuenciales y una serie de mecanismos y funciones adicionales para adecuarse a los requerimientos de los modernos sistemas de control y automatización industrial, lo que da lugar a

dispositivos especializados para el control de temperatura, velocidad, distribución de energía, transporte, máquinas-herramientas, reacción química, fermentación, entre otros.

Los controladores PID son generalmente usados en el nivel de control más bajo, por debajo de algunos dispositivos de mediano nivel como PLC's, supervisores, y sistemas de monitoreo. Sin embargo, su importancia es tal que se convierte en el “pan de cada día” del ingeniero de control.

Los controladores PID han sobrevivido a muchos cambios en la tecnología a lo largo de su historia. Desde los antiguos reguladores de Watt, de la época de la revolución industrial, pasando por los controladores neumáticos, los controladores analógicos.

*Referencia del autor: Apuntes de control PID
Ing. Mauricio Amestegui Moreno*

Principio de Realimentación en Controladores PID

La idea de la realimentación es bastante simple y muy poderosa. A lo largo de su historia, ha tenido una fuerte influencia en la evolución de la tecnología. Las aplicaciones del principio de realimentación han tenido éxito en los campos del control, comunicaciones e instrumentación. Para entender el concepto, asuma que el proceso es tal que cuando el valor de la variable manipulada se incrementa, entonces se incrementan los valores de las variables del proceso. Bajo este concepto simple, el principio de realimentación puede ser expresado como sigue:

Incrementar la variable manipulada cuando la variable del proceso sea más pequeña que la referencia y disminuirla cuando ésta sea más grande.

Este tipo de realimentación se llama “*realimentación negativa*” debido a que la variable manipulada se mueve en la dirección opuesta a la variable del proceso. El principio puede ser ilustrado por el diagrama de bloques que se muestra en la Figura 1.11. En este diagrama el proceso y el controlador están representados por cajas negras y las flechas denotan las entradas y salidas a cada bloque. Note que existe un símbolo especial que denota una suma de señales. El diagrama de bloques muestra

que el proceso y el controlador están conectados en un lazo realimentado. La presencia del signo en el bloque de retorno indica que la realimentación es negativa.

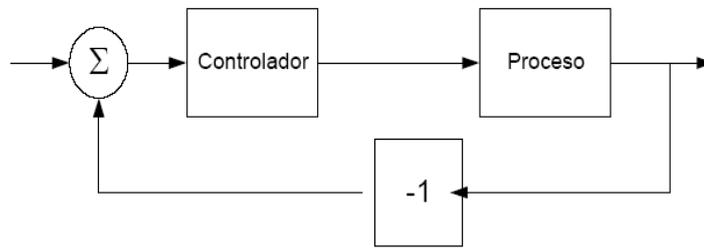


Figura 1.11 Bomba de succión PEDROLLO Fuente: Apuntes de control PID
Ing. Mauricio Amestegui Moreno

Control PID

En la sección anterior se vio que el control proporcional tiene la desventaja de que, en la mayoría de los casos, resulta en un error estático o de estado estacionario diferente de cero. Los algoritmos de control usados en la práctica son, por tanto, normalmente más complejos que el del controlador proporcional. Se puede mostrar empíricamente que el llamado “controlador PID” es una estructura útil. Dentro de la banda proporcional el comportamiento del algoritmo PID en su versión de “libro de texto” se puede describir como:

$$u(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde u es la variable de control y e es el error de control dado por $e = y_{sp} - y$. De esta manera, la variable de control es una suma de tres términos: el término P, que es proporcional al error; el término I, que es proporcional a la integral del error; y el término D, que es proporcional a la derivada del error. Los parámetros del controlador son: la ganancia proporcional K , el tiempo integral T_i y el tiempo derivativo T_d .

WINDUP DEL INTEGRADOR

Aunque muchos de los aspectos de un sistema de control se pueden entender a partir de la teoría de control lineal, algunos efectos no lineales deben ser tomados en cuenta

a la hora de implementar un controlador. Todos los actuadores tienen limitaciones: un motor tiene limitada su velocidad, una válvula no puede abrirse más de “completamente abierta” y no puede cerrarse más de “complemente cerrada”, la fuente de alimentación de energía de un dispositivo eléctrico es finita, etc. Para un sistema de control con un amplio rango de condiciones de operación, puede suceder que la variable de control alcance los límites prefijados del actuador. Cuando esto pasa, el lazo realimentado permanece en su límite independientemente de la salida del proceso. Si se usa un controlador con acción integral, el error continuará siendo integrado, incrementando aún más su valor. Esto significa que el término integral puede volverse muy grande o, coloquialmente, hacer “windup”. Entonces, se requiere que el error tenga el signo opuesto por un periodo de tiempo suficientemente largo, antes de que las cosas regresen a las condiciones normales de operación. La consecuencia es que cualquier controlador con acción integral puede dar transitorios grandes cuando el actuador se satura.

Ilustración del Windup de un Integrador

El fenómeno wind-up se ilustra en la Figura 1.12, que muestra el control de un proceso con un controlador PI. El cambio inicial de la referencia es tan grande que hace que el controlador se sature en el límite alto. El término integral se incrementa inicialmente, debido a que el error es positivo; alcanza su valor más grande en el tiempo $t=3$ cuando el error pasa por cero. La salida permanece saturada en este punto, debido a que el valor del término integral es todavía grande.

El controlador no abandona el límite de saturación hasta que el error haya sido negativo por un tiempo suficientemente largo, de forma que permitir que el valor de la parte integral baje a un nivel pequeño.

El efecto neto es un gran sobrepaso y una oscilación amortiguada, donde la señal de control fluctúa de un extremo a otro como en un relé de oscilación. La salida finalmente se aproxima a la referencia y el actuador no se satura. Entonces el sistema se comporta linealmente y se establece en el estado estacionario.

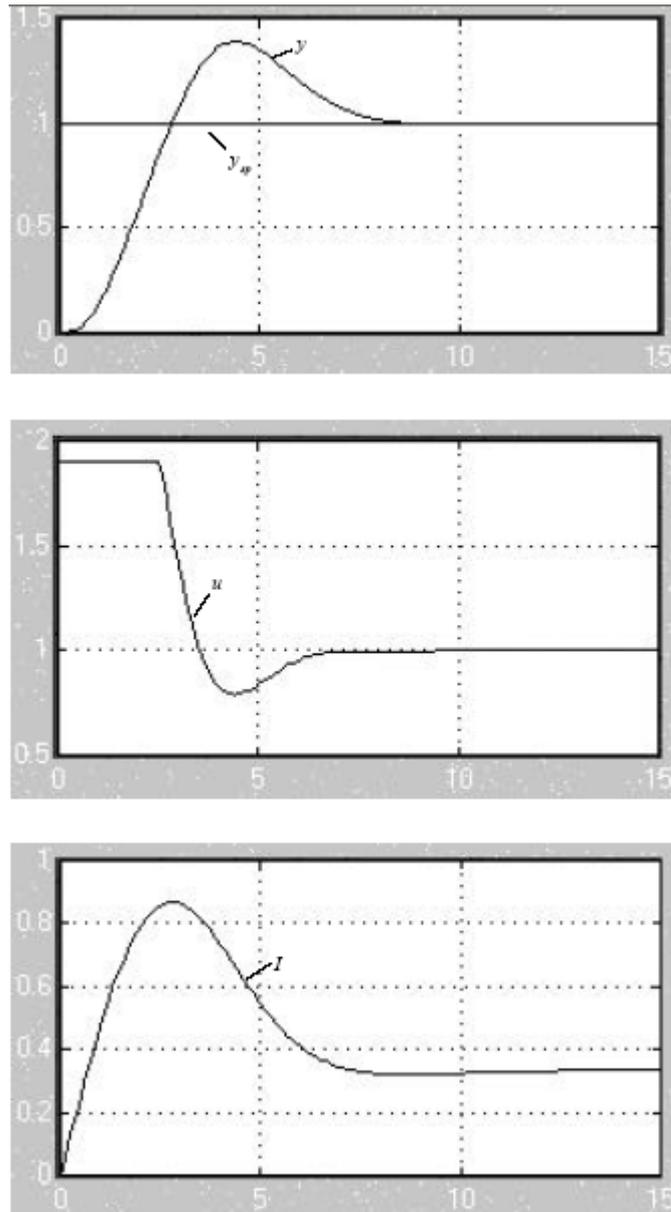


Figura 1.12 Ilustración del windup del integrador. Los diagramas muestran la salida del proceso y la referencia Y_{sp} y la señal de control u .

Fuente: Apuntes de control PID
Ing. Mauricio Amestegui Moreno

El windup del integrador puede ocurrir en conexión con cambios grandes en la referencia o puede ser causado por perturbaciones o malfuncionamiento del equipamiento del sistema de control. El windup también puede ocurrir cuando se usan selectores de varios controladores que manejan un actuador. Un caso digno de mencionar es el control en cascada, donde el windup puede ocurrir en el controlador primario cuando el controlador secundario se conmuta a modo manual, usa su referencia local, o si su señal de control se satura.

Limitación de la Referencia

Una forma de evitar el windup del integrador es introducir limitadores en las variaciones de la referencia tal que la salida del controlador nunca alcance los límites del actuador. Esto, a menudo, produce cotas conservativas y límites en el funcionamiento del controlador. Más aún, no evita el windup causado por las perturbaciones.

Algoritmos Incrementales

En la primera época del control realimentado, la acción integral fue incluida con el actuador, teniendo un motor manejando directamente una válvula de control. En este caso, el windup fue manejado automáticamente, debido a que la integración para cuando la válvula de control para. Cuando los controladores fueron implementados mediante técnicas analógicas, y más tarde con computadoras, muchos fabricantes usaron una configuración análoga al viejo diseño mecánico. Esto condujo a los llamados algoritmos de velocidad. En este algoritmo, primero se calcula la tasa de cambio de la señal de control y luego se la alimenta a un integrador. En algunos casos este integrador es directamente un motor conectado al actuador. En otros casos el integrador es implementado internamente en el controlador. Con este método es fácil manejar los cambios de modo de control y el windup. A su vez, el windup se evita inhibiendo la integración cuando se satura la salida. Este método es equivalente al de recálculo, que se describe a continuación. Si la salida no es medible, se puede usar un modelo que calcula la salida saturada. Es también fácil limitar la tasa de cambio de la señal de control.

*Referencia: Apuntes de control PID
Ing. Mauricio Amestegui M.
Universidad Mayor de San Andrés*

2 MEDICION DE NIVEL

2.1 INTRODUCCION A LA MEDICION DE NIVEL

En la industria la medición de nivel es muy importante, tanto desde el punto de vista del funcionamiento correcto del proceso como de la consideración del balance adecuado de materias primas o de productos finales.

Los instrumentos de nivel pueden dividirse en medidores de nivel de líquidos y sólidos, que son dos mediciones claramente diferenciadas y que se deben estudiar separadamente por sus distintas peculiaridades y las aplicaciones particulares de las que son objeto.

2.2 TIPOS DE MEDIDORES DE NIVEL PARA LÍQUIDOS

Los medidores de nivel de líquidos trabajan midiendo, bien directamente la altura de líquido sobre una línea de referencia, bien la presión hidrostática, bien el desplazamiento producido en un flotador por el propio líquido contenido en el tanque del proceso, o bien aprovechando características eléctricas del líquido.

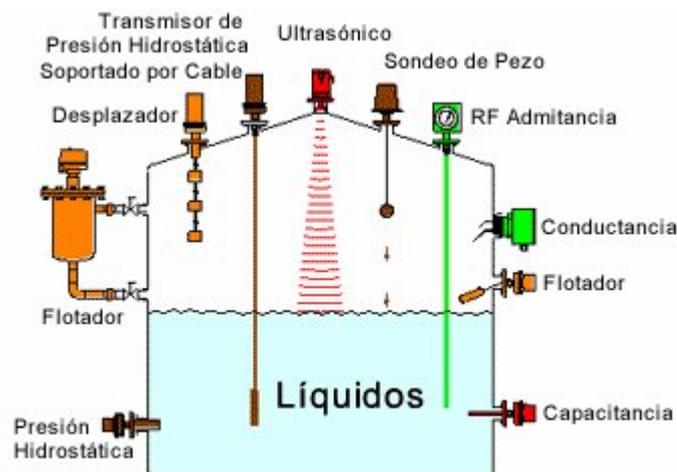


Figura 1.13 Medidores de nivel de líquidos.

Fuente: Medición de niveles antech
<http://mediciondenivelesantech.blogspot.com>

Los primeros instrumentos de medida directa se dividen en:

Sonda, cinta y plomada, nivel de cristal e instrumentos de flotador.

Los aparatos que miden el nivel aprovechando la presión hidrostática se dividen en:

- **Medidor manométrico:**

El medidor manométrico consiste en un manómetro conectado directamente a la parte inferior del tanque, donde además pueden observarse varios accesorios como son una válvula de cierre para el mantenimiento del líquido y un pote de decantación con una válvula de purga.

El manómetro mide la presión debida a la altura h que existe entre el nivel del tanque y el eje del instrumento. Como las alturas son limitadas, el campo de medida es bastante pequeño, de modo que el manómetro utilizado tiene un elemento de medida de tipo fuelle, el cual es utilizado frecuentemente para la medición de presiones bajas. Este instrumento solo sirve para fluidos limpios ya que si el líquido es corrosivo, coagula o bien tiene sólidos en suspensión, el fuelle puede destruirse o bien bloquearse perdiendo su elasticidad. Por otra parte, la medida está limitada a tanques abiertos y el nivel viene influido por las variaciones de densidad del líquido.

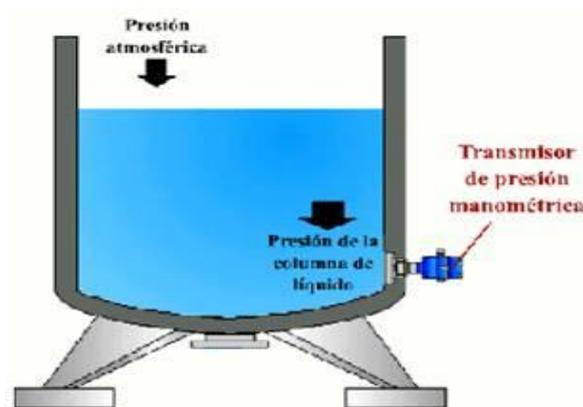


Figura 1.14 Medidor Manométrico.

Fuente: Medición de niveles antech
<http://mediciondenivelesantech.blogspot.com>

• **Medidor de tipo burbujeo:**

Los sistemas de burbujeo (o de purga continua) realizan la medición de nivel determinando la presión requerida para que un flujo constante de aire venza la presión hidrostática de un líquido. Al salir el aire, lo hace a manera de burbujeo, de ahí el nombre del sistema.

El medidor de tipo burbujeo es el más flexible y generalmente utilizado. Este instrumento coloca un tubo sumergido en el líquido, a través del cual se hace burbujear aire mediante un rotámetro con regulador de caudal incorporado, que permite mantener un caudal de aire constante a través del líquido, independientemente del nivel. Si no existiera, habría una gran diferencia en los caudales de aire necesarios desde el nivel mínimo al máximo, produciéndose un gasto de aire indebido. La tubería empleada suele ser de ½ pulgada con el extremo biselado para una fácil formación de las burbujas de aire. Un rotámetro es un medidor de caudal de área variable, en los cuales un flotador cambia su posición dentro de un tubo, proporcionalmente al flujo del fluido.

Cuando las burbujas escapan del tubo, la presión del aire en el interior de la tubería, medido mediante un manómetro de fuelles, corresponde a la presión máxima ejercida por el líquido. Por lo tanto, si se mide la presión dentro del tubo, se obtiene la medición de nivel. De hecho, la ubicación o elevación del extremo del tubo de burbujas se convierte en el nivel de medición cero. Por ejemplo, si se sumerge un tubo de burbujas en un tanque a 3.66 metros de la superficie del agua, se indicará una profundidad de 3.66 metros.

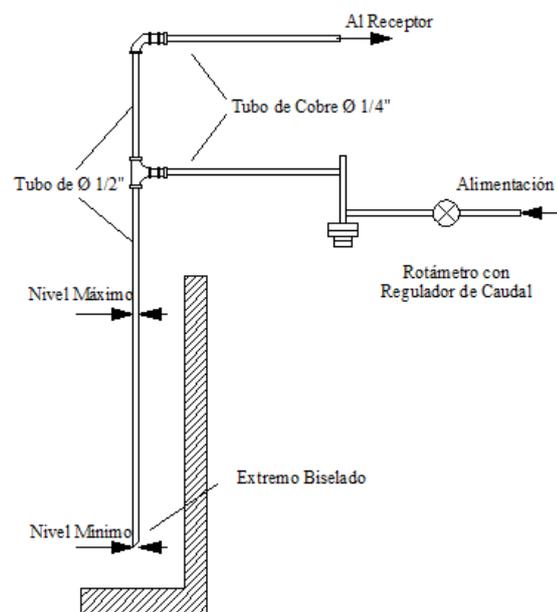
Las velocidades de purga del tubo de burbujas son muy bajas. Mientras una burbuja escape periódicamente el sistema estará funcionando debidamente. Una velocidad común de purga es de 0.5 pies cúbicos de aire libre por hora.

El sistema también puede emplearse en tanques cerrados con dos juegos rotámetro-regulador y con las señales de aire conectadas a un transmisor de presión diferencial. Como es lógico, la presión del aire de purga debe ser superior a la presión interna del tanque.

Cabe destacar que no sólo se puede utilizar aire como fluido de purga, sino también otro tipo de gases e incluso líquido. De hecho, algunos sistemas de purga utilizan nitrógeno que es uno de los que más se usan a presión. Un cilindro estándar de 110 pies cúbicos de nitrógeno para bombas de aceite comerciales puede proporcionar suficiente gas a presión para asegurar el funcionamiento del tubo de burbujas durante más de tres semanas.

Además, el tubo debe tener una longitud adecuada para evitar que las variaciones bruscas del nivel introduzcan en su interior una cierta columna de líquido que retarde el paso del aire y falsee momentáneamente la lectura.

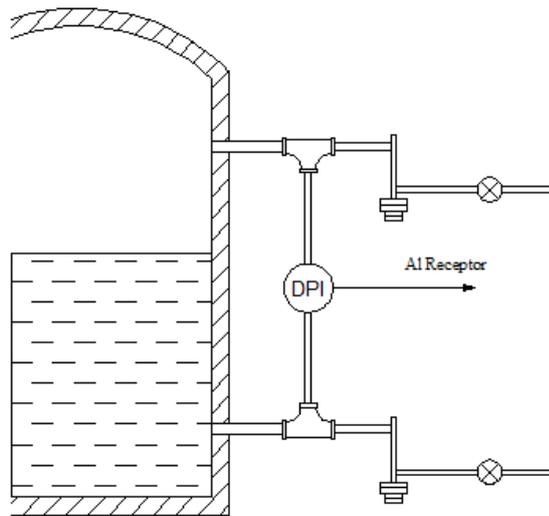
El método de burbujeo es simple y da buen resultado, en particular, en el caso de líquidos muy corrosivos o con sólidos en suspensión y en emulsiones. No es recomendable su empleo cuando el fluido de purga perjudica al líquido, tampoco para fluidos altamente viscosos donde las burbujas formadas del aire o del gas de purga presentan el riesgo de no separarse rápidamente del tubo. Desde el punto de vista de su mantenimiento, es muy útil situar una T con un tapón en la parte superior del tubo para su limpieza periódica.



a) Tanque Abierto

Figura 1.15 Medidor tipo burbujeo tanque abierto.

Fuente: Medición de niveles antech
<http://mediciondenivelesantech.blogspot.com>



a) Tanque Cerrado

Figura 1.16 Medidor tipo burbujeo tanque cerrado.

Fuente: Medición de niveles antech
<http://mediciondenivelesantech.blogspot.com>

• Medidor de presión diferencial de diafragma:

El medidor de presión diferencial consiste en un diafragma en contacto con el líquido del tanque, que mide la presión hidrostática en un punto del fondo del tanque. En un tanque abierto, esta presión es proporcional a la altura del líquido en ese punto y a su peso específico. El diafragma forma parte de un transmisor neumático, electrónico ó digital de presión diferencial semejante a los transmisores de caudal de diafragma.

En el tipo más utilizado, el diafragma está fijado en una brida que se monta rasante al tanque para permitir sin dificultades la medida de nivel de fluidos.

Hay que señalar que el nivel cero del líquido se selecciona en un eje a la altura del diafragma. Si el instrumento se calibra en el tanque, el 0 % del aparato debe comprobarse con el nivel más bajo en el borde inferior del diafragma, ya que entre el borde inferior y superior del diafragma la señal de salida no está en proporción directa al nivel

En el caso de que el tanque esté cerrado y bajo presión, el nivel no es un simple reflejo de la presión hidrostática. La determinación de la presión en un punto del líquido comprende tanto el peso o presión del líquido como la presión del gas o vapor que queda sobre el líquido del tanque cerrado. Es importante considerar que se debe corregir la indicación del aparato para la presión ejercida sobre el líquido, debiendo señalar que la lectura será muy poco precisa, si la presión es grande. A menudo, suele conectarse un tubo en la parte superior del tanque y medir la diferencia de presiones entre la toma inferior y la superior, utilizando transmisores de presión diferencial de diafragma.

De este modo el instrumento tendrá que estar graduado a la inversa, es decir, indicar 0% a 3 psi y 100% a 15 psi en un transmisor neumático, o bien señalar 0% a 4 mA y 100% a 20 mA en un transductor de señal de salida 4-20 miliamperios en corriente continua.

Para corregir este inconveniente se utiliza un muelle llamado supresión que está aplicado a la barra de equilibrio de fuerzas del transmisor y que produce una fuerza igual a la diferencia entre el nivel máximo y el mínimo. Como es natural, puede ajustarse la tensión del muelle para cada caso particular.

Algunos fluidos presentan el riesgo de depósito de cristales o de sólidos en la superficie del diafragma. En tal caso cabe la solución de emplear un diafragma recubierto de teflón para reducir el depósito gradual del producto. No obstante, como el movimiento del diafragma es muy pequeño y se considera el sólido algo flexible, continúa aplicándose la presión del líquido a todo el diafragma. Sin embargo, si parte del diafragma queda rígido, el instrumento, marcará de forma errática o permanentemente menos nivel del real. Este inconveniente se resuelve empleando un transmisor de nivel de presión diferencial con membranas de sello que responde a la presión transmitida en lugar de la fuerza creada por el líquido sobre la membrana.

En tanques cerrados y a presión con líquido de vapor condensable existe el riesgo de obstrucción de la línea de compensación, en particular si el fluido no es limpio. Para evitarlo puede purgarse la línea con líquido o con gas, método que no se recomienda por los problemas de mantenimiento y la posible pérdida de precisión que presenta, o bien emplear un transmisor de presión diferencial unido con dos capilares a dos

diafragmas conectados en la parte inferior y superior del tanque. Es importante que los dos diafragmas estén a la misma temperatura para evitar los errores en la medida que se presentarían por causa de las distintas dilataciones del fluido contenido en el tubo capilar.

Si el tanque es elevado y el medidor se sitúa a un nivel muy inferior, la columna de líquido que va desde el nivel mínimo al medidor es mucho mayor que la propia variación del nivel, por lo cual, la apreciación del mismo se hace sobre una parte muy pequeña de la escala. Para corregir este inconveniente se utiliza un muelle llamado de elevación que, en forma similar al de supresión, está aplicado a la barra de equilibrio de fuerzas del transmisor y produce una fuerza que se ajusta igual a la de la columna de líquido citada.

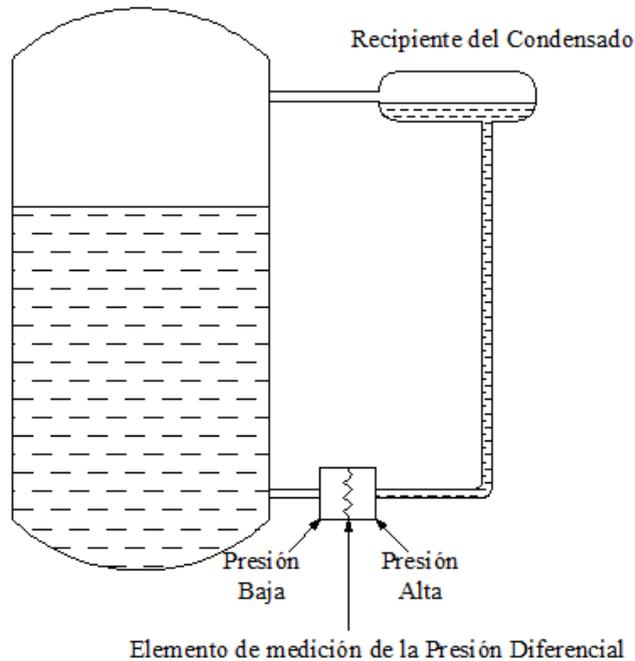


Figura 1.17 Medidor de presión diferencial.

Fuente: Medición de niveles antech
<http://mediciondenivelesantech.blogspot.com>

El empuje producido por el propio líquido lo aprovecha el medidor de desplazamiento a barra de torsión. Los instrumentos que utilizan características eléctricas del líquido se clasifican en:

- **Medidor resistivo:**

Consiste en uno o varios electrodos y un relé eléctrico o electrónico que es excitado cuando el líquido moja a dichos electrodos. El líquido debe ser lo suficientemente conductor como para excitar el circuito electrónico. Cuando el líquido moja los electrodos se cierra el circuito electrónico disponiendo el relé electrónico de un temporizador de retardo que impide su enclavamiento ante una ola del nivel del líquido o ante cualquier perturbación momentánea.

El instrumento se emplea como alarma o control de nivel alto y bajo, utiliza relés eléctricos para líquidos con buena conductividad y relés electrónicos para líquidos con baja conductividad.

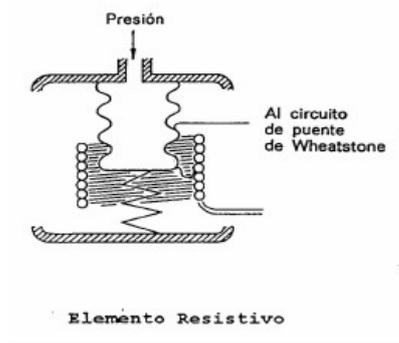


Figura 1.18 Medidor resistivo.

Fuente: Medición de niveles antech
<http://mediciondenivelesantech.blogspot.com>

- **Medidor conductivo:**

El medidor conductivo consiste en un electrodo dispuesto en el interior de unas placas puestas en conjunto y con el circuito eléctrico abierto. Cuando los sólidos alcanzan el aparato, se cierra el circuito y la pequeña corriente originada es amplificada actuando sobre un relé de alarma. Los sólidos deben poseer una conductividad eléctrica apreciable para poder excitar el circuito.

Este instrumento puede utilizarse en tanques abiertos y a presión, trabaja hasta temperaturas máximas de 300 °C, está limitado a materiales que tengan una conductividad de 1 a 1.4×10^{-7} mho y sólo puede emplearse como alarma de nivel

alto o niveles intermedios. Entre los materiales en los que se pueden emplear, figuran el carbón y el carbón activo.

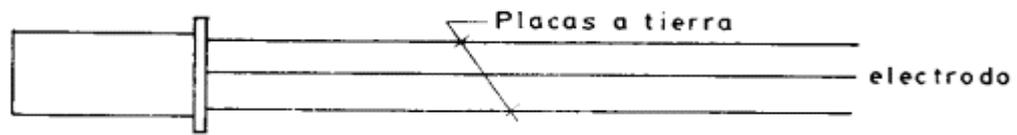


Figura 1.19 Medidor Conductivo.

Fuente: Medición de niveles antech
<http://mediciondenivelesantech.blogspot.com>

• Medidor capacitivo:

El medidor de nivel capacitivo es parecido al estudiado en la medición de nivel de los líquidos con la diferencia de que tiene más posibilidades de error por la mayor adherencia que puede presentar el sólido en la varilla capacitiva. La lectura viene influida además por las variaciones de densidad del sólido. La varilla del medidor está aislada y situada verticalmente en el tanque y bien asegurada mecánicamente para resistir la caída del producto y las fuerzas generadas en los deslizamientos internos.

La medida está limitada a materiales en forma granular o en polvo que sean buenos aislantes, la presión y temperatura máximas de servicio pueden ser de 50 bar y 150 °C, y el aparato debe calibrarse para cada tipo de material. Su precisión es de ± 15 mm aproximadamente

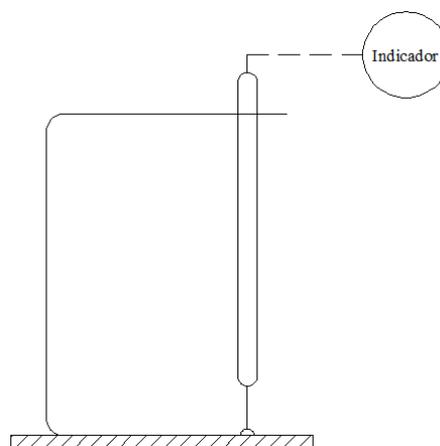


Figura 1.20 Medidor Capacitivo.

Fuente: Medición de niveles antech
<http://mediciondenivelesantech.blogspot.com>

• **Medidor ultrasónico:**

El medidor de nivel de ultrasonidos consiste en un emisor de ultrasonidos que envía un haz horizontal a un receptor colocado al otro lado del tanque. Si el nivel de sólidos está más bajo que el haz, el sistema entra en oscilación enclavando un relé. Cuando los sólidos interceptan el haz, el sistema deja de oscilar y el relé des-excita actuando sobre una alarma o sobre la maquinaria de descarga del depósito.

Disponiendo el haz de ultrasonidos en dirección vertical, el instrumento puede actuar como indicación continua del nivel midiendo el tiempo de tránsito de impulso ultrasónico, entre la fuente emisora, la superficie del producto donde se refleja y el receptor situado en la propia fuente.

Como la superficie de la mayor parte de los productos sólidos reflejan los ultrasonidos, ya sea en mayor o menor grado, el sistema es adecuado para la mayor parte de los sólidos con mucho polvo, alta humedad, humos o vibraciones, y puede emplearse tanto en materiales opacos como transparentes. Sin embargo, si la superficie del material no es nítida, el sistema es susceptible de dar señales erróneas.

El uso del ordenador permite resolver este inconveniente al almacenar el perfil ultrasónico del lecho del sólido e interpretarlo para obtener el nivel correcto del sólido, además de proporcionar características de auto comprobación del instrumento de medida.

El medidor de nivel de ultrasonidos tiene una precisión que varía de $\pm 0.15\%$ a $\pm 1\%$, puede construirse a prueba de explosión y trabajar a temperaturas de hasta $150\text{ }^{\circ}\text{C}$.

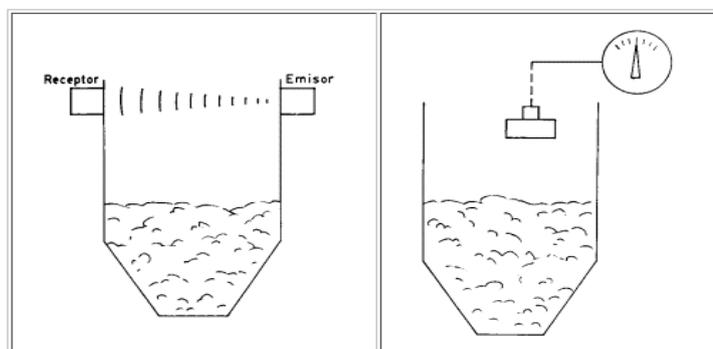


Figura 1.21 Medidor Ultrasónico.

Fuente: Medición de niveles antech
<http://mediciondenivelesantech.blogspot.com>

• Medidor de Radiación:

El medidor de nivel de radiación es parecido al instrumento utilizado en la determinación del nivel de líquidos. Consiste en una fuente radiactiva de rayos gamma, dispuesta al exterior y en la parte inferior del tanque, que emite su radiación a través del lecho de sólidos siendo captada por un detector exterior. El grado de radiación recibida depende del espesor de sólidos que se encuentra entre la fuente y el receptor. La fuente radiactiva y el receptor pueden disponerse también en un plano horizontal, en cuyo caso el aparato trabaja como detector continuo todo-nada.

El instrumento puede trabajar a altas temperaturas hasta unos 1300 °C, presiones máximas de 130 bar, en materiales peligrosos o corrosivos, no requiere ninguna abertura o conexión a través del tanque y admite control neumático o electrónico. Su precisión es de $\pm 1 \%$ y su campo de medida de 0.5 por cada fuente, pudiendo emplearse varias para aumentar el intervalo de medida del nivel.

Uno de sus inconvenientes es que es un sistema de coste elevado que necesita una supervisión periódica desde el punto de vista de seguridad, debe calibrarse para cada tanque y no puede aplicarse a materiales a los que afecte la radiactividad.

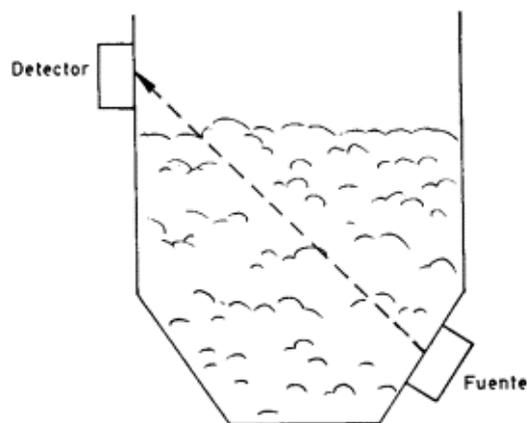


Figura 1.22 Medidor de Radiación.

Fuente: Medición de niveles antech
<http://mediciondenivelesantech.blogspot.com>

3 MEDICIÓN DE TEMPERATURA

3.1 INTRODUCCIÓN A LA MEDICIÓN DE TEMPERATURA

Para la medida de la temperatura tenemos que hacer uso de alguna propiedad física medible, que varíe con aquella. Cualquier instrumento utilizado para la medición de temperatura se denomina termómetro.

La temperatura es un parámetro termodinámico del estado de un sistema que caracteriza el calor, o transferencia de energía.

La escala de temperatura fundamental es la escala absoluta, termodinámica o grado Kelvin. El grado Kelvin ($^{\circ}\text{K}$) se define como la fracción $1/273.16$ de la temperatura absoluta del punto triple del agua.

El punto triple del agua es un punto fijo estándar en el cual los estados del agua, tales como líquido, sólido (hielo), y gaseoso (vapor) están en equilibrio. Normalmente se utilizan dos escalas de temperatura empírica: La escala Celsius y la Fahrenheit. Estas escalas están basadas en dos puntos fijos.

3.2 TIPOS DE MEDIDORES DE TEMPERATURA

- Termocupla:

Un termopar es un dispositivo capaz de convertir la energía calorífica en energía eléctrica. Su funcionamiento se basa en los descubrimientos hechos por Thomas Seebeck en 1821 cuando hizo circular corriente eléctrica en un circuito, formado por dos metales diferentes cuyas uniones se mantienen a diferentes temperaturas, esta circulación de corriente obedece a dos efectos termoeléctricos combinados, el efecto Peltier que provoca la liberación o absorción de calor en la unión de dos metales diferentes cuando una corriente circula a través de la unión y el efecto Thomson que consiste en la liberación o absorción de calor cuando una corriente circula a través de un metal homogéneo en el que existe un gradiente de temperaturas.



Figura 1.23 Termocupla formada por dos metales diferentes.

Fuente: Instrumentación industrial/medición de nivel
<http://sapiens.itgo.com>

Existen una infinidad de tipos de termocuplas, pero casi el 90% de las termocuplas utilizadas son del tipo *J* o del tipo *K*.

TERMOCUPLAS MAS COMUNES

TC	Cable + Aleación	Cable - Aleación	Rango (°C)		Volt. max. (°C)
			Mínimo	Máximo	
J	Hierro	Cobre/Níquel	-180	750	42.2
K	Níquel/Cromo	Níquel/aluminio	-180	1372	54.8
T	Cobre	Cobre/Níquel	-250	400	20.8
R	87% Platino	100% Platino	0,1767		21.09
	13% Rhodio				
S	90% Platino	100% Platino	0,1767		18.68
	10% Rodio				
B	70% Platino	94% Platino	0,182		13.814
	30% Platino	6% Rhodio			

Figura 1.24 Termocuplas más comunes.

Fuente: Instrumentación industrial/medición de nivel
<http://sapiens.itgo.com>

- **Detectores de temperatura resistivos:**

Los detectores de temperatura basados en la variación de una resistencia eléctrica se suelen designar con sus siglas inglesas RTD (Resistance Temperature Detector). Dado que el material empleado con mayor frecuencia para esta finalidad es el platino, se habla a veces de PRT (Platinum Resistance Thermometer).

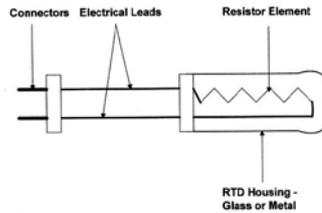


Figura 1.25 Detector de temperatura resistivo.

Fuente: Departamento de electrónica, Universidad Técnica Federico Santa María, Chile
<http://profesores.elo.utfsm.cl/~jgb/termomC.pdf>

Sensores de Temperatura RTD - PT100

Un Pt100 es un sensor de temperatura. Consiste en un alambre de platino que a 0 °C tiene 100 ohms y que al aumentar la temperatura aumenta su resistencia eléctrica.

El incremento de la resistencia no es lineal pero sí creciente y característico del platino de tal forma que mediante tablas es posible encontrar la temperatura exacta a la que corresponde.

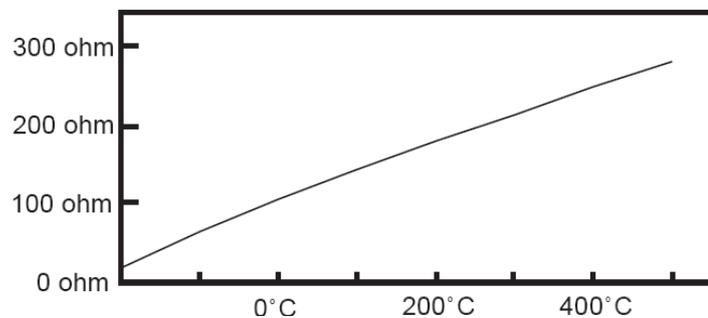


Figura 1.26 Curva característica de un Sensor PT100

Fuente: <http://www.arian.cl/downloads/nt-004.pdf>

Un Pt100 es un tipo particular de RTD (Dispositivo Termo Resistivo).

Normalmente las Pt100 industriales se consiguen encapsuladas en la misma forma que las termocuplas, es decir dentro de un tubo de acero inoxidable u otro material (vainas), en un extremo está el elemento sensible (alambre de platino) y en el otro está el terminal eléctrico de los cables protegido dentro de una caja redonda de aluminio (cabezal).



Figura 1.27 Modelos de Sensores de temperatura RTD Fuente: <http://www.alphatemp.tech.co.uk/acatalog/allindustrial.gif>

Ventajas del PT-100

Por otra parte los Pt100 siendo levemente más costosos y mecánicamente no tan rígidos como las termocuplas, las superan especialmente en aplicaciones de bajas temperaturas. (-100 a 200 °).

Los Pt100 pueden fácilmente entregar precisiones de una décima de grado con la ventaja que la Pt100 no se descompone gradualmente entregando lecturas erróneas, si no que normalmente se abre, con lo cual el dispositivo medidor detecta inmediatamente la falla del sensor y da aviso.

Este comportamiento es una gran ventaja en usos como cámaras frigoríficas donde una desviación no detectada de la temperatura podría producir algún daño grave.

Además la Pt100 puede ser colocada a cierta distancia del medidor sin mayor problema (hasta unos 30 metros) utilizando cable de cobre convencional para hacer la extensión.

CAPITULO # II

DESCRIPCIÓN DE LOS MÓDULOS DE CONTROL DE TEMPERATURA Y NIVEL

En este capítulo se describe el modo de funcionamiento de cada uno de los módulos utilizados para el aprendizaje de control automático.

1. MÓDULO DE CONTROL DE NIVEL

El funcionamiento del módulo de control de nivel es muy simple.

En la figura 2.1, se puede observar que contamos con un depósito donde se almacenará un fluido y la cantidad del mismo se controlará por medio de un sistema de control elaborado en MATLAB, que transmitirá una señal al módulo por medio de una tarjeta de interfaz conectada a la computadora. La bomba pasará el fluido desde el depósito en la parte inferior hasta el tanque donde se va a fijar el nivel del fluido.

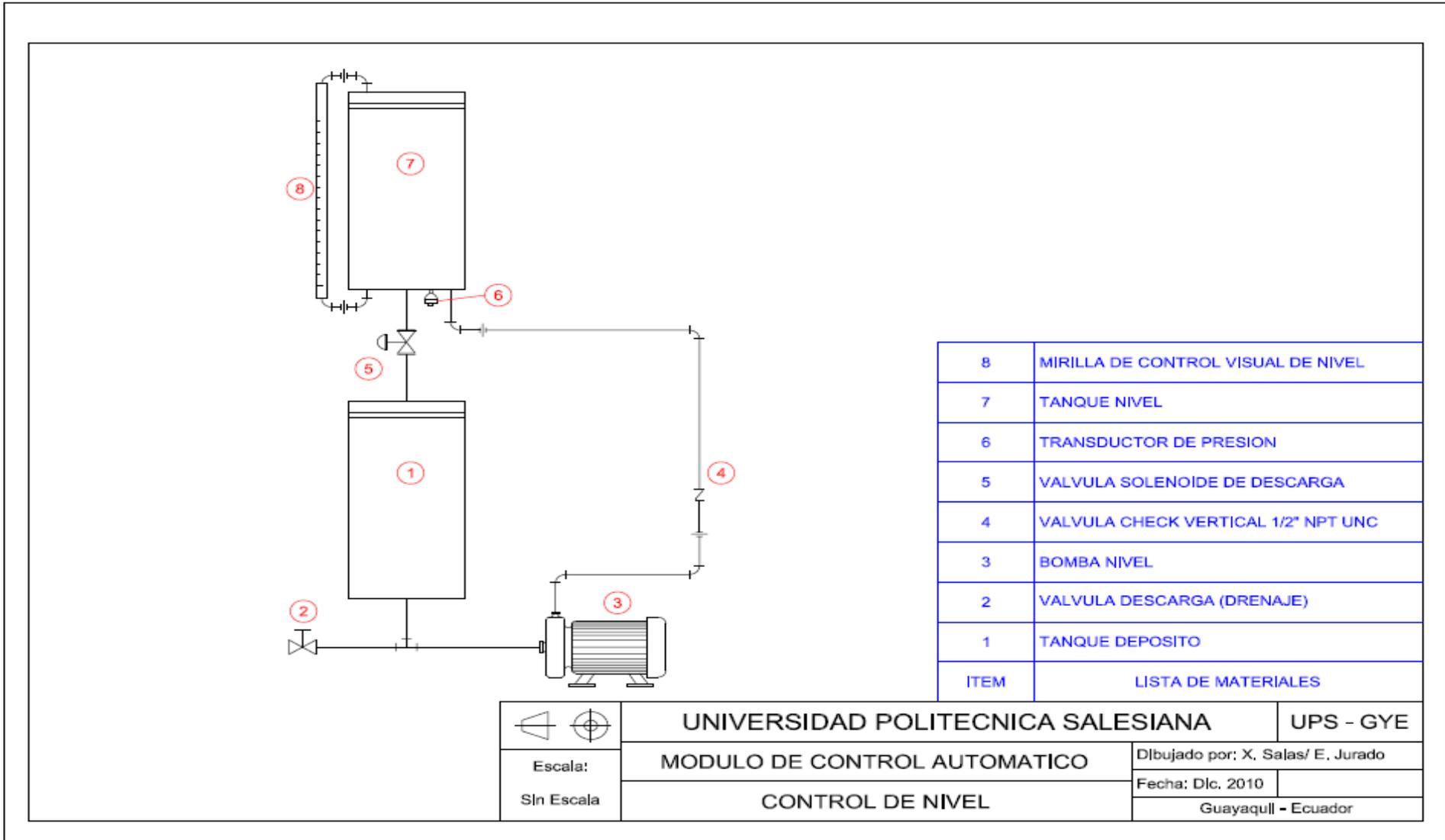


Figura 2.1 Diagrama Esquemático de funcionamiento Fuente: Autores



Figura 2.2 Módulo de nivel Fuente: Autores

En la parte inferior del tanque de proceso estará dispuesto el transmisor de presión, este enviará una señal analógica que varía de 4 – 20mA que depende de la presión que el agua ejerza sobre el transmisor y a su vez, de la altura del nivel del tanque de proceso, esta señal va a la tarjeta de interfaz y a su vez, será una señal de retroalimentación para el sistema con lo cual se cierra el lazo de control. De esta manera se asegura que se alcanza el nivel.

El modulo de control de nivel consta de los siguientes equipos:

- 1 Tanque para depósito del líquido
- 1 Tanque para el control de proceso
- 1 Bomba 110v
- 1 Válvula Solenoide
- 1 Transmisor de Presión
- Tubería y acoples

1.1 TANQUES

Los Tanques a usar en este modulo serán de acero inoxidable en el contorno y en el interior de una aleación de plástico reforzado.

Tanque de Depósito

Medidas

Altura 25cm

Diámetro 21cm



Figura 2.3 Tanque de alimentación Fuente: Autores

Tanque de Control de Nivel

Medidas

Altura 20cm

Diámetro 21cm



Figura 2.4 Tanque de Proceso Fuente: Autores

1.2 BOMBA

Bomba marca PEDROLLO



Figura 2.5 Bomba de succión PEDROLLO Fuente: Autores

Voltaje	110AC	Qmax	40 li/min
Potencia	0,5HP	Corriente	3,4A
Frecuencia	60Hz	Hmax	40m

La función de la bomba será succionar el agua del Tanque de reserva y descargar el agua en el Tanque de control de nivel.

1.3 VÁLVULA SOLENOIDE

Válvula solenoide, mostrada en la figura.



Figura 2.6 Válvula solenoide Fuente: Autores

Conexión	1/2"
Alimentación	110VAC
Posición	NC

La válvula solenoide está montada en la descarga del Tanque de control de nivel.

1.4 TRANSMISOR DE PRESIÓN

El transmisor de presión está montado en la parte inferior del Tanque de control de nivel.



Figura 2.7 Transmisor de Presión Fuente: Autores

Salida	4-20ma
Alimentación	24VDC
Rango	0 – 5 psig

1.5 TUBERÍAS Y ACOPLÉS

El tubo indicador del nivel en el tanque es un vidrio de 2 milímetros de espesor y esta sellado en la tubería para que no exista fuga.

Tubo
Indicador de
Nivel



Figura 2.8 Tubo indicador de nivel con graduación Fuente: Autores

La tubería montada es de Polipropileno de 1/2", se tiene conectada dos válvulas check en la tubería que comprende el tramo de la bomba hacia el tanque de control de nivel para impedir el retorno del líquido cuando se apague la bomba.

Tubería de 1/2"
Polipropileno

Válvula Check
1/2" Horizontal



Válvula Check
1/2" Vertical

Figura 2.9 Bomba de carga del sistema Fuente: Autores

2. MODULO DE CONTROL DE TEMPERATURA

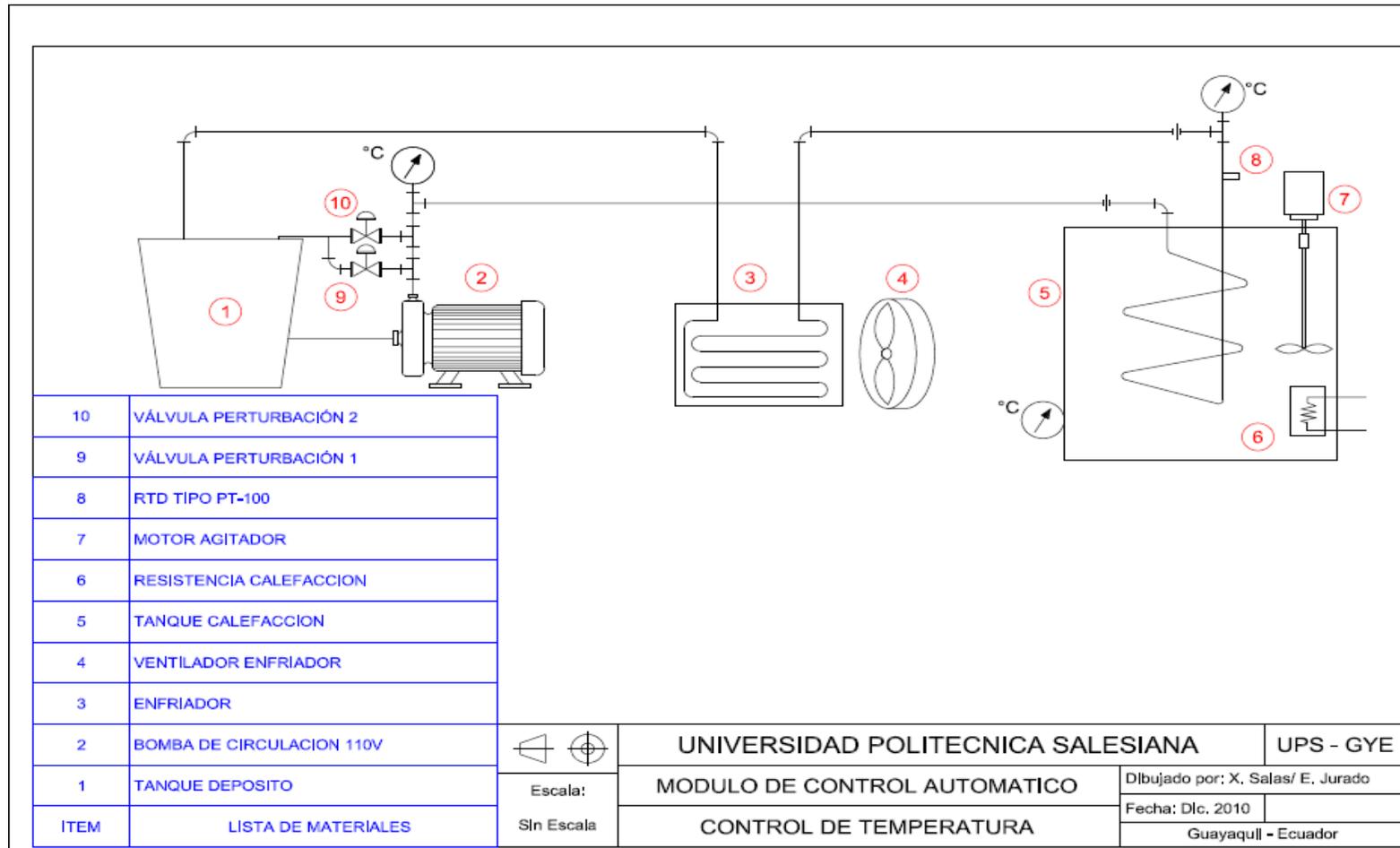


Figura 2.10 Diagrama de Funcionamiento Módulo de Control de Temperatura Fuente: Autores

Funcionamiento:



Figura 2.11 Tuberías del Sistema Fuente: Autores

Se puede observar que contamos con un tanque de calefacción por el cual recorre un fluido por medio de una tubería de cobre, esta tubería se calentará por el agua del tanque que está siendo sometida a calor gradualmente por una resistencia eléctrica y la variación de la misma se controlará por medio de un sistema de control elaborado en MATLAB, que transmitirá una señal al módulo por medio de una tarjeta de interfaz conectada a la computadora. La bomba pasará el fluido desde el depósito hasta el tanque donde se va a calentar el fluido. Dos válvulas solenoides harán la función de perturbación para análisis del flujo con respecto a la temperatura.

Para asegurar que se alcance una confiabilidad mayor en el control de temperatura se dispone de un agitador que permita tener una temperatura más homogénea en el tanque, así como un refrigerante en el sistema de retorno para no acumular calor en el tanque de depósito que pueda distorsionar la respuesta esperada.

En la parte superior del tanque de calefacción estará dispuesto el transmisor de temperatura, este enviará una señal analógica a la tarjeta de interfaz y a su vez, será una señal de retroalimentación para el sistema con lo cual se cierra el lazo de control.

De esta manera se asegura que se alcanza la temperatura deseada.

El módulo de control de temperatura consta de los siguientes equipos:

1 Tanque de depósito del líquido

1 Tanque de calefacción

1 Bomba 110v

1 Agitador

2 Válvula Solenoide

1 Sensor inductivo

1 Tacómetro

1 Resistencia eléctrica

1 Ventilador

1 radiador

1 PT100

1 Termómetro

Tubería y acoples

2.1 TANQUES

El Tanque a usar en este modulo como depósito de agua será de una aleación en el contorno y en el interior de plástico reforzado, mostrado en la figura.



Figura 2.12 Tanque de Alimentación Fuente: Autores

El Tanque de calefacción a usar en este modulo será de acero inoxidable en el contorno y en el interior, mostrado en la figura.



Figura 2.13 Tanque de Calefacción Fuente: Autores

2.2 BOMBA

Bomba marca TEKNO



Figura 2.14 Bomba de circulación TEKNO Fuente: Autores

Voltaje	110AC	Qmax	40 li/min
Potencia	0,5HP	Corriente	3,4A
Frecuencia	60Hz	Hmax	40m

La función de la bomba será succionar el agua del Tanque de depósito y recircular el agua hacia el Tanque de calefacción.

2.3 AGITADOR

Agitador, mostrado en la figura



Figura 2.15 Agitador Fuente: Autores

Voltaje	110AC
Frecuencia	60Hz
Potencia	0.5 HP
RPM	1150

La función del Motor será mover una paleta que agitará el agua en el tanque de calefacción.

2.4 VÁLVULAS SOLENOIDES

Válvulas solenoides, mostradas en la figura.



Figura 2.16 Válvulas solenoides Fuente: Autores

Conexión	1/4" NPT
Alimentación	110VAC
Posición	NC

Las válvulas solenoides están montadas en el tramo de la tubería que va de la bomba hacia el tanque de recirculación.

2.5 SENSOR INDUCTIVO

Sensor inductivo, mostrado en la figura.



Figura 2.17 Sensor Inductivo Fuente: Autor

El sensor va instalado en la carcasa del ventilador de la bomba este censará una placa de metal montada en la paleta de la bomba y emitirá una señal de pulsos de acuerdo a la velocidad que tome la bomba y se enviará esta señal al tacómetro.

2.6 TACÓMETRO

Tacómetro, mostrado en la figura.



Figura 2.18 Tacómetro Fuente: Autores

El tacómetro nos mostrará las revoluciones por minuto que tiene la bomba de recirculación de agua hacia el tanque de calefacción.

2.7 ENFRIADOR

Refrigerante, mostrado en la figura.



Figura 2.19 Enfriador Fuente: Autores

El enfriador está compuesto por un ventilador y un serpentín , todos dos acoplados en el retorno del agua hacia el tanque de depósito, el objetivo es no acumular

temperaturas altas en el tanque de depósito por lo que podría distorsionar el valor deseado en la prueba.

2.8 RESISTENCIA ELÉCTRICA

Resistencia, mostrada en la figura.



Figura 2.20 Resistencia Eléctrica Fuente: Autores

La resistencia eléctrica de 2400 watts y alimentada a 220vac se encargará de calentar el agua en el tanque de calefacción.

2.9 TUBERÍA Y ACCESORIOS

Tubería, mostrada en la figura.



Figura 2.21 Tuberías del Sistema Fuente: Autores

3. SISTEMA DE CONTROL.

3.1 INTRODUCCION AL MATLAB

El nombre de MATLAB proviene de la contracción de los términos MATrix LABoratory y fue concebido para el fácil acceso a las librerías que son de gran importancia en el campo de la computación y el cálculo matricial.

MATLAB es un entorno de computación y desarrollo de aplicaciones totalmente integrado, orientado para el desarrollo de proyectos con elevados cálculos matemáticos y la visualización gráfica de los mismos. MATLAB entrega análisis numérico, cálculo matricial, procesado de señal, todo ello en un entorno fácil para el usuario.

Tanto en el mundo universitario como en el industrial, MATLAB se ha convertido en una herramienta básica para la resolución de complejos problemas matemáticos en diferentes áreas como la computación, el cálculo numérico, prototipaje algorítmico, teoría de control automático, estadística, etc.

3.1.1 ENTORNO EN TIEMPO REAL CON MATLAB

MATLAB presenta una aplicación para hacer simulaciones en tiempo real, la toolbox Real Time Windows Target. Esta herramienta permite realizar aplicaciones de control y simulaciones en tiempo real para plantas físicas, como puede ser el caso que nos ocupa: Modulo de control de nivel y Modulo de control de Temperatura.

3.1.2 REAL TIME WINDOWS TARGET

Real Time Windows Target es una herramienta de MATLAB que permite capturar y generar señales en tiempo real mediante diagramas de bloques generados con Simulink. Además, se pueden visualizar estas señales, cambiando y controlando parámetros, todo en tiempo real. Para hacerlo posible tiene que haber un elemento físico que interactúe entre simulink y el elemento exterior que queremos controlar, recoger señales, este elemento es la placa de adquisición de datos DAQ, que es la que permite operar con señales de entrada y/o salidas analógicas y digitales.

La integración entre Simulink en modo externo y Real Time Windows Target permite utilizar el modelo de Simulink con una interfaz gráfica para:

- Visualización de señales: se puede utilizar el bloque "Scope" para visualizar señales en tiempo real.
- Ajuste de parámetros: se realiza mediante las cajas de diálogo de los bloques en Simulink durante la ejecución en tiempo real.

3.1.3 KERNEL

Un componente clave del Real Time Windows Target es un Kernel en tiempo real que hace de interfaz con el sistema operativo Windows para asegurar que la aplicación en tiempo real se está ejecutando en el tiempo de muestreo seleccionado. El kernel asigna la prioridad más elevada de ejecución para la aplicación en tiempo real, y lo hace utilizando el reloj interno del ordenador como fuente principal de tiempo.

- Interrupciones de tiempo: el kernel intercepta la interrupción del reloj del PC antes que el sistema operativo Windows la reciba, y bloquea cualquier llamada al sistema operativo. Entonces, el kernel utiliza la interrupción para iniciar la ejecución del modelo compilado. Para garantizar un periodo de muestreo preciso el kernel reprograma el reloj del PC a una frecuencia mayor. Debido a que el reloj del PC es también la principal fuente de tiempo para el sistema operativo, el kernel envía una interrupción al sistema operativo manteniendo la tasa de interrupción inicial.
- Planificador: las interrupciones hacen de base de tiempo para un sencillo planificador que se encarga de ejecutar las aplicaciones en tiempo real. El número de tareas es igual al número de períodos de muestreo utilizados en el modelo, configurado en modo multitasking.

- Comunicación con hardware: el kernel hace de interfaz y comunica con el hardware de E/S utilizando los correspondientes drivers que comprueban que la instalación de la placa DAQ sea correcta. En el caso que esto no suceda, no se nos permitirá ejecutar la aplicación en tiempo real.
- Simulink en modo externo: la comunicación entre simulink y la aplicación en tiempo real se hace mediante Simulink con el modo External. Este es un módulo que se comunica directamente con el kernel y es utilizado para comenzar una aplicación en tiempo real, cambiar parámetros, recuperar datos del bloque Scope.
- Compilador de C incorporado: las aplicaciones de Real Time Windows Target pueden ser compiladas con LCC (solo C), que es el que viene por defecto con MATLAB.

3.1.4 SIMULINK

Simulink es un entorno de programación visual, que funciona sobre el entorno de programación Matlab.

Es un entorno de programación de más alto nivel de abstracción que el lenguaje interpretado Matlab (archivos con extensión .m). Simulink genera archivos con extensión .mdl (de "model").

En las imágenes, se puede apreciar el diagrama en bloques de un Radar, en el cuál se muestra que uno de sus bloques de procesamiento de señal, es un filtro Kalman realizado en un script de Matlab.

Luego, se puede apreciar un sistema de control automático, junto a su modelización y finalmente un sistema de un automóvil, vinculando la simulación a un entorno de realidad virtual.

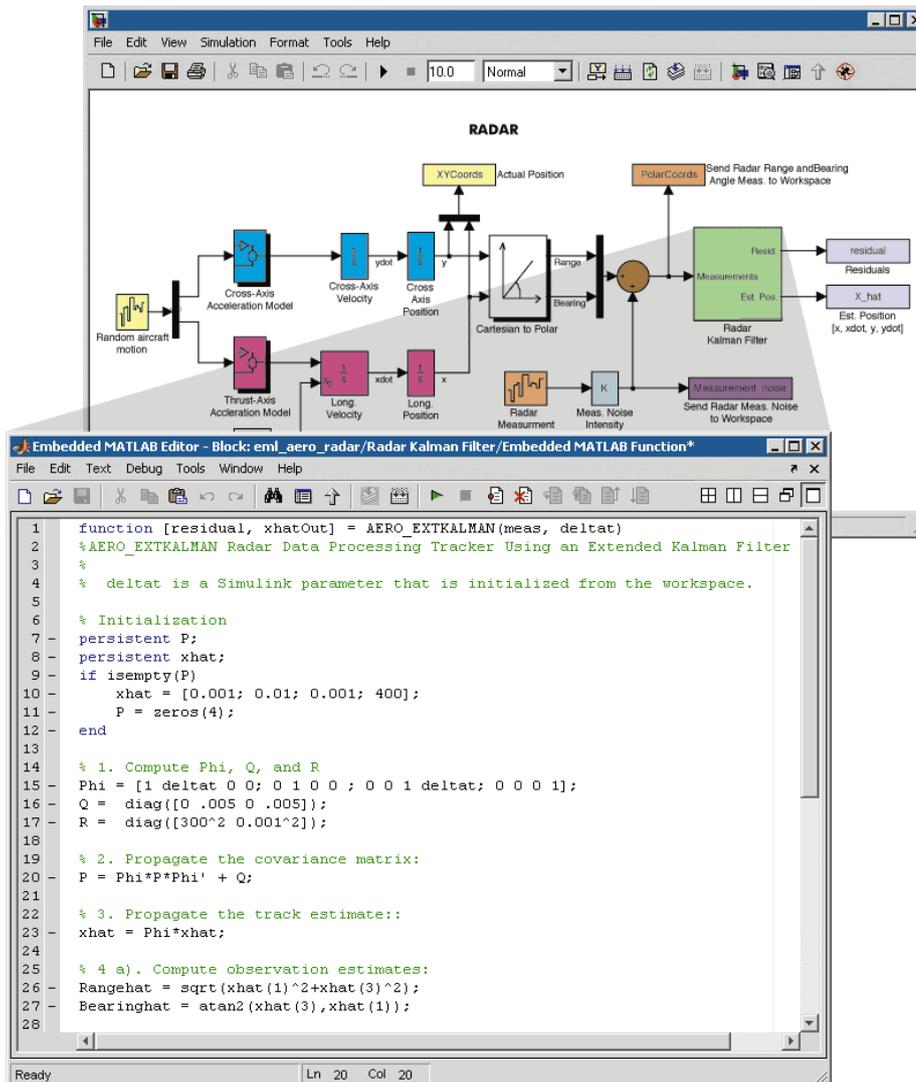


Figura 2.22 Diagrama de bloques de un radar

Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Simulink>

Simulink viene a ser una herramienta de simulación de modelos o sistemas, con cierto grado de abstracción de los fenómenos físicos involucrados en los mismos. Se hace hincapié en el análisis de sucesos, a través de la concepción de sistemas (cajas negras que realizan alguna operación).

Se emplea arduamente en Ingeniería Electrónica en temas relacionados con el procesamiento digital de señales (DSP), involucrando temas específicos de ingeniería biomédica, telecomunicaciones, entre otros. También es muy utilizado en Ingeniería de Control y Robótica.

3.1.5 CARACTERÍSTICAS DEL PC

El PC aloja en su interior la tarjeta de adquisición de datos, los drivers de la misma, el programa MATLAB, la aplicación en tiempo real, y simulink. Las características de la computadora y su sistema operativo son:

- Procesador INTEL PENTIUM 4 a 1,80 GHz
- 512 MB de RAM
- WINDOWS 2000 (Service Pack 4)
- MATLAB R2006a v7.2.0.232
- SIMULINK R2006a v6.4

Hay que decir que estas características contribuirán a la restricción del tiempo de muestreo máximo, el número máximo de bloques en simulink o por ejemplo la velocidad de compilación de la aplicación durante el desarrollo, entre otros.

3.2 TARJETA DE INTERFAZ

La tarjeta PCI 6024E pertenece a las opciones de herramientas académicas que ofrece Matlab, está diseñada para aplicaciones de laboratorio y pruebas, sin embargo proporciona gran confiabilidad al alcanzar grandes tasas de velocidad de adquisición de datos. Estas tarjetas representan una opción económica para el uso dentro de laboratorios y para el desarrollo de aplicaciones a nivel estudiantil. Son compatibles con todos los sistemas operativos, además son de fácil instalación, requieren poco mantenimiento, solo se requiere un puerto PCI disponible dentro del computador para su instalación. La tarjeta PCI 6024E viene equipada con un bus de datos para transportación de las señales, y con un bloque conector CB-68LP para facilitar las conexiones externas. En la figura 2.23 observamos el juego completo que incluye la tarjeta de adquisición PCI 6024E, el cable R6868, y el bloque conector CB-68LP.



Figura 2.23 Tarjeta de adquisición de datos Fuente: Autores

Para este proyecto se utiliza un cable de interfaz de National Instruments SH68-68-EP y un bloque conector National Instruments SCB68 que son dispositivos diseñados para aplicaciones prácticas.

Estas tarjetas de adquisición de datos tienen un rango de entrada bipolar que cambia de acuerdo a una ganancia programada. Cada canal puede ser programado con una ganancia única de 0.5, 1.0, 10, o 100 para maximizar la resolución del convertidor análogo-digital de 12 bits. Con la configuración de ganancia apropiada se puede hacer uso de la resolución completa del convertidor analógico a digital ADC para medir las señales de entrada. La Tabla 2.1 muestra el rango de entrada y la precisión de acuerdo a la ganancia usada.

Ganancia	Rango de Voltaje de Entrada	Precisión
0.5	-10 a 10 V	4.88 mV
1	-5 a 5 V	2.44 mV
10	-500 a 500 mV	244.14 μ V
100	-50 a 50 mV	24.41 μ V

Las tarjetas suministran 2 canales de salida de voltaje analógico en el conector de Entrada / Salida. El rango bipolar es de -10V hasta +10V. Los datos escritos al DAC, convertidor digital analógico son interpretados en formato de complemento de dos.

Adicionalmente las tarjetas contienen 8 líneas de Entrada /Salida digital (DIO<0...7>) de propósito general. Individualmente se puede configurar cada línea ya sea como entrada o salida digital.

La tarjeta de adquisición de datos dentro de la planta de control de nivel se encarga de adquirir la señal que representa el valor de nivel de líquido en el tanque, y que es proporcionada por el transmisor de presión. Del mismo modo la tarjeta de adquisición de datos se encarga de generar la señal de salida del controlador ejecutado con el programa Matlab. Físicamente la tarjeta PCI 6024E está alojada en el puerto PCI del computador. Las conexiones desde y hacia los distintos dispositivos se realizan en el bloque conector y las señales son enviadas hasta la tarjeta por medio del cable R6868.

3.2.1 DESCRIPCION DE LA PLACA DE ADQUISICION DE DATOS NI PCI-6024 E

Las características de la placa son las siguientes:

- 16 canales de entrada analógica (8 diferenciales)
- 2 canales de salida analógica
- 8 líneas de entrada/salida digital
- Conector de 86 pines
- Sistema de control de tiempo propio (DAQ-STC). Consta de tres grupos para control de entradas y salidas analógicas, y para funciones de contador para propósitos generales. Estos grupos incluyen un total de siete contadores de 24 bits y tres de 16 bits con una resolución máxima de tiempo de 50ns.
- Sistema específico que permite la sincronización de varias funciones de medida a un mismo disparo o evento de reloj, y lo hacen mediante los sistemas de bus de integración en tiempo real (Real-Time System Integration, RTSI).
- Conexión a bus de PC mediante ranura PCI.

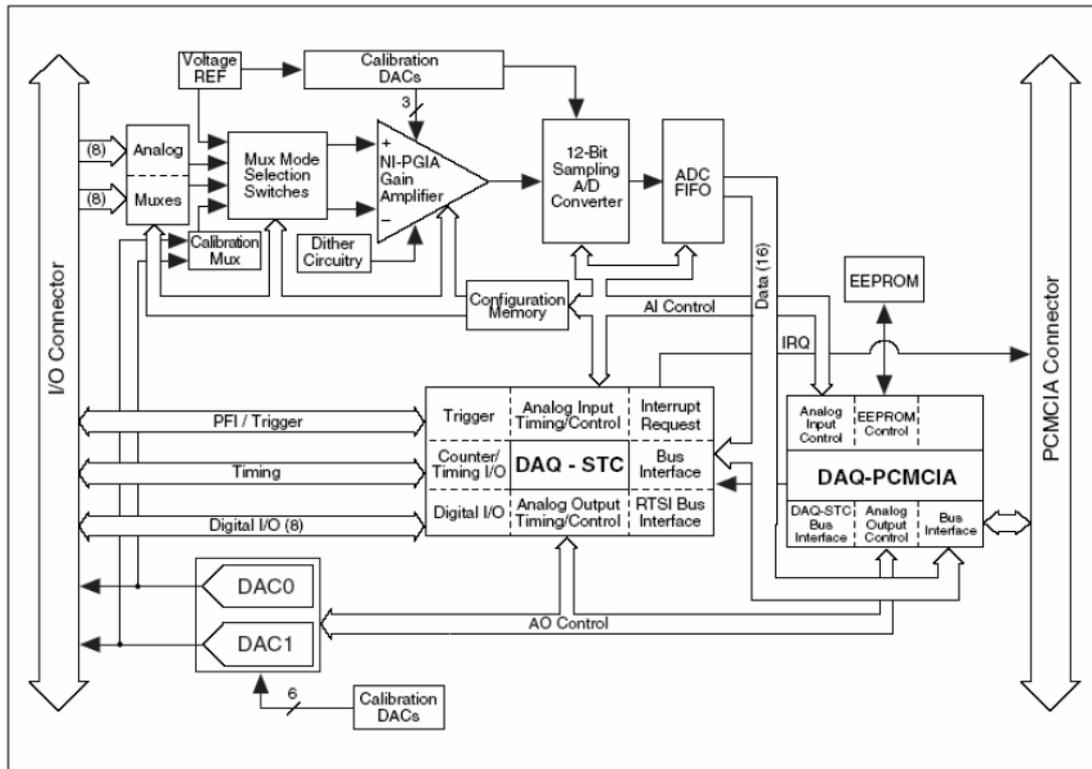


Figura 2.24 Diagrama de bloques de la PCI-6024E Fuente: "6023E/6024E/6025E User Manual", DAQ, National Instruments, 2000.

Para hacer funcionar la placa DAQ es necesario tener los drivers e instalarlos en el PC para poder trabajar en el entorno de Matlab, la Toolbox Real-Time es la encargada de detectar automáticamente el dispositivo para darle funcionalidad.

3.2.2 CONEXIÓN ENTRADA/SALIDA

A continuación se muestra la disposición de pines de la placa de adquisición de datos, así como una breve descripción de las entradas/salidas y sus rangos.

ACH8	34	68	ACH0
ACH1	33	67	AIGND
AIGND	32	66	ACH9
ACH10	31	65	ACH2
ACH3	30	64	AIGND
AIGND	29	63	ACH11
ACH4	28	62	AISENSE
AIGND	27	61	ACH12
ACH13	26	60	ACH5
ACH6	25	59	AIGND
AIGND	24	58	ACH14
ACH16	23	57	ACH7
DAC0OUT1	22	56	AIGND
DAC1OUT1	21	55	AOGND
RESERVED	20	54	AOGND
DIO4	19	53	DGND
DGND	18	52	DIO0
DIO1	17	51	DIO5
DIO6	16	50	DGND
DGND	15	49	DIO2
+5V	14	48	DIO7
DGND	13	47	DIO3
DGND	12	46	SCANCLK
PF10/TRIG1	11	45	EXTSTROBE*
PF11/TRIG2	10	44	DGND
DGND	9	43	PF12/CONVERT*
+5V	8	42	PF13/GPCTR1_SOURCE
DGND	7	41	PF14/GPCTR1_GATE
PF15/UPDATE*	6	40	GPCTR1_OUT
PF16/WFTRIG	5	39	DGND
DGND	4	38	PF17/STARTSCAN
PF19/GPCTR0_GATE	3	37	PF18/GPCTR0_SOURCE
GPCTR0_OUT	2	36	DGND
FREQ_OUT	1	35	DGND

* No disponible para Tarjeta 6023E

Figura 2.25 Terminales del conector de la placa de adquisición de datos Fuente: Autores

Terminal	Complemento	Función	Descripción
AIGND			Entrada de Tierra Analoga. Estos pines son el punto de referencia para la medida simple (single ended) en la configuración RSE y el punto de retorno para la medición diferencial. Todas las referencias AIGND,AOGND y DGND están contenidas en tu dispositivo.
ACH(0...15)	AIGND	Entrada	Entradas analógicas en canales desde el 0 al 15, Puedes configurar cada par de canales, ACH<i>i,j+</i>(i=0...7), para operaciones diferenciales o dos entradas simples referenciadas a Tierra.
AISENSE	AIGND	Entrada	Entrada Analógica para sensor. Este terminal sirve como nodo de referencia para cualquiera de los ACH 0...15 en configuración NRSE
DACOUT	AOGND	Salida	Salida Analoga de canal 0, este terminal suministra de un voltaje analógico para la salida del canal 0
DAC1OUT	AOGND	Salida	Salida Analoga de canal 1, este terminal suministra de un voltaje analógico para la salida del canal 1
AOGND			Referencia para salida analógica. Los voltajes de salida análogo son referenciados a este punto. Todas las referencias a tierra AIGND,AOGND y DGND están conectadas juntas en tu dispositivo
DGND			Referencia Digital. Este pin es la referencia para las señales de e/s en el conector así como para el suministro de 5V. Todas las referencias a tierra AIGND,AOGND y DGND están conectadas juntas en tu dispositivo
DIO(0...7)	DGND	Entrada o Salida	Señales Digitales E/S. DIO6 y 7 pueden controlar la subida y bajada de señal de propósito general para los contadores 0 y 1 respectivamente.
+5V	DGND	Salida	Suministro de voltaje de 5V, estos pines tienen un fusible de 5V a 1A. El fusible es de auto ajuste.

Figura 2.26 Descripción de las señales de entrada y salida Fuente: Autores

CAPITULO # III

IDENTIFICACIÓN DE LOS MÓDULOS DE CONTROL DE TEMPERATURA Y NIVEL

Es importante en toda planta de proceso tener en consideración las dimensiones de las mismas, ya que de esto dependen todas las variables que intervienen en la misma. Por esta razón, se debe considerar siempre el dimensionamiento dentro del diseño del controlador, ya que el tiempo de respuesta es el factor más dependiente del dimensionamiento de la planta y de este se deriva la construcción de un sistema que logre un alto performance en el control de la planta.

1. INTRODUCCIÓN A LA IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS.

Para la identificación de sistemas es necesario entender cómo trabaja cada actuador y cuáles son los tiempos de respuesta de cada sistema, y para esto matlab cuenta con una excelente herramienta que se denomina “identification tool”, con la cual podemos definir qué tipo de modelo es la planta y en base a esto podemos escoger el mejor tipo de controlador para la misma.

En todo sistema podemos distinguir tres tipos de señales que son:

Señales de entrada: Son aquellas señales que pueden ser controladas y de las cuales depende básicamente el funcionamiento del sistema.

Señales de salida: Son señales que nos indican como se está comportando el sistema.

Señales de perturbación: Son señales que afectan el comportamiento del sistema pero que no pueden ser controladas.

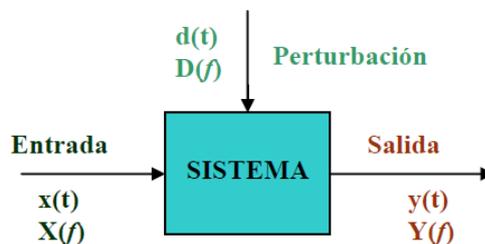


Figura 3.1 Representación de Señales de un sistema Fuente: Autores

Las señales del sistema están en el dominio del tiempo pero pueden ser manipuladas matemáticamente para llevarlas al dominio de la frecuencia. Aunque, para efecto de identificación las señales son muestreadas solo a tiempos discretos que usualmente están igualmente distanciados en unidades de tiempo. En consecuencia el problema del modelamiento es describir como están relacionadas las señales entre sí. La relación básica entre las señales es una ecuación diferencial lineal.

Matemáticamente notamos que la salida al instante t puede ser calculada como una combinación lineal de las entradas y salidas anteriores. Esta dependencia de lo que sucedió anteriormente es lo que se entiende por dinámica. En consecuencia, el problema de la identificación de un sistema consiste en determinar los coeficientes de cualquiera de las dos ecuaciones previas.

2. ADQUISICIÓN DE DATOS.

Para la adquisición de datos se utiliza la tarjeta PCI 6024-E, manufacturada por *National Instruments*, la misma que puede trabajar como interface entre un modelo de control elaborado en plataforma *Simulink-Matlab* y la planta de proceso. Esta misma tarjeta cuenta con una herramienta para realizar un test tanto de las entradas

como de las salidas de la planta, denominada “*Measurement & Automation*”, con la cual podemos establecer el tiempo de respuesta de cada uno de los componentes de la planta. Este programa viene adjunto a la tarjeta de adquisición de datos y su uso es muy simple.

El icono de acceso directo de este programa suele estar en el escritorio



Figura 3.2 Vista del escritorio

Fuente: Autores

Encontramos la carpeta Devices and interfaces, donde seleccionamos la tarjeta PCI-6024 E

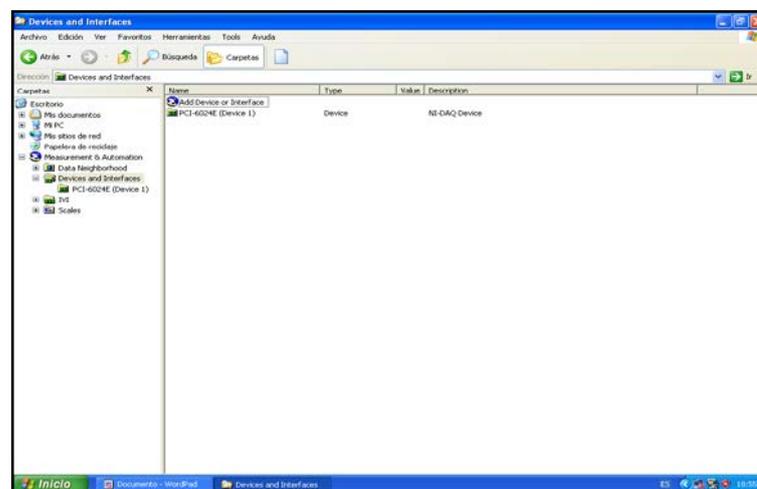


Figura 3.3 Vista de Devices & Interfaces

Fuente: Autores

Dando un click derecho en la tarjeta PCI-6024 E accedemos al test panel.

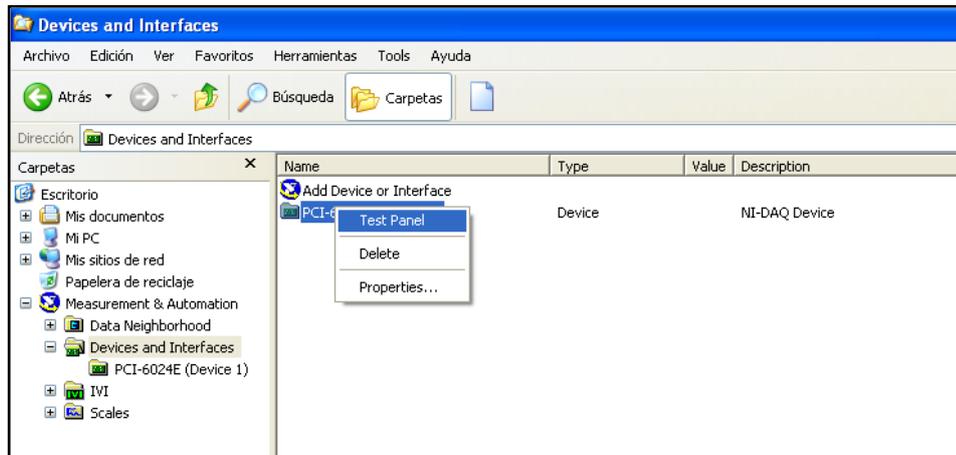


Figura 3.4 Apertura de test panel

Fuente: Autores

Aquí encontramos la ventana para entradas análogas, donde podemos escoger el canal de entrada de medición y el valor de la entrada en tiempo real.

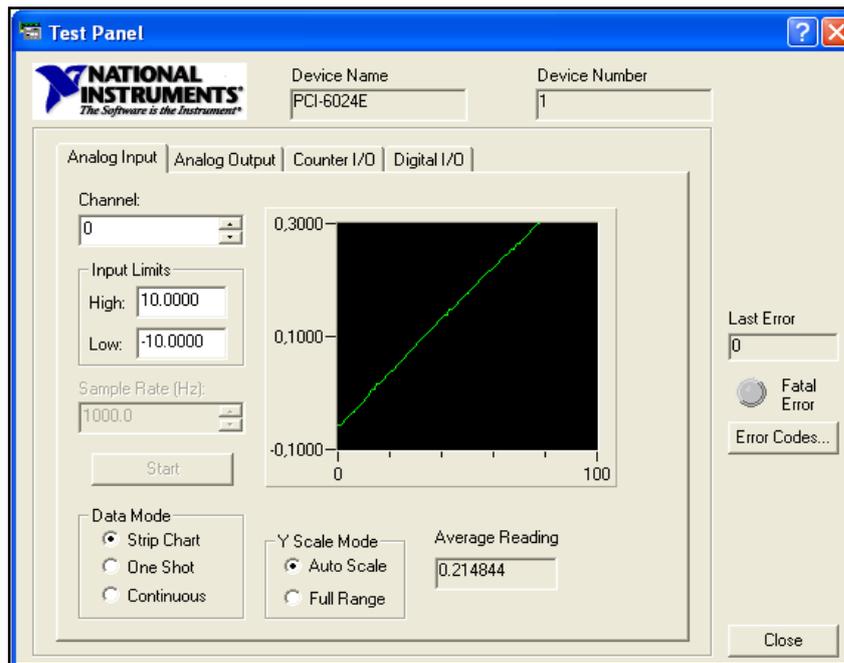


Figura 3.5 Vista de las entradas análogas

Fuente: Autores

Luego de esto. Están las salidas análogas. De la misma manera podemos seleccionar el canal de salida y la magnitud de la misma.

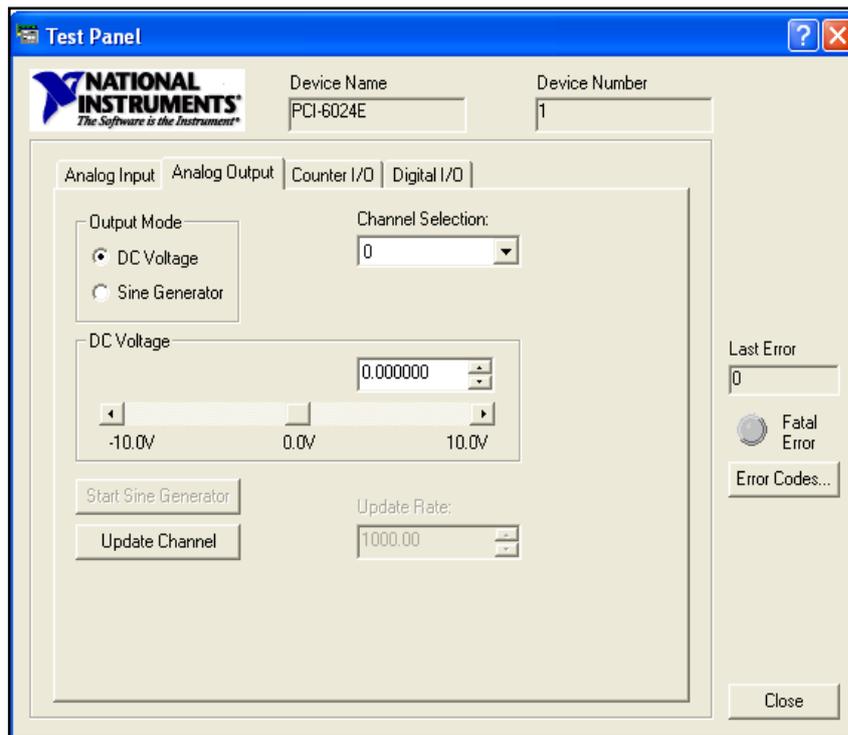


Figura 3.6 Vista de salidas análogas Fuente: Autores

A continuación la siguiente pestaña tenemos un contador tanto de entrada como de salida. Este puede actuar como un generador de pulsos para la salida de datos como un contador para entrada de datos.

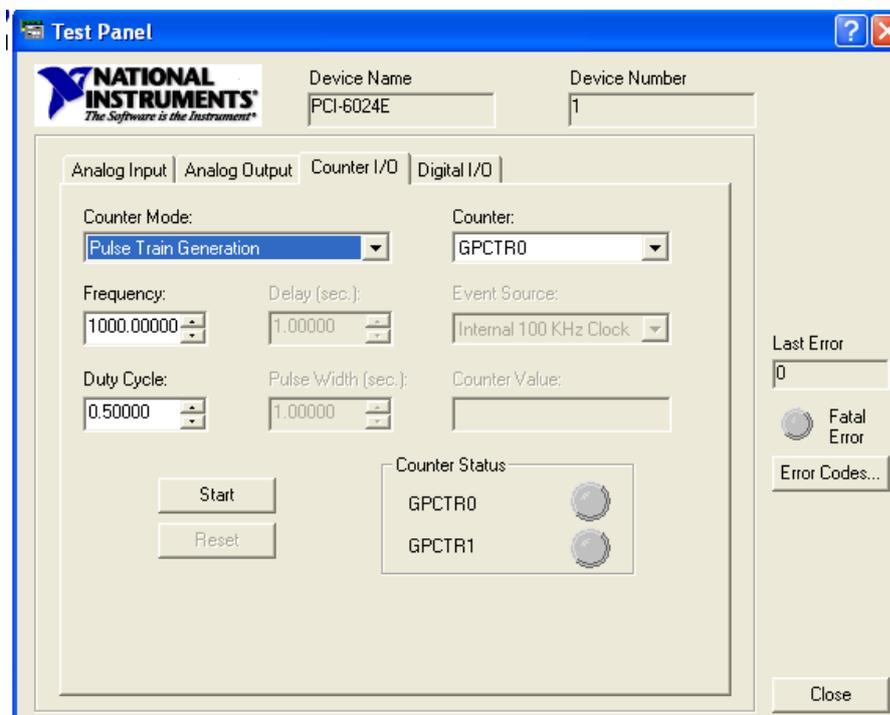


Figura 3.7 Vista de contador Fuente: Autores

Por último tenemos el modulo de entrada y salidas discretas. Donde podemos escoger si queremos que cada punto trabaje como entrada o como salida. Tal como muestra la figura.

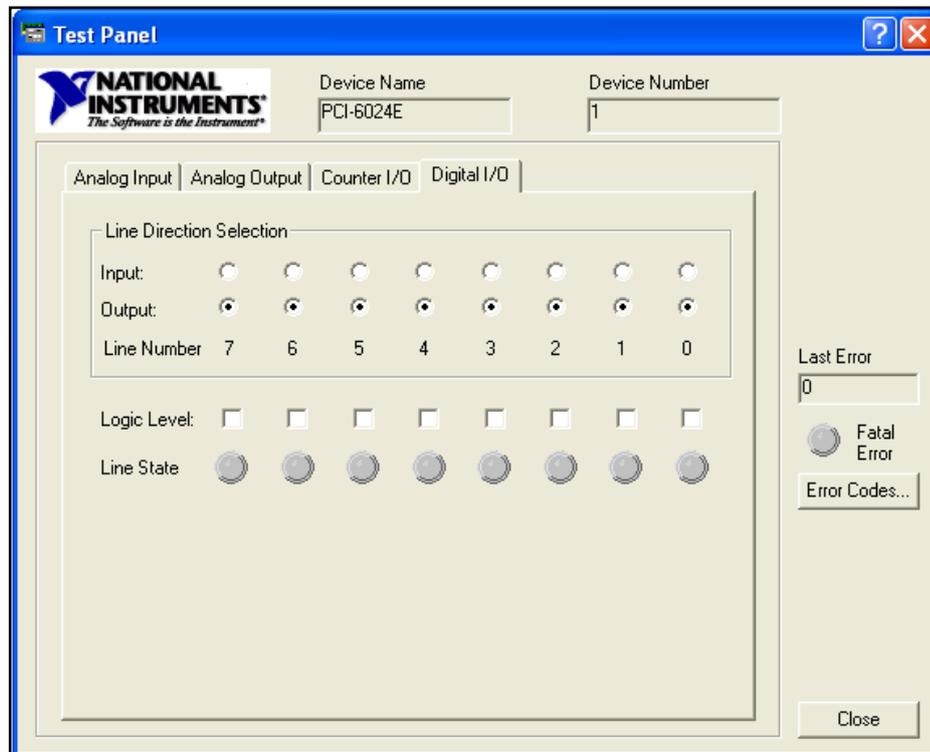


Figura 3.8 Vista de entradas y salidas discretas

Fuente: Autores

El test panel es práctico para realizar pruebas en el módulo, conociendo cuales serían las entradas y salidas del mismo. Es de gran ayuda para obtener de manera práctica los tiempos de respuesta de los mismos.

2.1 TIEMPO DE RESPUESTA DE MÓDULO DE CONTROL DE NIVEL.

Teniendo en cuenta todas las variables que tiene el modulo de control de nivel, procedemos a realizar el dimensionamiento del mismo.

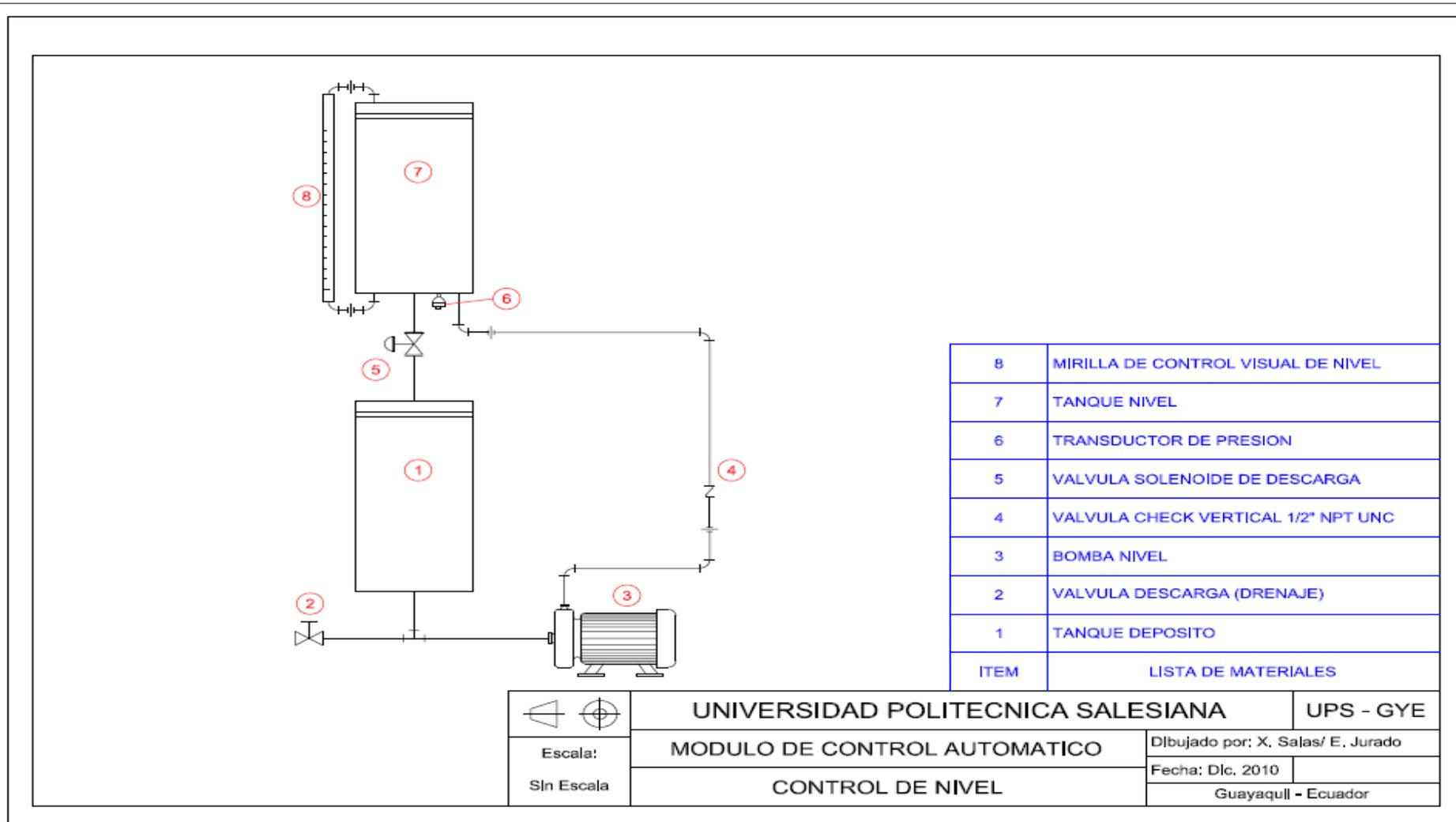


Figura 3.9 Diagrama esquemático de módulo control de nivel Fuente: Autores

Para esto se tomarán los tiempos de respuesta del sistema. Con la herramienta “*test panel*” del software “*Measurement & Automation*” se mide el tiempo que toma la bomba para elevar desde el punto mínimo al punto máximo de almacenaje del tanque superior y viceversa, para esto disponemos de una bomba que elevará el nivel de agua en el tanque y de una válvula solenoide que disminuirá el nivel del tanque.

Pero, para esto es necesario saber cuáles son las entradas y salidas que actúan en este sistema y cuáles serán los dispositivos que forzaremos a actuar desde la herramienta “*Test Panel*”.

Entradas		Salidas		Elemento	Asignación en Bloque conector
Discretas	Análogas	Discretas	Análogas		
		1		Bomba carga	DIO0 - DGND
		1		Válvula Descarga	DIO1 - DGND
	1			Transmisor de Presión	ACH1 - AIGND

Tabla 3.1 Datos de entradas y salidas en módulo de Nivel Fuente: autores

Con lo que encontramos que el tiempo de respuesta de este sistema queda de la siguiente manera:

Tiempo de respuesta	Actuador	
Nivel mínimo a máximo	Bomba	68 segundos
Nivel máximo a mínimo	Válvula	634 segundos

Tabla 3.2 Tiempos de respuesta de módulo de control de Nivel Fuente: Autores

Con estos datos podemos dimensionar el sistema que tenemos y de esta manera encontrar el controlador que mejor se acople a nuestras necesidades.

2.2 TIEMPO DE RESPUESTA DE MÓDULO DE CONTROL DE TEMPERATURA.

Teniendo en cuenta todas las variables que tiene el modulo de control de temperatura, procedemos a realizar el dimensionamiento del mismo.

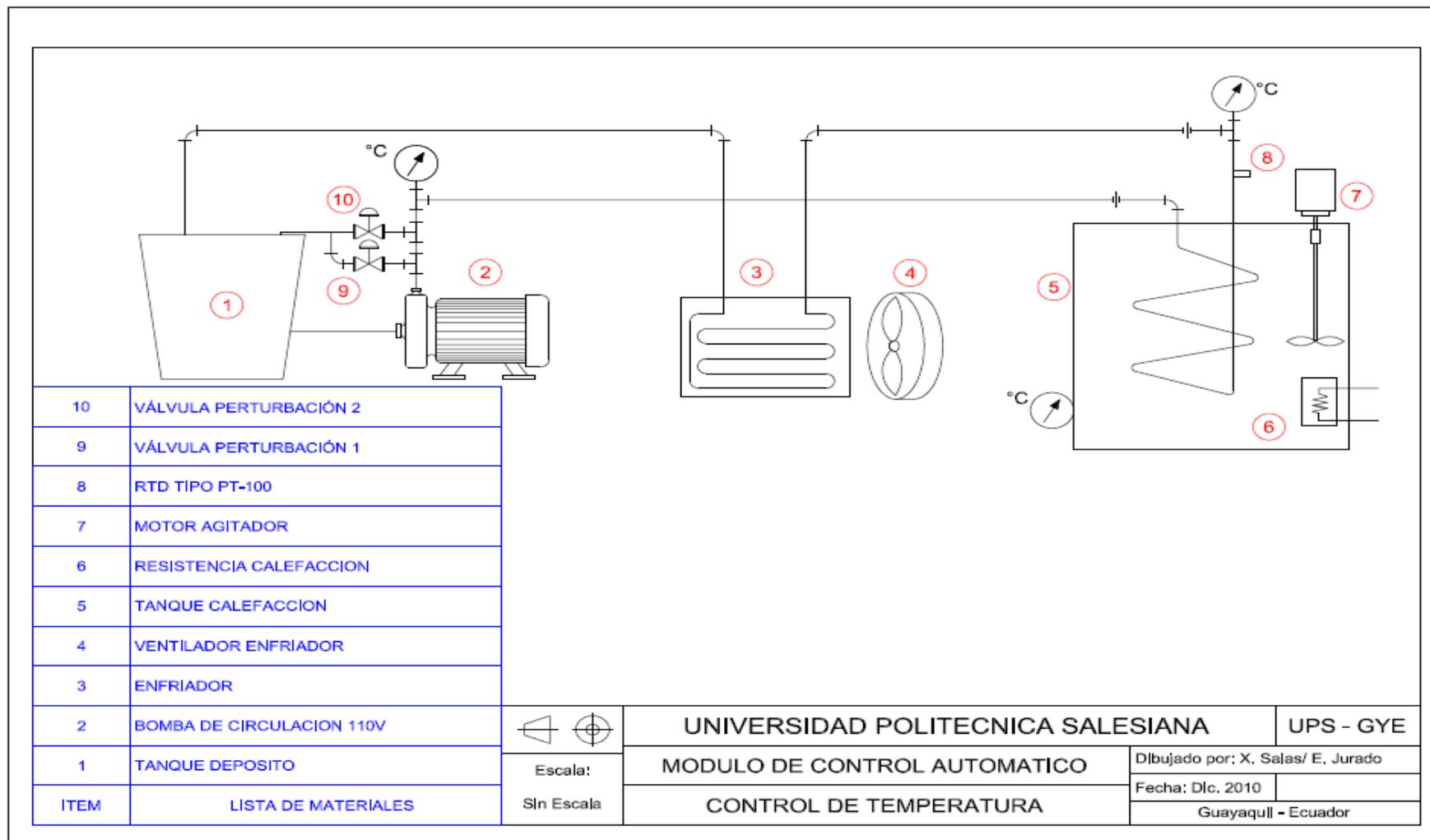


Figura 3.10 Diagrama esquemático de módulo de control de temperatura Fuente: Autores

En esta etapa se procede con tomar el tiempo de respuesta del sistema de control de temperatura. Como temperatura de referencia máxima se deberá tomar en cuenta que el sistema no debe subir la temperatura a más de 75° C. entonces se procede a verificar la temperatura del ambiente y con estos datos, se activa la resistencia eléctrica desde el software “*Measurement & Automation*” que utiliza la herramienta “*Test Panel*” para realizar la medición de datos.

Se debe tener en cuenta que para poder accionar la resistencia eléctrica contamos con un PWM que se acciona con una entrada de 5VDC y el control de la frecuencia de corte se realiza con una variación de una entrada análoga de 0 a 5VDC. El encendido del PWM se realiza por medio del terminal DIO3 más una referencia y el control de la frecuencia de corte con una salida análoga DAC0OUT con una referencia AOGND. Las condiciones de todas las salidas y entradas de este módulo se muestran en el siguiente cuadro:

Entradas		Salidas		Elemento	Asignación en Bloque conector
Discretas	Análogas	Discretas	Análogas		
		1		Resistencia Eléctrica	DIO3 - DGND
			1		DAC0OUT
	1			RTD - PT100	ACH2 - AIGND

Tabla 3.3: Datos de entrada y salidas de módulo control de temperatura Fuente: Autores

Como el cuadro explica, desde el “*test panel*”, se deberá activar la salida discreta 3 (DIO3) y la salida análoga 0 (DAC0OUT) a 5VDC y ubicando actualizar canal, para que la temperatura del tanque se pueda elevar. Se cuenta con dos válvulas solenoides que desvían el líquido al depósito con lo que se disminuye el caudal, estas son accionadas directamente desde el tablero de control y ejecutarán la labor de perturbaciones en el sistema. Realizando estos pasos se obtiene la siguiente tabla:

Tiempo de respuesta	28°C. - 40°C.
Sin perturbación	150 segundos
Con 1 perturbación	128 segundos
Con 2 perturbaciones	114 segundos

Tabla 3.4 Tiempos de respuesta módulo control temperatura Fuente: Autores

En la tabla se muestra el tiempo que se tomó la resistencia en elevar la temperatura del liquido que se encuentra dentro de la tubería y la variación cuando se activa una ó dos válvulas solenoides, donde se disminuirá el caudal.

Con estos datos podemos dimensionar el sistema que tenemos y de esta manera encontrar el controlador que mejor se acople a nuestras necesidades.

3. USO DE LA HERRAMIENTA “IDENTIFICATION TOOL”.

El modelado y simulación de sistemas dinámicos tiene aplicación en diferentes áreas de la ingeniería y la ciencia. Es importante conocer diferentes métodos de modelado tanto teóricos como experimentales (identificación de sistemas), utilizando herramientas CAD como el *Matlab/Simulink*. Esta herramienta es bastante difundida en el medio científico y académico. A partir del modelo matemático se puede realizar un análisis del proceso (para efectos de explicación y predicción) y diseñar subsistemas que adapten el sistema a comportamientos deseados (optimización y control). Es recomendable tener conocimientos básicos de cálculo, estadística, ecuaciones diferenciales, programación y manejo de *Matlab/Simulink*.

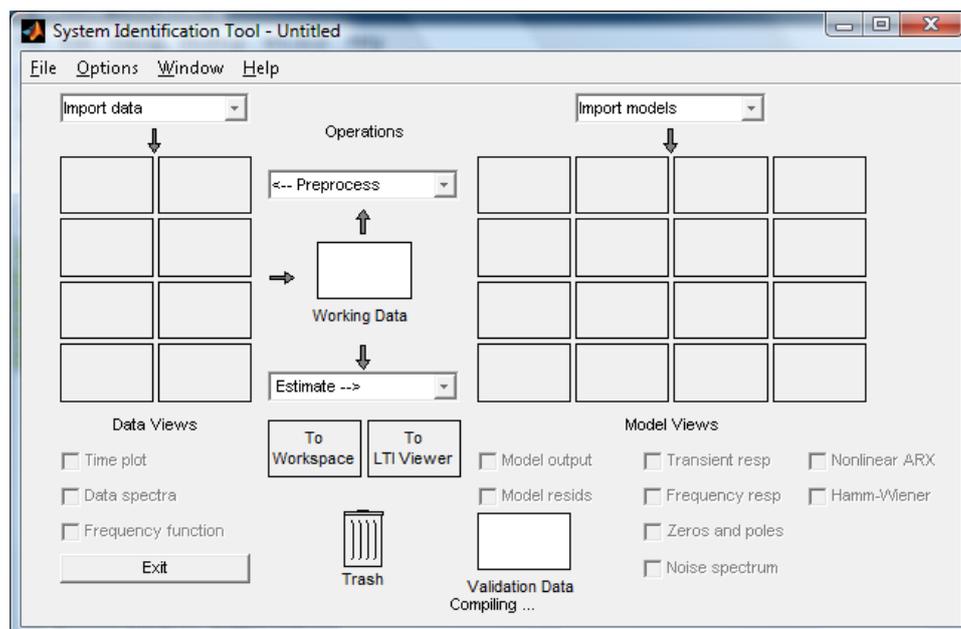


Figura 3.11 Herramienta identification tool Fuente: autores

3.1 APLICACIÓN DE HERRAMIENTA *IDENTIFICATION TOOL* EN MÓDULO CONTROL NIVEL.

Para poder realizar este experimento es necesario tener en claro cuáles son las entradas y salidas de la planta.

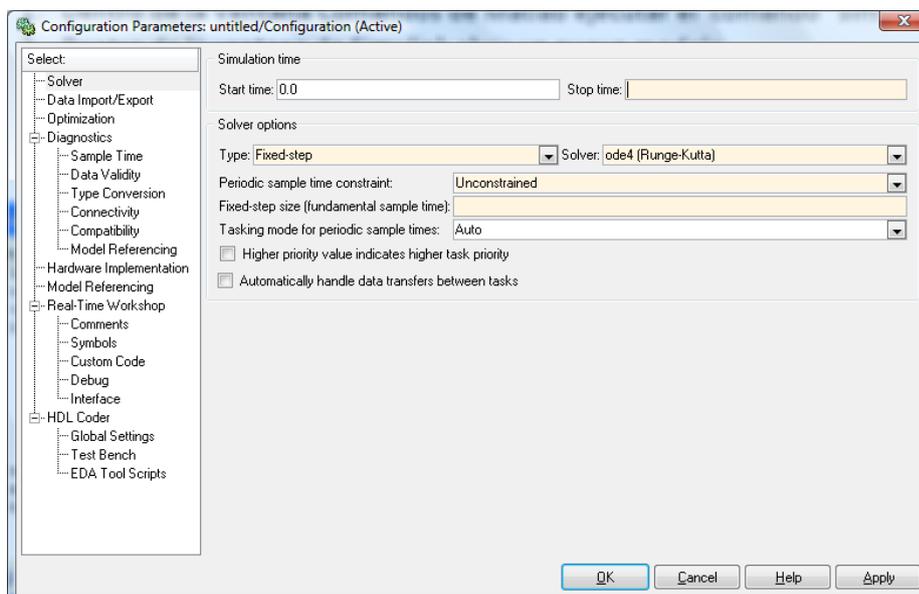
Entradas		Salidas		Elemento	Asignación en Bloque conector
Discretas	Análogos	Discretas	Análogos		
		1		Bomba carga	DIO0 - DGND
		1		Válvula Descarga	DIO1 - DGND
	1			Transmisor de Presión	ACH1 - AIGND

Tabla 3.5 Datos de entradas y salidas de módulo de nivel. Fuente: Autores

Para obtener el modelo del sistema se utilizará el programa de simulación *Simulink* de *Matlab*, siguiendo los siguientes pasos:

1. Dentro de la Ventana Comandos de *Matlab* ejecutar el comando “*simulink*”.
2. Dentro de la ventana de *Simulink* abrir un nuevo modelo.
3. Ensamblar los modelos definidos utilizando *Simulink*.
4. Cambiar los parámetros de configuración para cada modelo de la siguiente manera:

En la ventana de nuevo modelo de *simulink*, en la barra superior entrar a *simulation* y dar *click* en *Configuration Parameters* donde aparecerá la siguiente ventana:



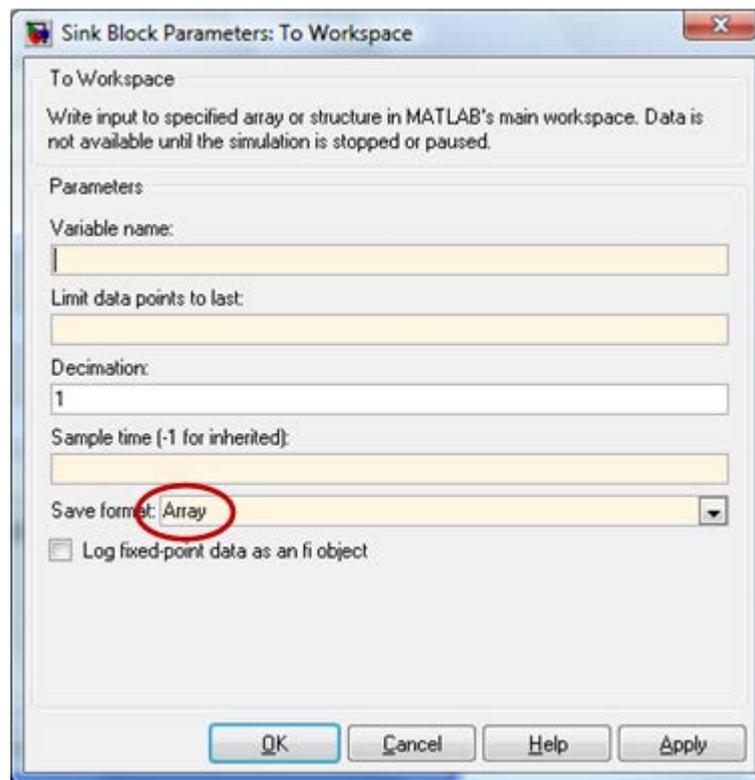
Para el valor de “stop Time” es necesario realizar el cálculo del tiempo donde finalizará la toma de muestra, además se debe escoger Paso Fijo ó “Fixed Step” tal como se muestra en la figura.

5. Exportar los datos de la entrada y de la salida al *Workspace*, mediante el bloque “To Workspace”

Configuran el bloque “To Workspace” de la siguiente manera:

Este bloque se encuentra dentro de la librería de *simulink* dentro de *Sinks*.

Dándole doble *click* al bloque se abre la siguiente ventana:



Donde se deben ingresar los datos correspondientes a esta ventana

Variable Name: Se ingresa un nombre para la variable, como: Entrada_Salida

Limit data points to last: $\left(\frac{T_{\text{simulation}}}{T_m} \right)$

Decimation = 1

Sample Time = T_m

Save Format: Array

Una vez configurado el *simulink*, podemos proceder a realizar la simulación, teniendo en cuenta que el tiempo de simulación se deberá tener presente dependiendo de las repuestas del sistema. Es decir, el tiempo de simulación debe ser mayor o por lo menos igual al tiempo de respuesta del sistema, aunque para conseguir un mejor análisis este debe ser por lo menos 5 veces mayor, ya que con esto podemos obtener una cantidad mayor de datos hasta la estabilización del sistema.

Una vez aplicado este procedimiento con la ayuda de “*Identification Tool*”, se encuentra una función de transferencia que cumple con las mismas condiciones del modulo de control.

A continuación se diagraman tanto los modelos utilizados para encontrar los tiempos de respuesta como el modelo matemático de la planta encontrada con la herramienta “*Identification Tool*”.

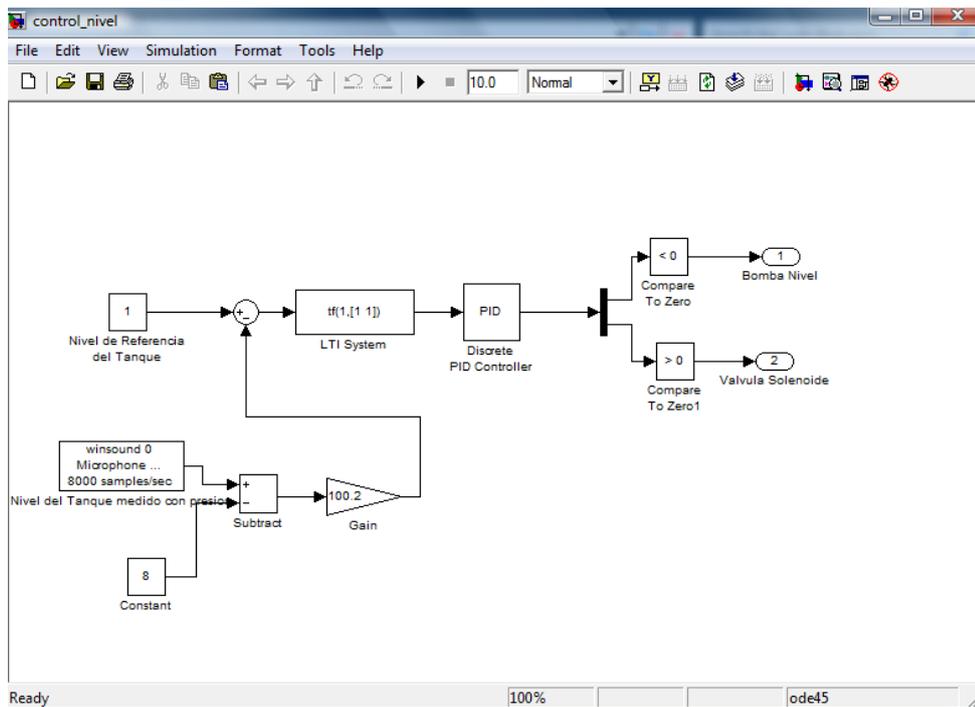


Figura 3.12 Modelo de control de nivel Fuente: Autores

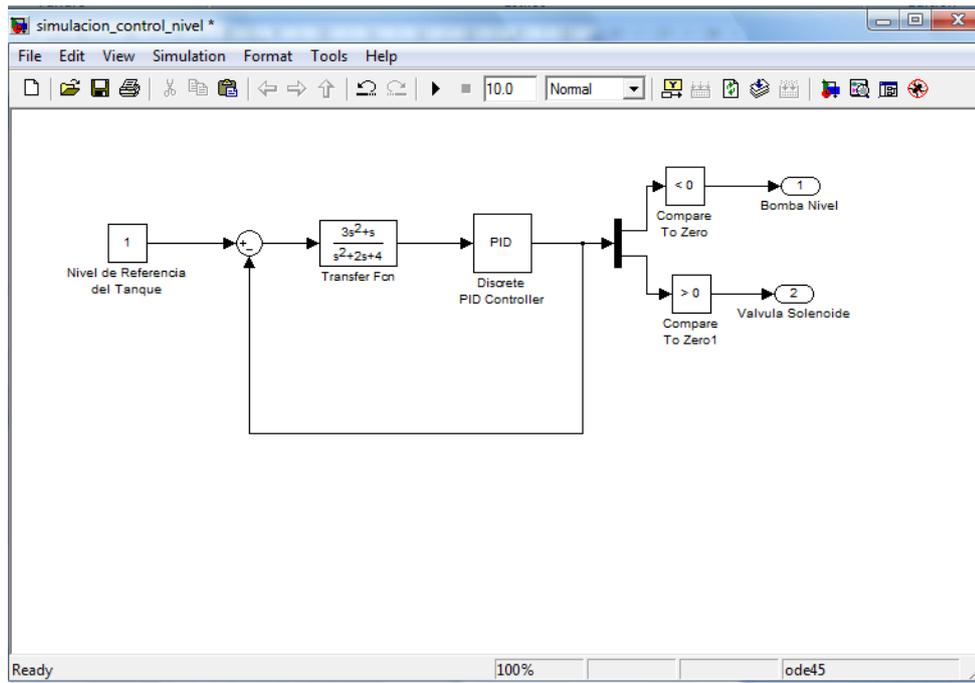


Figura 3.13 Modelo de simulación control de nivel Fuente: Autores

El modelo del sistema utilizado, debe responder a nuestras necesidades. Y para esto se debe tener bien en claro la dimensión de nuestra planta. Los datos anteriormente tomados, tenían la misión de darnos una visión de cuanto era la variación en la que actuaban los dispositivos con los que contamos en la planta, para de esta manera regular los niveles de referencia que se va a ubicar con la señal de respuesta ya que ambas se encuentra en diferentes parámetros.

La señal de referencia viene dada en cm porque se pide que se ubique una altura para el nivel de agua en el tanque, mientras la señal de respuesta viene dada en voltios ya que la señal que nos da el transmisor es en un rango de 4 a 20 miliamperios y transformada a voltios desde un dispositivo electrónico antes que llegue a la tarjeta PCI-6024E.

3.2 APLICACIÓN DE HERRAMIENTA *IDENTIFICATION TOOL* EN MÓDULO CONTROL DE TEMPERATURA.

Utilizando el procedimiento para identificación de un sistema, se realiza la adquisición de datos de la planta para luego con *identification tool* obtener la función de transferencia para este sistema.

Para esto es necesario utilizar un modelo en *simulink* para la toma de datos, tanto de entrada como de salida y poder de esta manera usar la herramienta. El modelo desarrollado se muestra a continuación:

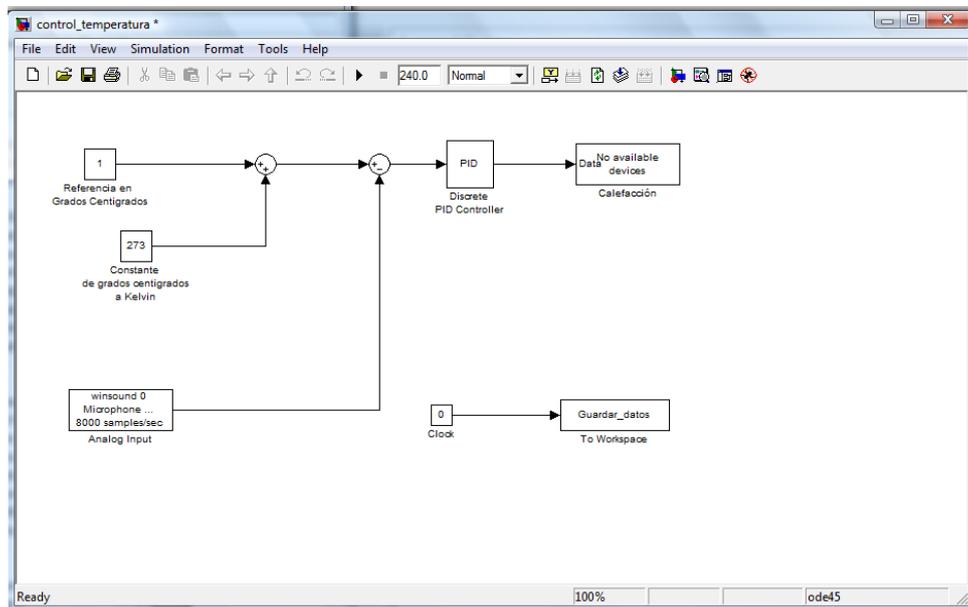


Figura 3.14 Modelo de control temperatura Fuente: Autores

Con este modelo podemos obtener la función de transferencia que es equivalente al sistema que se tiene para el control de temperatura en el modulo # 2.

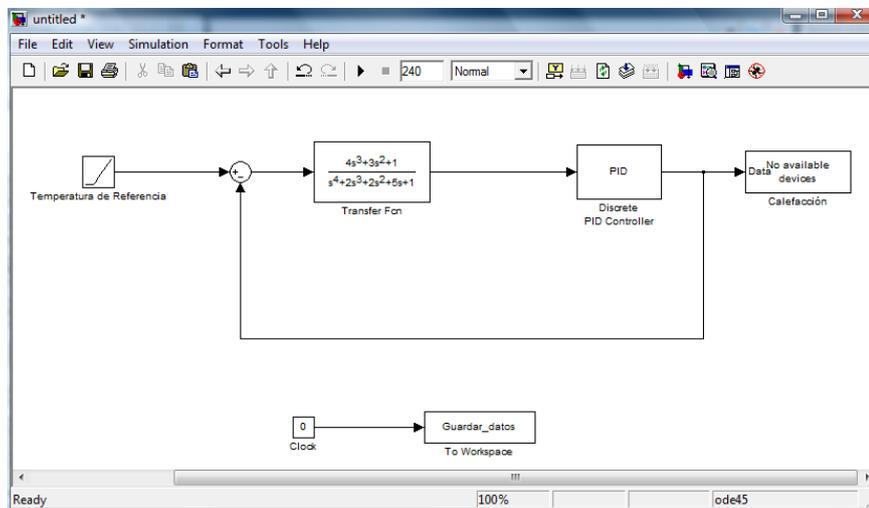


Figura 3.15 Modelo de simulación control temperatura Fuente: Autores

Con el objetivo de ampliar diferentes variables que puedan existir en un sistema como la cavitación, aireación y disminución de caudal para un sistema hidráulico, se han dispuesto en el sistema dos perturbaciones externas al sistema de control.

Estas perturbaciones pretenden simular una pérdida de caudal, el mismo que afectará directamente a la respuesta transitoria que tenga el sistema y como se comportaría el sistema de control ante este cambio. En *simulink* puede ayudarse de un tipo de perturbación como éste, para realizar prácticas, pero en este caso se podrá observar cómo actúa una perturbación real en un sistema real.

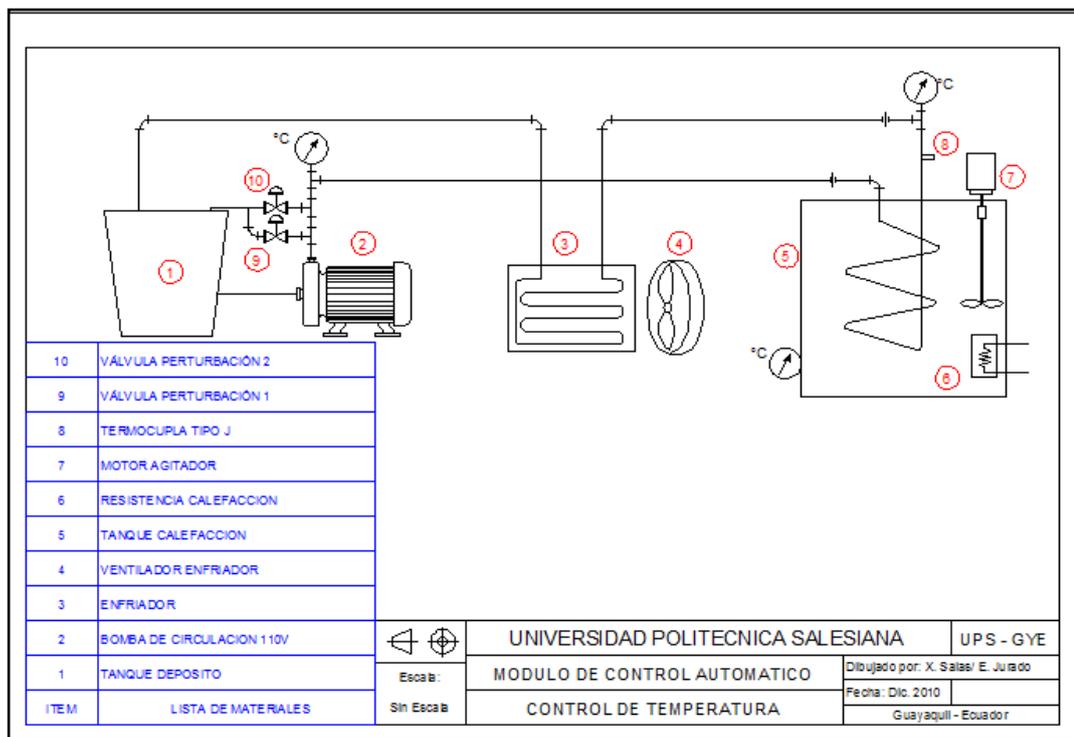


Figura 3.16 Plano de módulo control temperatura Fuente: Autores

CAPITULO # IV

DISEÑO DE CONTROL Y SIMULACIÓN DE MÓDULOS.

Una vez en claro de cómo obtener los datos de tiempo de respuesta, procedemos a diseñar el sistema de control para cada uno de los módulos. Para esto necesitaremos de la herramienta “*Real Time Windows target*” que es parte del Software “*Matlab*”.

1. INSTALACIÓN DE HERRAMIENTA REAL TIME WINDOWS TARGET.

Es importante activar esta herramienta ya que nos ayudará a la toma de datos y con ella podremos visualizar los resultados del sistema de control en tiempo real.

El procedimiento sería de la siguiente manera:

La instalación del *Real-Time Windows Target*, se realiza en el área de trabajo del *MATLAB*, escribiendo:

```
>> rtwintgt -install
```

Para verificar las características resultado de la instalación del *Kernel*, puede escribir:

```
>> rtwho
```

El *Real-Time Windows Target* requiere de un compilador C que no está incluido en el software de *MATLAB*. De no tener instalado algún compilador C en su computadora, es necesario instalar uno. Para elegir el compilador C, de entre los instalados debe escribir en el área de trabajo:

```
>> mex -setup
```

Ud. debe indicar que le muestre la lista numerada de compiladores instalados y luego debe escoger el que desee, escribiendo el número correspondiente. Normalmente se recomienda elegir si está en la lista el *Microsoft Visual Studio C/C++*.

Luego de instalado el *Kernel* mediante el *Real-Time Windows Target* y elegido el compilador para crear los ejecutables para ser usados en tiempo real, ya podemos hacer uso de las librerías de *MATLAB* para adquisición de datos.

Para leer datos analógicos, se conectan esas señales analógicas a los puertos de entrada de la *DAQ*. Luego cree un modelo nuevo en *Simulink*, como se muestra en ejemplo en la figura 1. De la librería *Real-Time Windows Target* seleccione y arrastre el bloque *Analog Input*, el cual nos permitirá la lectura de datos Analógicos. Para poder visualizar los datos adquiridos agregue un elemento *Scope*. Opcionalmente puede agregar un elemento *To Workspace*, para crear una variable que almacene los datos adquiridos en el área de trabajo del *Matlab*. Se muestra también la creación de una variable para la base de tiempos.

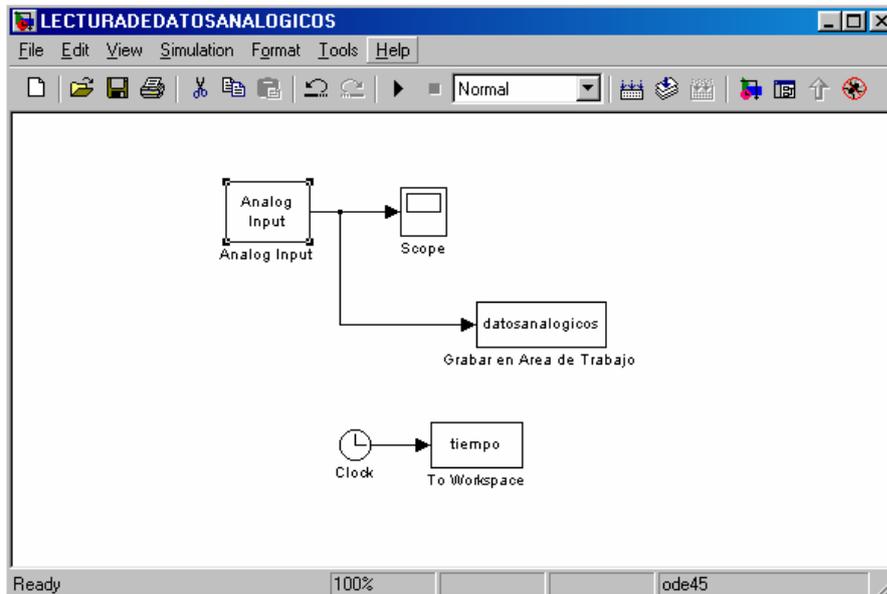


Figura 4.1 Diseño de bloques en simulink para lectura de datos analógicos Fuente: Autores

Debemos configurar el bloque *Analog Input*, seleccionémoslo y hagamos doble clic en él y aparecerá la pantalla

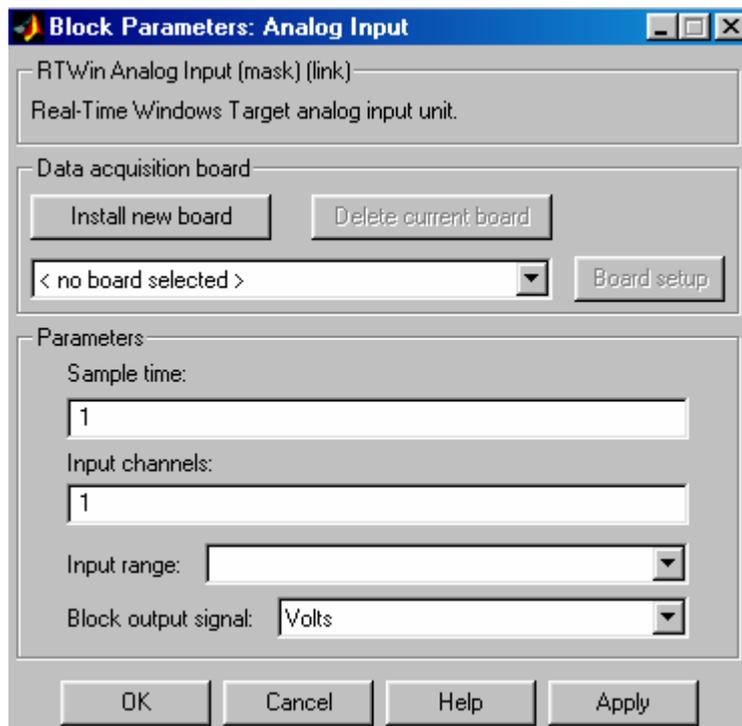


Figura 4.2 Configuración de bloque de entrada analógica Fuente: Autores

Primero debe seleccionar de las tarjetas de adquisición de datos instaladas en su computador, la que está usando (en este caso *National Instruments PCI-6024E*).

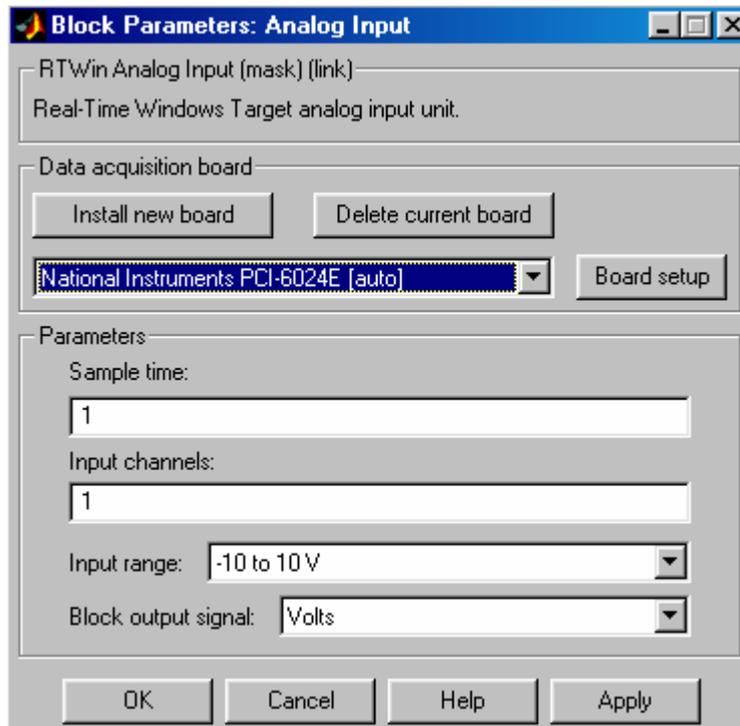


Figura 4.3 Configuración de bloque de entrada analógica Fuente: Autores

Aparecerá en el modelo del proyecto el bloque *Analog Input* indicando la tarjeta seleccionada.

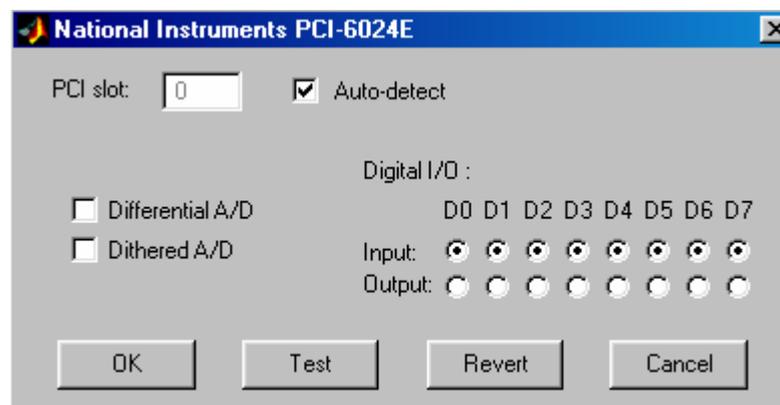


Figura 4.4 Revisión de Tarjeta PCI-6024E Fuente: Autores

Pulse *Test* para verificar el estado de la tarjeta; en caso de estar en perfecto estado envía un mensaje con la pantalla

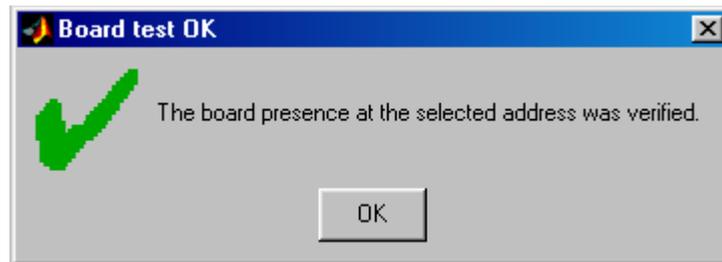


Figura 4.5 Verificación de estado para Tarjeta PCI-6024E Fuente: Autores

En esa pantalla pulsamos OK y regresamos a pantalla de configuración. Ahora configuramos el período de muestreo a utilizar y los canales a utilizar en la lectura de datos analógicos, como muestra la figura

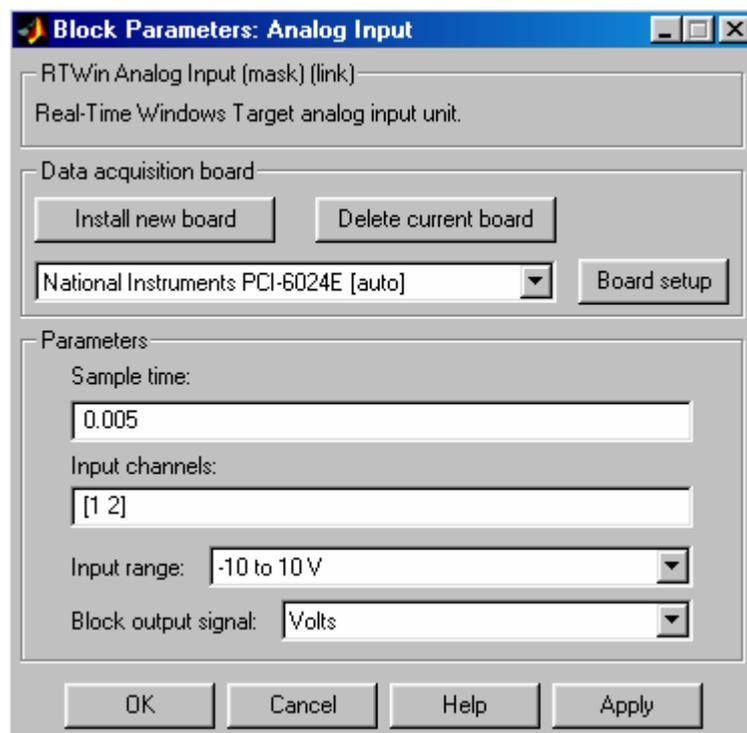


Figura 4.6 Configuración de Tarjeta PCI-6024E Fuente: Autores

Finalizamos pulsando OK.

Continúa la configuración de los parámetros de la presentación de la simulación. En la barra de menús Tools del modelo, seleccionar *External mode* en *control panel*. Aparece la pantalla mostrada en la figura

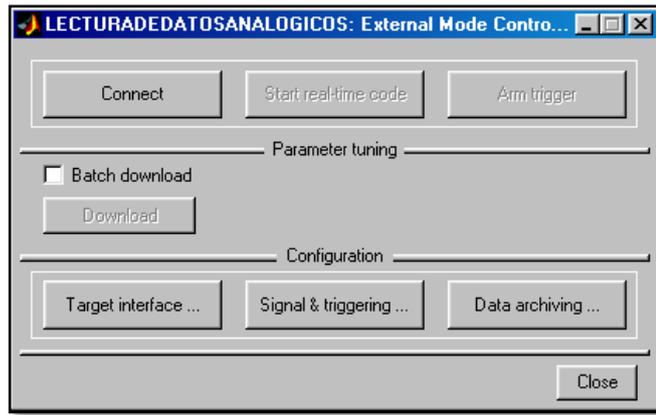


Figura 4.7 Bloque External Mode Control Fuente: Autores

Seleccionar la opción *Target interface*, escribir en el MEX-file : *rtwinext*.

Observe la figura

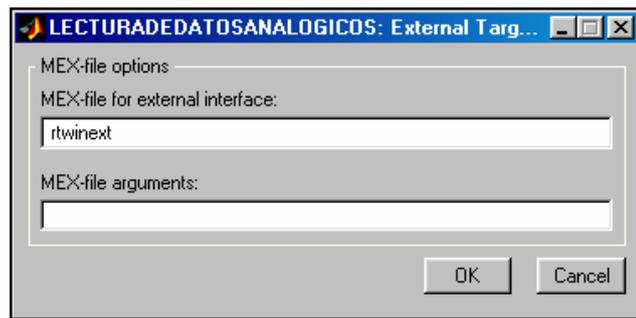


Figura 4.8 Configuración de Mex File Fuente: Autores

Con OK, regresamos a pantalla *External mode control panel* (Figura 4.7), seleccionar *Signal & triggering*.

Configurar el número de datos adquiridos que presentarán los bloques *Scope* y almacenarán los bloques *To Workpace*.

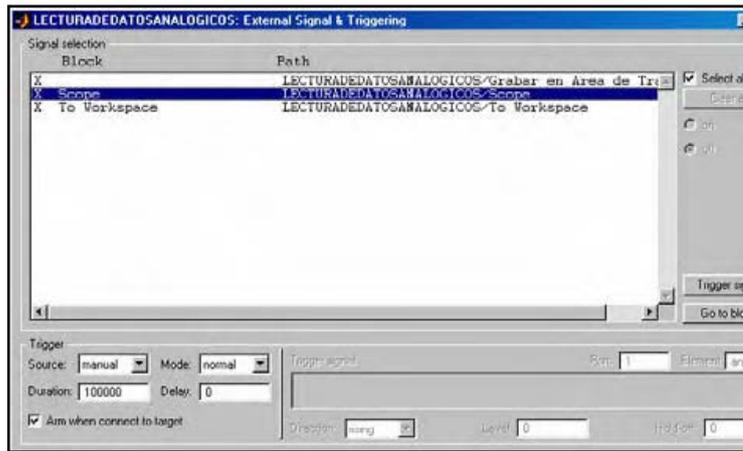


Figura 4.9 Revisión de Bloques para adquisición de Datos Fuente: Autores

Luego pulsamos *Apply* y *Close* para terminar esta configuración.

Continua ahora la configuración de los parámetros de simulación. En la barra de menús *Simulation* del modelo, seleccionar *Solver* y aparece pantalla de la figura

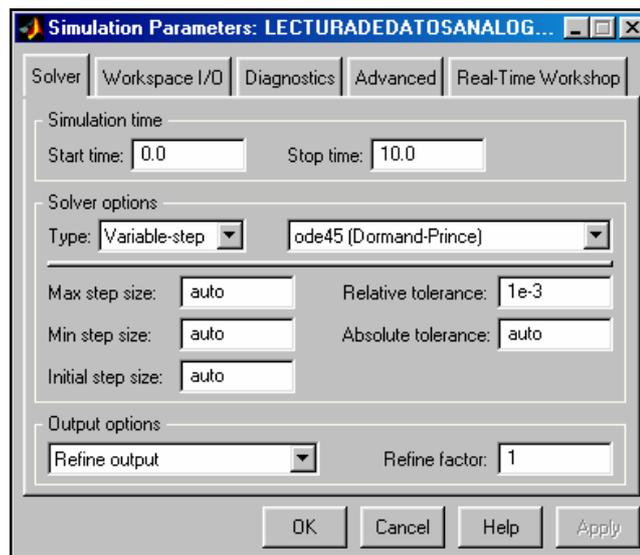


Figura 4.10 Bloque Simulation Parameters Fuente: Autores

Seleccionamos tipo de solución *Fixed-step* y *Ode5*.

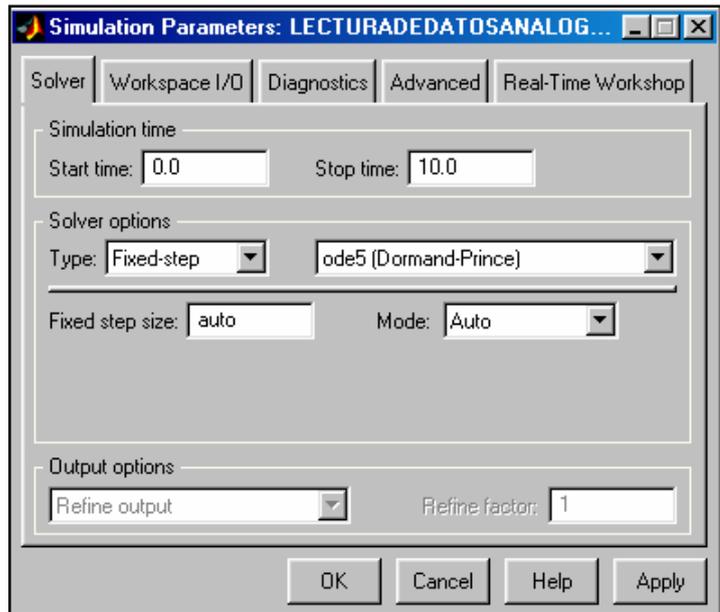


Figura 4.11 Configuración para la simulación en modo externo. Fuente: Autores

En la misma pantalla seleccionar *Real-Time Workshop*. Aquí configuraremos las opciones de creación y ejecución en tiempo real. Aparece inicialmente la pantalla de la figura

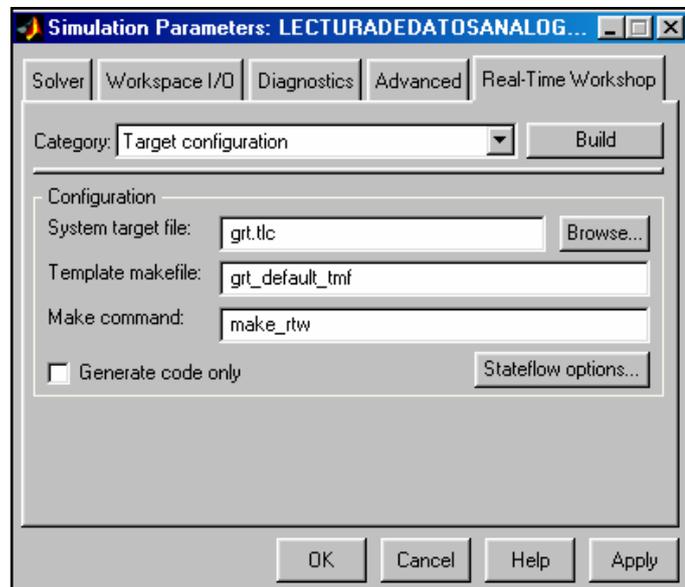


Figura 4.12 Configuración de Real Time Workshop Fuente: Autores

Al pulsar *Browse*, aparecen los diferentes archivos para el manejo de creación y ejecución en tiempo real. Seleccionar: *rtwin.tlc*.

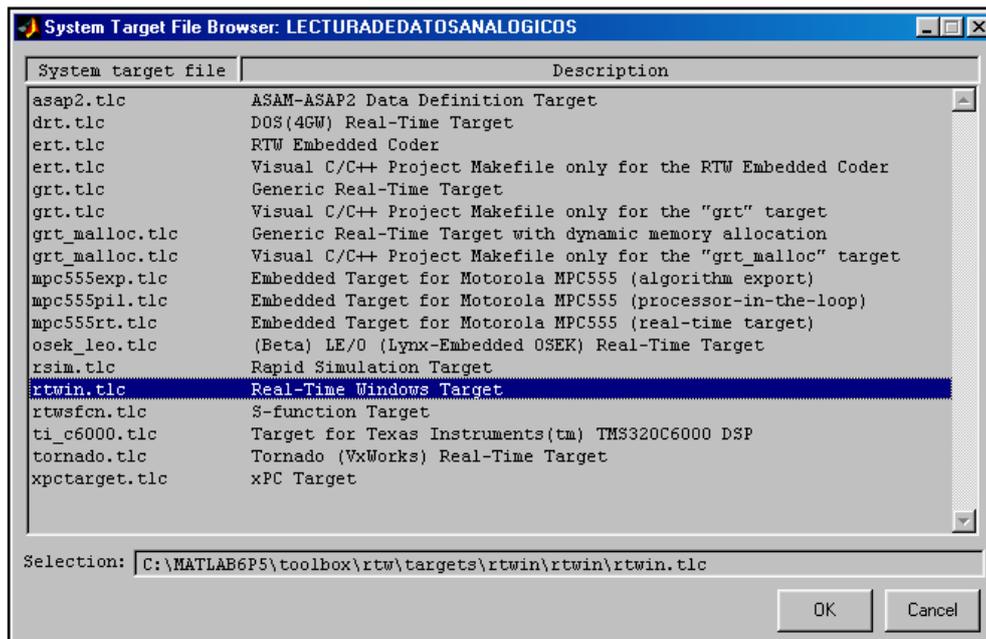


Figura 4.13 Selección de Archivos del Sistema para trabajo con RTWIN Fuente: Autores

Pulse OK y aparece inicialmente la pantalla, que muestra la opción seleccionada

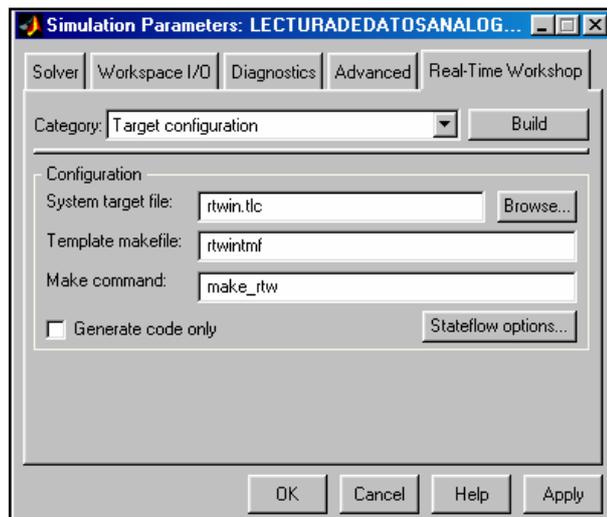


Figura 4.14 Configuración de Real-Time Workshop Fuente: Autores

Luego de pulsar OK, hemos terminado la configuración de la lectura de datos analógicos.

Para realizar la adquisición de datos de lectura analógica; en la barra de menús *Simulation* del modelo, seleccionar *External*, como muestra la figura 4.15.

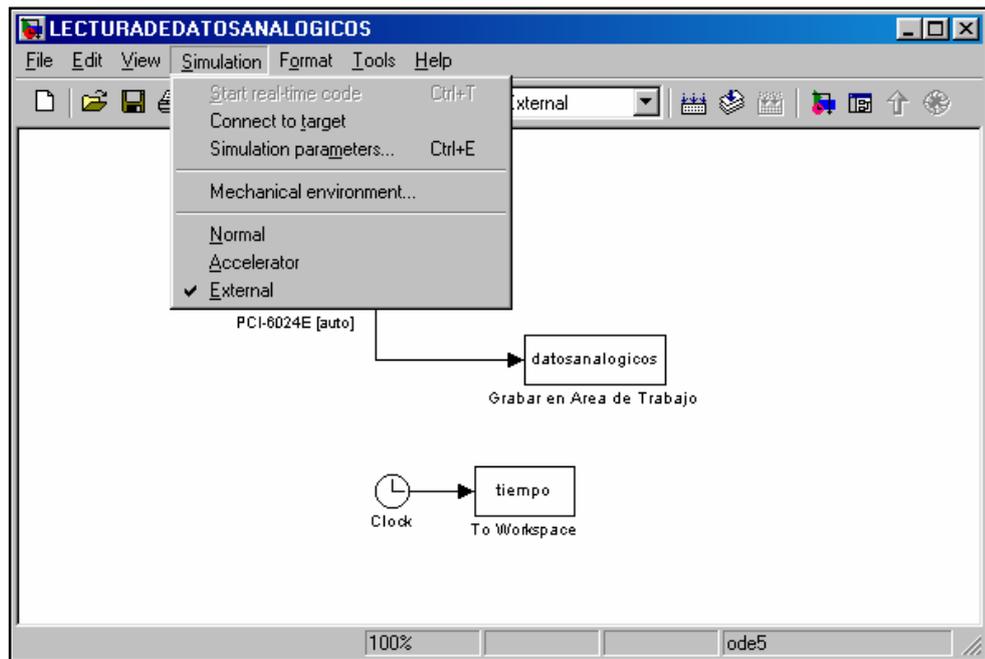


Figura 4.15 Configuración de Simulación Externa Fuente: Autores

Luego debemos ordenar que se construya el modelo diseñado, para ello en la barra de menús *Simulation* del modelo, seleccionar *Simulation Parameters* y *Build*, como muestra la figura

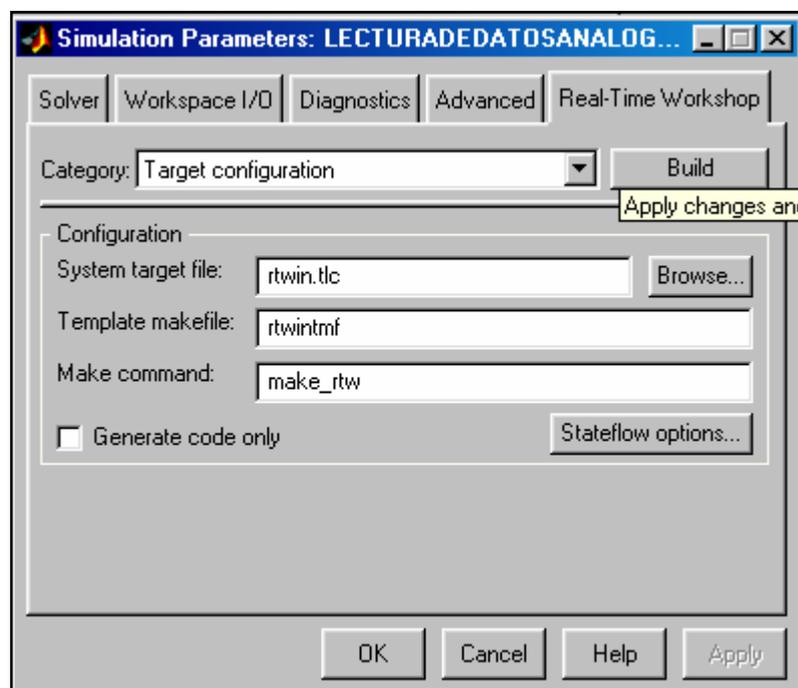


Figura 4.16 Carga de Programa en Simulink Fuente: Autores

El proceso de construcción se puede observar en la pantalla del *Matlab*, mediante mensajes como se aprecia en las figuras

```

MATLAB
File Edit View Web Window Help
Current Directory: C:\MATLAB6p5\work\ADQUISICION DE DATOS\11AGOSTO2006\LECTURADEDATOSANALOGICOS_rtw

-optimization:ref
-incremental:no
-fullbuild
-nodefaultlib
-version:2.00
-osversion:4.00
-subsystem:native,4.00
-export:Header
-export:Inquiry
-export:Disable
-export:Enable
-export:GetBoards
Creating library ..\LECTURADEDATOSANALOGICOS.lib and object ..\LECTURADEDATOSANALOGICOS.o
### Created Real-Time Windows Target module LECTURADEDATOSANALOGICOS.rwd.

C:\MATLAB6p5\work\ADQUISICION DE DATOS\11AGOSTO2006\LECTURADEDATOSANALOGICOS_rtw>

### Successful completion of Real-Time Workshop build procedure for model: LECTURADEDATOSANALOGICOS.rwd
>>

```

Figura 4.17 Ventana de Comandos en MATLAB- Carga de programa en MATLAB. Fuente: Autores

Durante el proceso de construcción se crean un grupo de archivos

Nombre	Tamaño	Tipo
LECTURADEDATOSANALOGICOS_rtw		Carpeta de archivos
LECTURADEDATOSANALOGICOS	9 KB	Rose Model
LECTURADEDATOSANALOGICOS.rwd	18 KB	Archivo RWD

Figura 4.18 Ventana de Dirección Actual en MATLAB. Carpetas creadas Fuente: Autores

Nombre	Tamaño	Tipo
ext_svr.obj	13 KB	Archivo intermedio
LECTURADEDATOSANALOGICOS	1 KB	Archivo por lotes MS-DOS
LECTURADEDATOSANALOGICOS.c	7 KB	Archivo de código fuente de C
LECTURADEDATOSANALOGICOS.h	4 KB	Archivo de encabezado de C
LECTURADEDATOSANALOGICOS.mk	15 KB	Archivo MK
LECTURADEDATOSANALOGICOS.obj	7 KB	Archivo intermedio
LECTURADEDATOSANALOGICOS_data.c	1 KB	Archivo de código fuente de C
LECTURADEDATOSANALOGICOS_data.obj	1 KB	Archivo intermedio
LECTURADEDATOSANALOGICOS_dt.h	2 KB	Archivo de encabezado de C
LECTURADEDATOSANALOGICOS_private.h	3 KB	Archivo de encabezado de C
LECTURADEDATOSANALOGICOS_targ_data_map	3 KB	MATLAB M-file
LECTURADEDATOSANALOGICOS_types.h	1 KB	Archivo de encabezado de C
modelsources	1 KB	Documento de texto
rt_nonfinite.obj	2 KB	Archivo intermedio
rt_sim.obj	4 KB	Archivo intermedio
rt_stub.obj	4 KB	Archivo intermedio
rtw_proj.tmw	1 KB	Archivo TMW
updown.obj	12 KB	Archivo intermedio

Figura 4.19 Archivos creados dentro de las carpetas .RTW Fuente: Autores

Antes de ejecutar el modelo de lectura de datos analógicos, debemos ordenar la conexión con la tarjeta de adquisición de datos. Debajo de la barra de menús del modelo, seleccionar el icono de conexión de con la tarjeta DAQ, como muestra la figura.

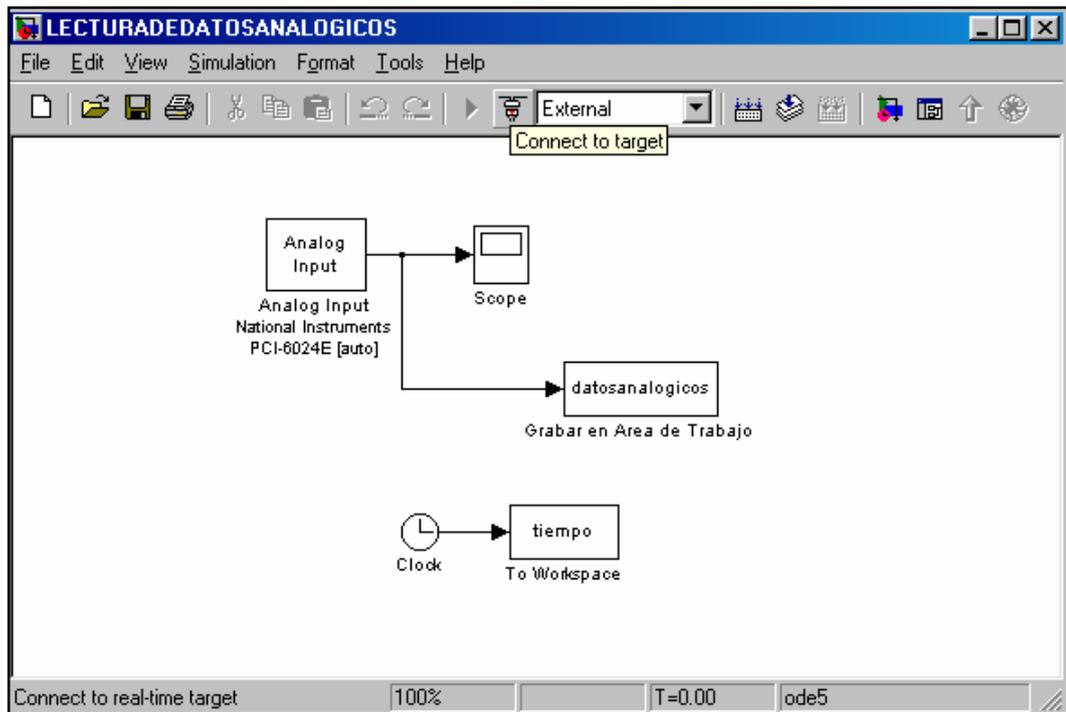


Figura 4.20 Conexión de Programa en Simulink con la tarjeta de Interface PCI-6024E Fuente: Autores

A continuación se muestra el proceso de conexión con la tarjeta de adquisición de datos

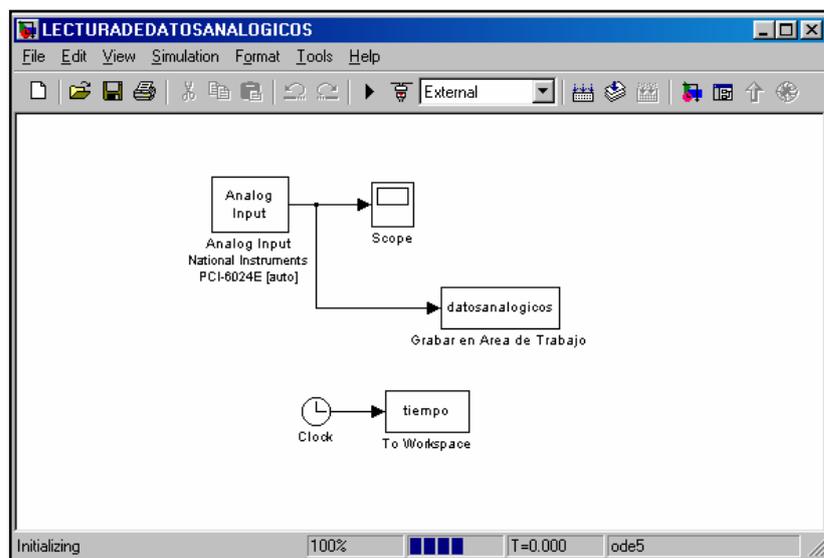


Figura 4.21 Conexión de Programa en Simulink con la tarjeta de Interface PCI-6024E Fuente: Autores

Para ejecutar el modelo debajo de la barra de menús del modelo, seleccionar el icono de ejecución del modelo (*Start simulation*), como muestra la figura

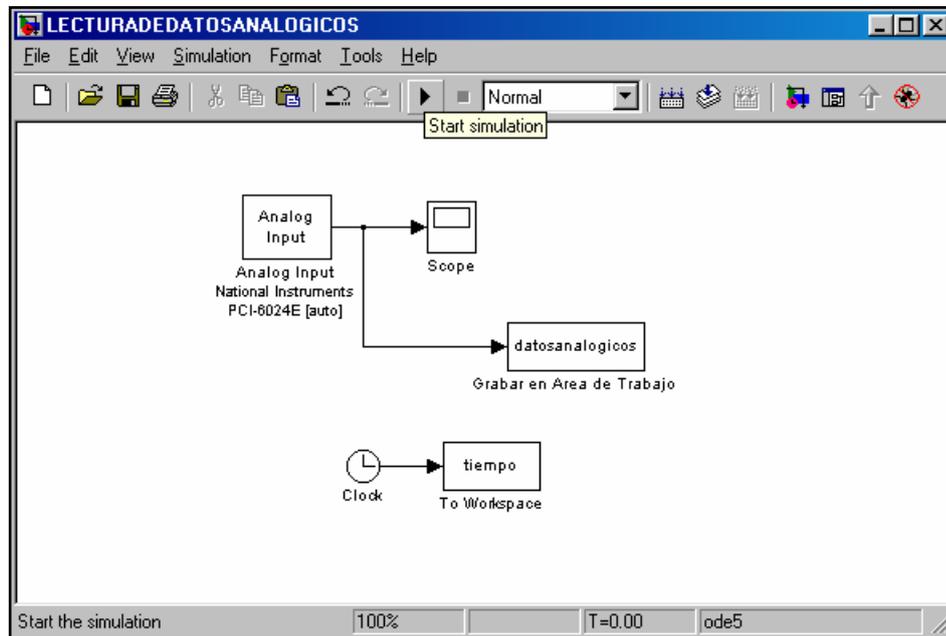


Figura 4.21 Comienzo de simulación externa desde Simulink Fuente: Autores

Conforme se ejecuta el modelo, Ud. puede observar en el *Scope* del modelo las señales adquiridas, como muestra la figura

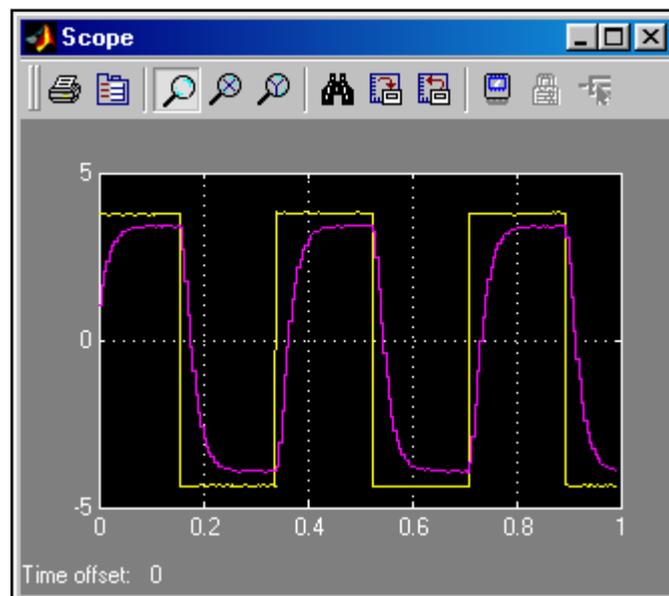


Figura 4.22 Vista del Scope del modelo en Simulink Fuente: Autores

Otra forma de obtener los gráficos de las señales adquiridas, es utilizar las variables almacenadas en el área de trabajo. La figura, muestra el grafico de las señales adquiridas, ploteadas a partir de las variables almacenadas en el área de trabajo

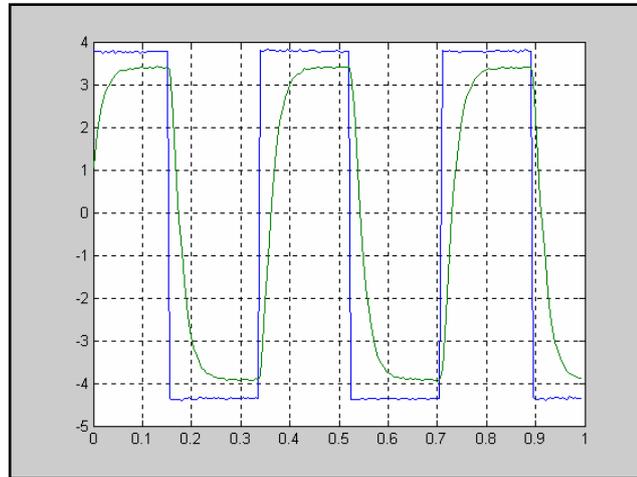


Figura 4.23 Muestra del Ploteo que se crea en la ventana Workspace en base a los datos obtenidos Fuente: Autores

Podemos comparar las señales adquiridas por nuestro modelo de lectura de datos, comparando con las mismas señales medidas por medio de un osciloscopio, como muestra la figura

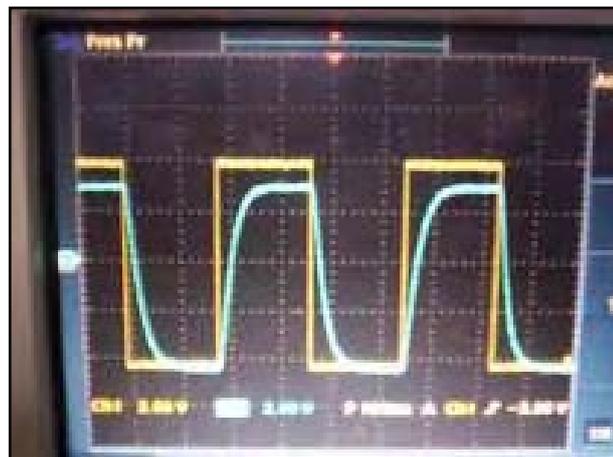


Figura 4.24 Vista de un osciloscopio captando las señales de entrada Fuente: Autores

2. DISEÑO DE CONTROLADORES DE MÓDULOS.

Para llegar al diseño del controlador se tomarán en cuenta dos partes fundamentalmente.

- La dimensión de la planta de proceso
- La función de transferencia adquirida en el proceso de identificación de sistema

Con estos datos podemos dimensionar el mejor tipo de controlador para nuestros sistemas.

2.1 DISEÑO DE CONTROL DE MÓDULO DE NIVEL

Para el control de módulo de nivel contamos con dos actuadores, el primero es una bomba centrífuga que elevará el nivel del agua del tanque a medir mientras el segundo es una válvula solenoide que evacuará el agua del tanque de nivel al depósito.

El dispositivo que medirá la altura del modulo será un transmisor de presión que trabaja en un rango de 0 – 5 psi g y envía una señal analógica de 4 – 20 mA. Con esto podemos deducir que el transmisor trabaja bajo el siguiente esquema:

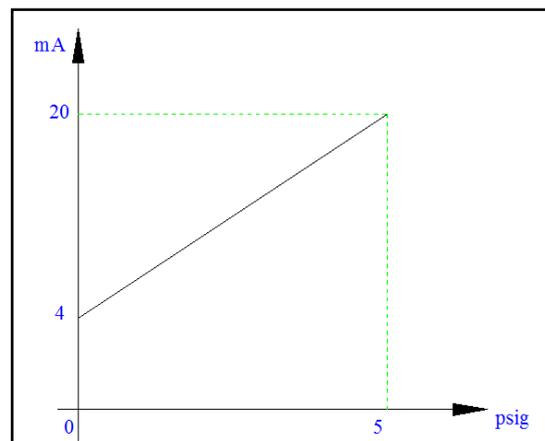


Figura 4.25 Curva de trabajo de transmisor de presión Fuente: Autores

El sistema puede elevar el nivel hasta 40cm, y sabemos que la presión de una columna de 10m de altura es igual a 14.7 psig. Con lo que deducimos que:

A una altura de 40 cm vamos a tener una presión de 0.588 psig.

Conociendo la capacidad del transmisor y como sabemos que vamos a trabajar en un rango de 0 – 0,588 psi g sabremos que la respuesta en mili-voltios por parte del transmisor será:

$$0.588 \text{ psi} \times 5/16 + 4\text{mA} = 4,1837\text{mA}$$

Ahora con esto ubicamos una resistencia de 500 ohmios para lograr un rango de voltaje de 8 a 8,37 voltios.

La señal de entrada luego la debemos acoplar a la señal de referencia de nivel, que viene dada en altura.

La señal de entrada llega con un excedente de 8 voltios por lo que debemos reducir esto y luego esta señal la debemos amplificar para q trabajen en el mismo rango de datos.

Una vez reducido el valor de 8V. Nos quedará que a 40 cm de altura tendremos 0.37 voltios. Con esto partimos que la ganancia para la señal de entrada deberá ser:

$$\text{Ganancia} = \text{Valor de salida}/\text{Valor de entrada};$$

$$\text{Ganancia} = 40/0,37 = 108,11$$

Luego de esto entendemos que tanto la señal de entrada como la de salida se encuentran trabajando bajo el mismo dato. Con esto obtenemos el siguiente diagrama para el control del módulo de nivel.

°C.	Voltaje
26	6,986
27	7,046
28	7,106
29	7,166
30	7,226
31	7,286
32	7,346
33	7,406
34	7,466
35	7,526
36	7,586
37	7,646
38	7,706
39	7,766
40	7,826
41	7,886
42	7,946

Tabla 4.1 Equivalencia entre temperatura y Voltaje en Sensor de Temperatura

Fuente: Autores

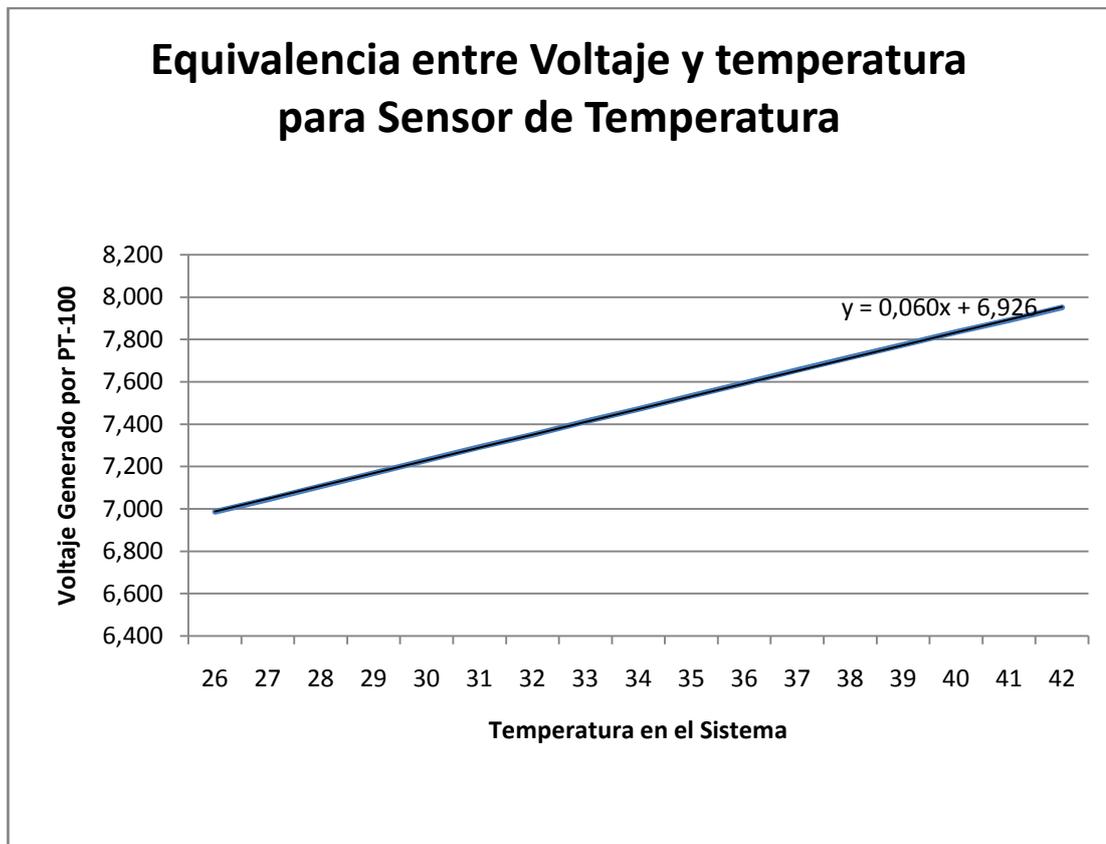


Figura 4.27 Relación Voltaje vs Temperatura concurrente en PT-100 Fuente: Autores

La línea de tendencia que se observa en la figura 4.27 muestra una pendiente de 0,06 V/°C. Este dato es sumamente importante para el escalamiento de datos necesario para comparar la temperatura real con la temperatura de referencia del sistema.

Se debe tener en claro que el dato a presentar como referencia es en grados centígrados por ende el dato del sensor de temperatura debe ser llevado a este parámetro. Para esto se utilizará la ecuación de la recta, donde el dato del sensor de temperatura que llega en Voltios sea transformado en grados centígrados multiplicándose por la pendiente de la curva y sumándose o restándose por una constante que debe ser hallada en base a la ecuación de la recta. Se conoce que la relación entre voltaje y grados centígrados es 0,06.

Entonces. La relación entre Temperatura y Voltaje sería:

$$\frac{^{\circ}\text{C}}{V} = \frac{1}{\frac{V}{^{\circ}\text{C}}}$$

$$\frac{^{\circ}\text{C}}{V} = \frac{1}{0,06}$$

$$\frac{^{\circ}\text{C}}{V} = 16,67 \quad \text{Pendiente de la recta}$$

Siendo la ecuación de la recta:

$$y = mx + b$$

Reemplazando valores de “y” con valores de temperatura y valores de “x” con valores de voltaje de la tabla, se puede encontrar el valor de “b”.

$$26^{\circ}\text{C} = 16,67 \frac{^{\circ}\text{C}}{V} (6,986V) + b$$

$$26^{\circ}\text{C}. = 116,45^{\circ}\text{C}. + b$$

$$b = -90,45$$

La ecuación queda de la siguiente manera:

$$y = 16,67x - 90,45$$

Que para efecto de este proyecto queda de la siguiente manera:

$${}^{\circ}T = 16,67(V) - 90,45$$

La ganancia de nuestra referencia será 16,67 con lo que el bloque para escalamiento de datos quedaría de la siguiente manera:

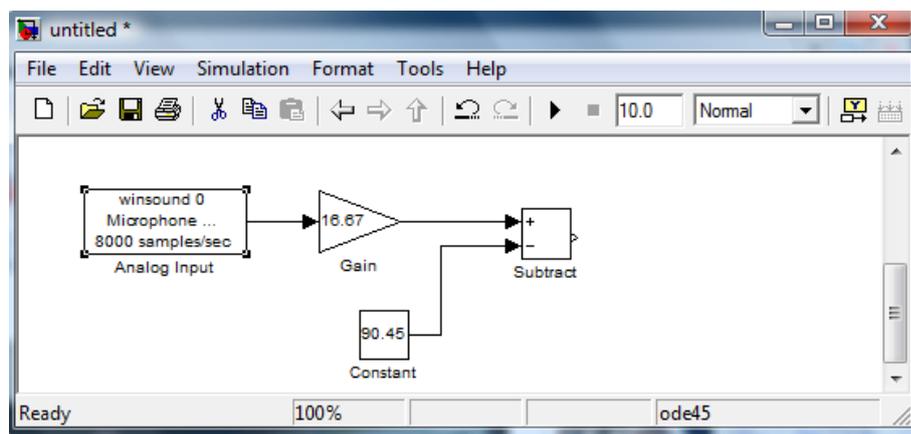


Figura 4.28 Escalamiento de datos para PT-100 en Simulink Fuente: Autores

Este valor aumentado en el diagrama de control será suficiente para equiparar las dos señales.

Para poder lograr una estabilidad con un sistema lineal, se ha provisto que la resistencia trabaje con un PWM para el control de la misma. La salida del sistema de control es una señal analógica que varía de 0 – 5voltios que controla de manera lineal el encendido de la resistencia.

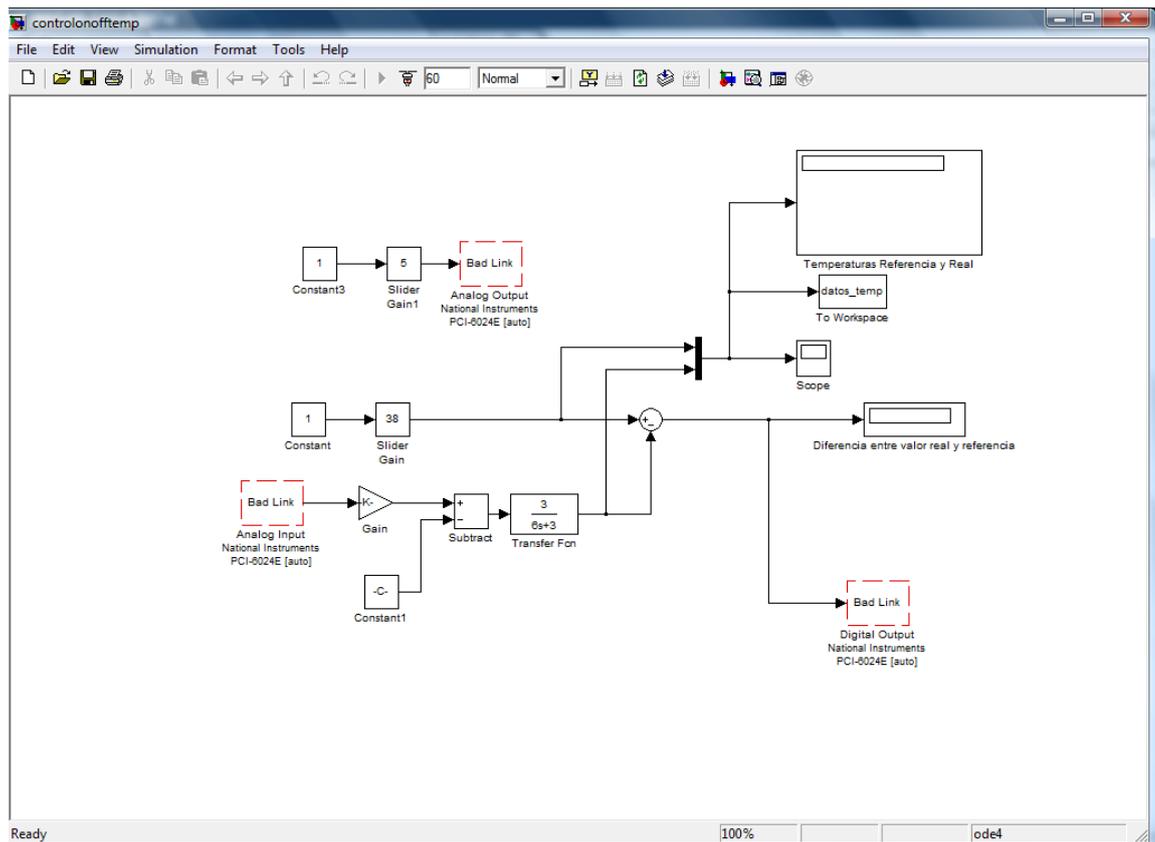


Figura 4.29 Modelo de control de temperatura Fuente: Autores

De esta manera queda el sistema de control para el sistema de calefacción en el Modulo # 2.

Este modelo puede cumplir el control del módulo y puede ser usado para las prácticas de control automático, se podrán obtener todos los datos en una escala y proceso real.

3. SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE CONTROL EN MÓDULOS.

La simulación de los módulos se hace con el objetivo de comprobar los datos reales en los que se maneja el proceso y la planta. Comprobar cuál es el tiempo de asentamiento, cual es el error de estado estable, etc. Una vez almacenados los datos del proceso podremos graficar las curvas y encontrar todos los datos concernientes a nuestros módulos.

3.1 SIMULACIÓN DE CONTROL DE MÓDULO DE NIVEL.

Una vez ya dimensionado el módulo de nivel nos queda realizar la simulación del mismo, para esto debemos haber configurado el Kernel en el real time Windows target, tal como está en el procedimiento de este capítulo.

Para poder simular el sistema de control de nivel, vamos a utilizar el modelo establecido para la simulación encontrado con la ayuda de la herramienta “identification tool”. De esta manera el modelo queda de la siguiente manera.

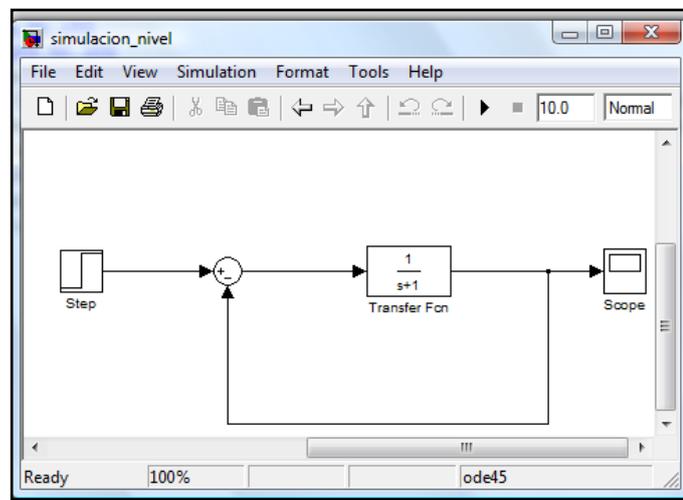


Figura 4.30 Modelo Teórico de control de nivel

Fuente: Autores

Con esto obtendremos el siguiente gráfico en el scope

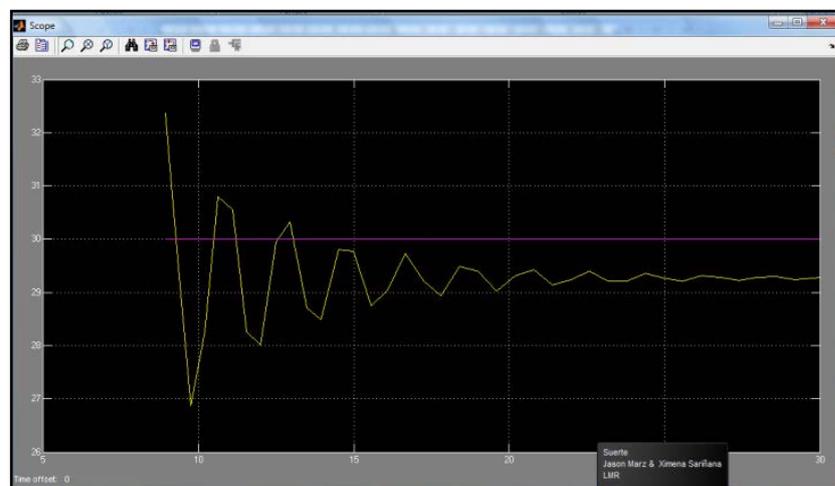


Figura 4.31 Curva de modelo usado en control nivel

Fuente: Autores

Con este gráfico podemos revisar como se acerca el proceso al punto de referencia. En base a este pequeño gráfico podemos calcular mediante los datos guardados en el *Workspace* cualquier parámetro del sistema.

3.2 SIMULACIÓN DE CONTROL DE MÓDULO DE TEMPERATURA.

Para poder simular el sistema de control de temperatura podemos utilizar el modelo calculado y dimensionado, realizando los ajustes al modelo podemos empezar la simulación. Será indispensable tener en claro los tiempos de respuesta, para poder hacer los ajustes a los dispositivos que se encuentran en el modelo.

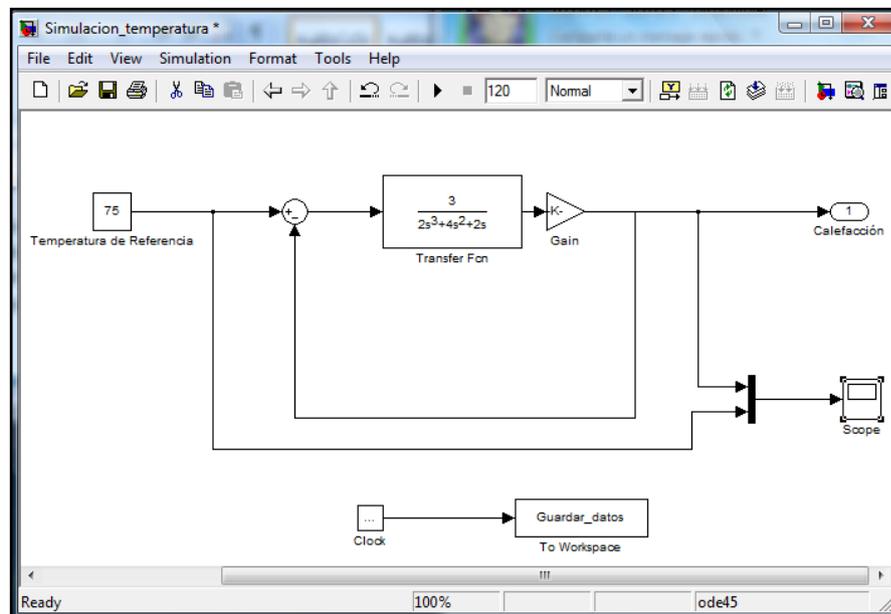


Figura 4.32 Modelo Teórico de control de temperatura

Fuente: Autores

Una vez realizado los ajustes podemos realizar la simulación, donde encontraremos el gráfico dado por el scope, otra vez guardamos los datos en el workspace para realizar posteriores cálculos.

CAPITULO # V

DESARROLLO DE PRÁCTICAS EN MÓDULOS

En el desarrollo de las prácticas se debe tomar en cuenta el cumplimiento total de los objetivos del módulo a fin de que sea una herramienta que contribuya en el desarrollo de los estudiantes en Control Automático.

Para esto se ha desarrollado un programa de prácticas que querrán cumplir con estos objetivos y serán conducidas de la siguiente manera:

- Práctica # 1.- Levantamiento de la Planta.
- Práctica # 2.- Introducción a Matlab y Simulink
- Práctica # 3.- Identificación de Sistemas
- Practica # 4.- Identificación de Sistemas en control de Nivel
- Práctica # 5.- Identificación de Sistemas en control de temperatura.
- Práctica # 6.- Selección de Sistemas de Control

- Práctica # 7.- Selección de Sistema de Control en módulo Temperatura.

Cada una de las prácticas será desarrollada a continuación, dando a conocer cada paso de tal manera que se conozcan los resultados y se establezcan los criterios que se usaron para llegar a los mismos.

1. PRÁCTICA # 1 – LEVANTAMIENTO DE LA PLANTA

Vamos a desarrollar el levantamiento completo de la planta, que consiste básicamente en dos módulos, el primero, el módulo de control de nivel y el segundo, el módulo de control de temperatura.

A continuación veremos qué objetivos se requieren cumplir en esta práctica:

- Lograr que el estudiante se familiarice con los módulos de control automático donde realizará las prácticas, las variables que controlan cada uno de los procesos así como la plataforma en la que puede ser operado.
- Con la ayuda de la medición de datos conocer el tiempo de respuesta de cada sistema, conocer la capacidad del mismo para futuras aplicaciones.

Las herramientas que se utilizarán serán las siguientes:

- PC
- Tarjeta de adquisición de Datos PCI-6024 E
- Cable de interfaz National Instruments SH68-68-EP
- Bloque conector SCB68
- Software *Matlab*
- Software *Measurement & Automation*
- Módulo de control de Nivel
- Módulo de control de Temperatura

Desarrollo:

Desarrollar el diagrama de proceso del modulo de control de nivel, citando cada parte que lo conforma. En esta parte nosotros encontraremos el módulo de la siguiente manera:



Figura 5.1 Vista frontal del módulo de control de Nivel. Fuente: Autores



Figura 5.2 Vista de módulo de control de nivel. Fuente: Autores

Con esto podemos realizar un diagrama nombrando las partes que conforman el módulo de control de nivel que serían:

- ✓ Tanque alimentación
- ✓ Bomba de carga
- ✓ Tanque de proceso
- ✓ Válvula solenoide unidireccional
- ✓ Transmisor de presión 4-20mA de 0 a 5psi
- ✓ Válvula check ½" NPT
- ✓ Mirilla de control visual

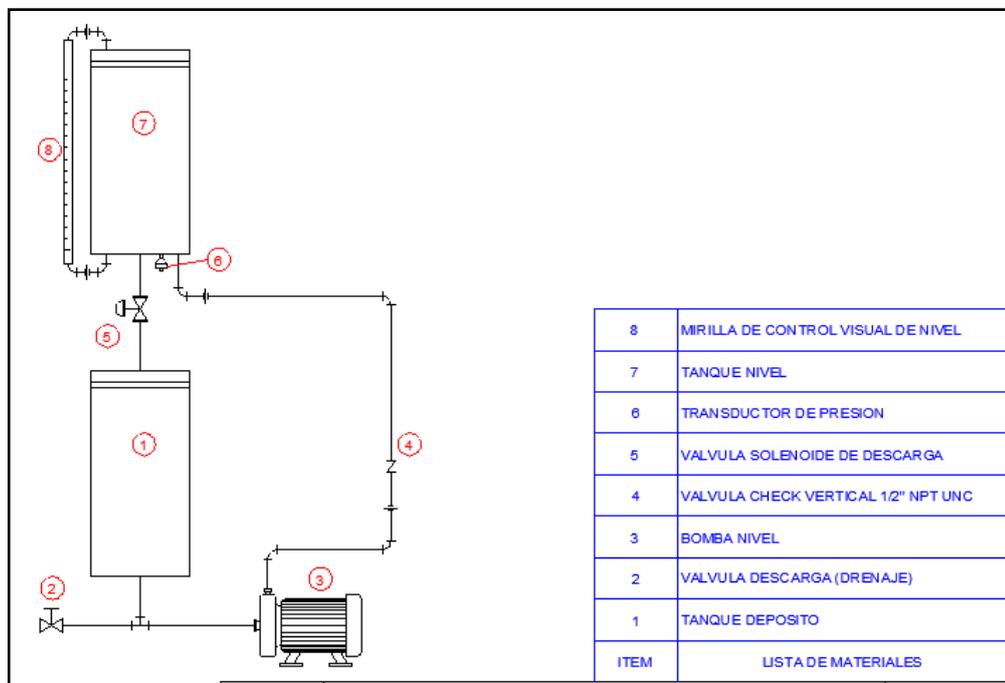


Figura 5.3 Diagrama esquemático de funcionamiento módulo nivel. Fuente: Autores

Analizando este diagrama entendemos que la bomba sube agua del tanque de depósito al tanque de nivel, mientras el transmisor de presión nos da una lectura de la cantidad de agua que existe en el tanque de nivel. También podemos entender que la válvula solenoide puede dejar pasar agua del tanque de nivel al tanque depósito. Con esto, bajaría el nivel del tanque de agua. Además tenemos una mirilla que nos dice la altura en la que se encuentra el tanque de nivel. La válvula check nos ayuda impidiendo que el agua en el tanque nivel regrese al tanque depósito.

Para este módulo es indispensable tener en claro que el sistema de control debe ser aplicado directamente a la bomba de carga y a la válvula solenoide como actuadores o dispositivos de salida y al transmisor de presión como entrada al sistema que con esto podemos tener en claro el nivel del agua en el tanque.

Para el módulo de control de temperatura debemos realizar la misma operación.



Figura 5.4 Módulo de control de temperatura Fuente: Autores

Verificando en sitio este módulo podemos constatar que los componentes principales del mismo son:

- ✓ Tanque depósito
- ✓ Bomba de temperatura
- ✓ Tanque de calefacción
- ✓ Resistencia Calefactora 220V 1500Watts
- ✓ Termocupla tipo J
- ✓ Motor agitador 110V.
- ✓ Ventilador
- ✓ Radiador
- ✓ Válvulas solenoide de desvío, para simular perturbaciones.

Para poder entender mejor este módulo será necesario dibujarlo de tal manera que pueda ser descrito de una manera fácil.

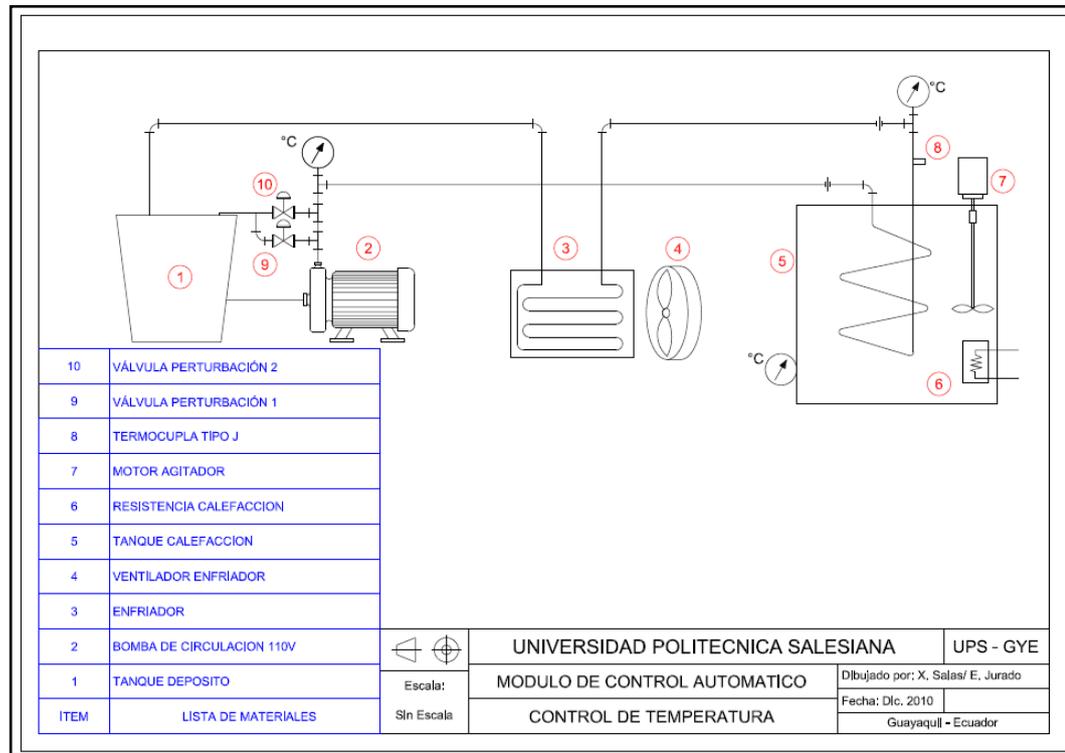


Figura 5.5 Diagrama de funcionamiento de módulo temperatura Fuente: Autores

El funcionamiento de este módulo es relativamente fácil, la bomba de calefacción que es encendida desde el tablero principal en conjunto con el ventilador, el agitador y las válvulas de perturbación 1 y 2, bombea agua desde el tanque depósito la cual pasa por un serpentín que se encuentra sumergido en un líquido calentado por la resistencia calefactora, la misma que será controlada por el sistema de control de *Matlab*. Una termocupla sensorará la temperatura del agua a la salida del serpentín, donde pasará por un radiador ventilado, donde se pretende disminuir la temperatura del líquido antes de que esta vuelva al tanque. En el interior del tanque se encuentra un agitador que homogenizará la temperatura del tanque, también se encuentran dos válvulas de perturbación que trabajan de manera independiente para disminuir el caudal de agua en el circuito cerrado antes de que ingrese al tanque de calefacción.

Toma de Tiempos de Respuesta de los Sistemas

Con la ayuda del “Test panel”, de la tarjeta PCI 6024-E, verificar los datos en el modulo de control de nivel, tanto de llenado como de vaciado del sistema.

Una vez verificado que esté instalada la tarjeta PCI 6024-E, se ingresa por medio del acceso directo del escritorio “*Measurement & Automation*”, al enlace denominado “*Devices & Interfaces*”.

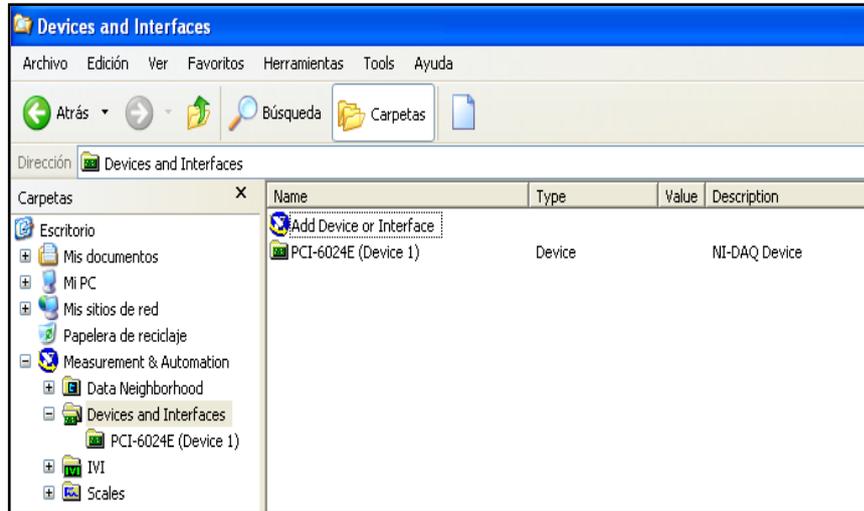


Figura 5.6 Vista de tarjeta PCI-6024 E Fuente: Autores

Donde dando click derecho en el icono “*National Instruments PCI 6024-E*”, encontraremos en la viñeta el enlace “*Test panel*”.

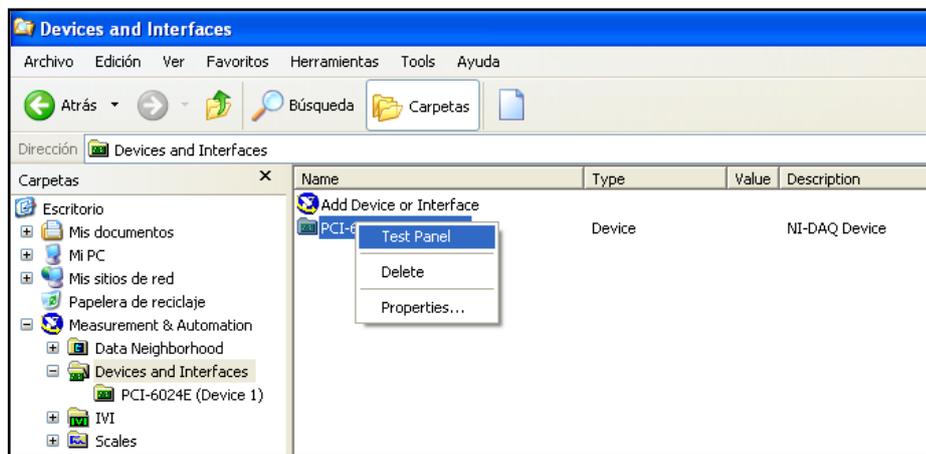


Figura 5.7 Apertura de la opción test panel de la tarjeta Fuente: Autores

Abriendo la ventana accedemos a la viñeta “*Digital Inputs & Outputs*”.

Ubicando como salidas “D0” y “D1”, como salidas de la bomba de nivel y de la válvula solenoide respectivamente.

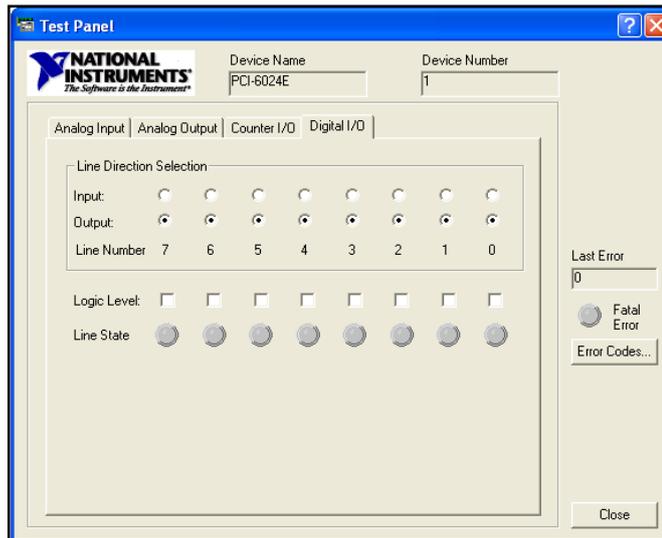


Figura 5.8 Vista de entradas y salidas digitales del test panel Fuente: Autores

Verificando que el nivel del tanque se encuentra en su punto mínimo procedemos a encender la bomba presionando el casillero correspondiente, tal como muestra la figura.



Figura 5.9 Vista para la activación de la bomba de nivel Fuente: Autores

Desde ese momento se toma el tiempo hasta que el tanque alcance su capacidad máxima (25cms), y apagando la bomba cuando llegue a este punto.

Se procede de la misma manera con la válvula solenoide, tomando el tiempo de vaciado del tanque de nivel.

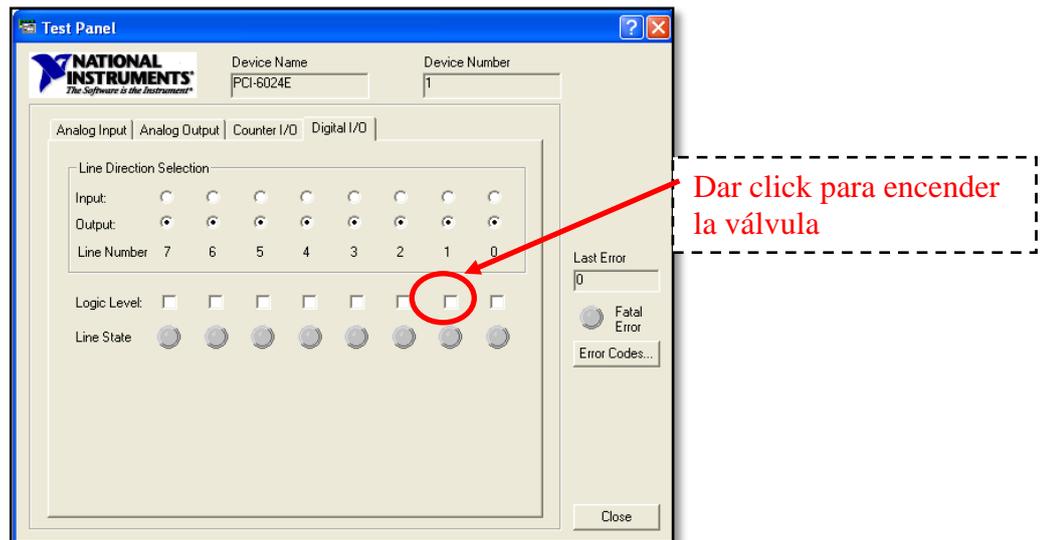


Figura 5.10 Encendido manual de la válvula solenoide en test panel Fuente: Autores

Con la ayuda del “Test panel”, de la tarjeta PCI 6024-E, verificar los datos en el modulo de control de temperatura, verificando el tiempo de variación de temperatura desde la temperatura ambiente como referencia hasta 42°C.

Antes de encender las resistencias eléctricas para la medición del tiempo de calentamiento del tanque, encendemos la bomba del modulo de control de temperatura, de la misma manera se encienden el agitador y el ventilador, ubicados en la parte frontal del tablero eléctrico de los módulos.



Figura 5.11 Vista de tablero principal-encendido de accesorios Fuente: Autores

En la vista del tablero principal se observa los indicadores del estado de los siguientes dispositivos:

- Bomba de Temperatura (Modulo de temperatura)
- Resistencia Calefactora (Modulo de temperatura)
- Bomba de nivel (Modulo de nivel)

- Válvula de nivel (Modulo de nivel)

La operación manual de los selectores para el encendido de los dispositivos en el modulo de control de temperatura se los visualiza en el tablero principal:

- Selector de Bomba de Temperatura: Enciende la bomba de recirculación.
- Selector del Agitador: Enciende el agitador para homogenizar el agua en el tanque de calefacción.
- Selector del Ventilador enfriador: Enciende el ventilador para enfriar al agua de retorno al tanque de depósito.
- Selectores de Válvulas de desvío #1 y #2: Encienden las válvulas para generar perturbación en el sistema.

Una vez verificado que esté instalada la tarjeta PCI 6024-E, se ingresa por medio del acceso directo del escritorio "*Measurement & Automation*", al enlace denominado "*Devices & Interfaces*".

Donde dando click derecho en el icono "*National Instruments PCI 6024-E*", encontraremos en la viñeta el enlace "*Test panel*".

Abriendo la ventana accedemos a la viñeta "*Analog Outputs*".

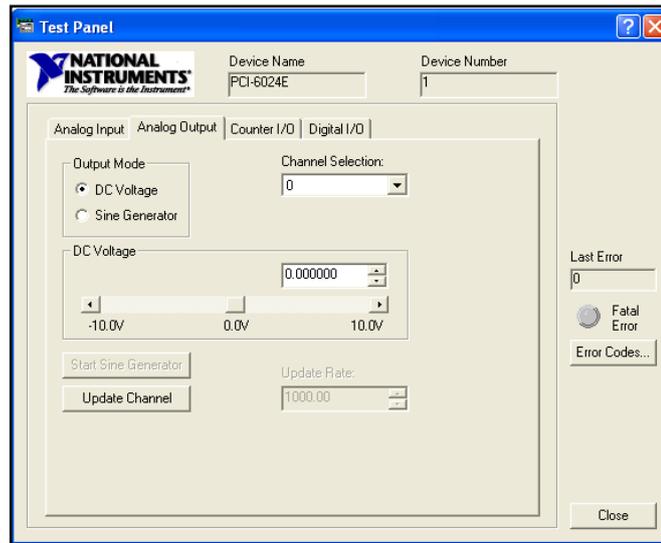


Figura 5.12 Vista de pantalla de Analog Output Fuente: Autores

Para el control de la temperatura en el sistema, se cuenta con un PWM que se enlaza con la resistencia eléctrica encargada de elevar la temperatura del tanque.

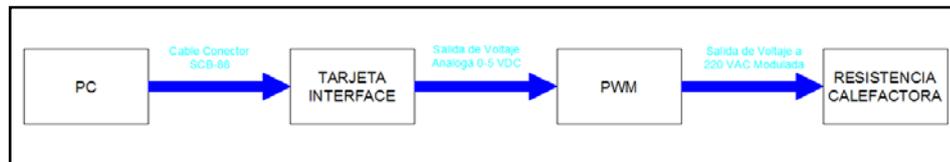


Figura 5.13 Diagrama de funcionamiento de resistencia calefactora Fuente: Autores

Se debe seleccionar “channel 0” y ubicar una salida de voltaje de 5 VDC, para luego proceder a presionar el botón “Update channel”, con lo cual se está disponiendo que la resistencia trabaje en su máxima capacidad.

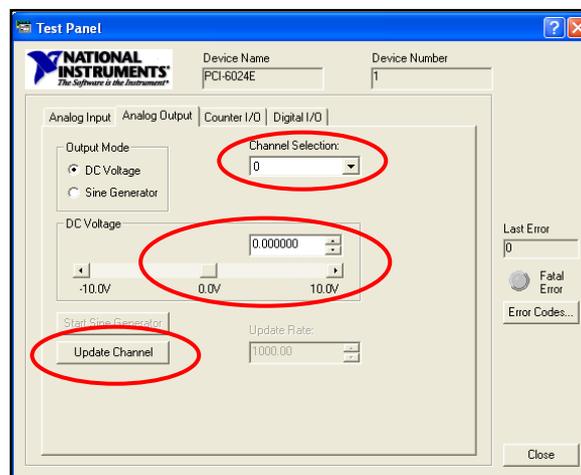


Figura 5.14 Activación de resistencia calefactora desde Test panel Fuente: Autores

Cuando llegue a su máxima capacidad la temperatura de salida de agua del tanque de calefacción (40°C.), se ubicará nuevamente el voltaje de salida del “channel 0” en 0 VDC y se procede a activar el botón “update channel”. Con esto se apagará la resistencia y se tomará el tiempo que le tomo a la resistencia elevar la temperatura del agua desde la temperatura ambiente hasta la temperatura máxima que debe alcanzar (40°C.).

Con la ayuda del “Test panel”, de la tarjeta PCI 6024-E, verificar los datos en el modulo de control de temperatura, verificando el tiempo de variación de temperatura desde la temperatura ambiente como referencia hasta 40°C, considerando la apertura de la válvula solenoide # 1 y luego la válvula solenoide # 2.

Se realiza los mismos pasos que en el caso anterior sólo que en este se enciende la válvula de desvío # 1, en el tablero principal, y se toman los datos.

Se apaga la válvula de desvío # 1 y se procede a encender la válvula de desvío # 2 en el tablero principal, con esto se toman los datos de tiempo y temperatura.

Luego se mantienen encendidas las dos válvulas de desvío y se toman los datos.

Tabulando todos los datos obtenemos:

Tiempo de respuesta	Actuador	
Nivel mínimo a máximo	Bomba	68 segundos
Nivel máximo a mínimo	Válvula	634 segundos

Tabla 5.1 Tiempos de respuesta de módulo de nivel Fuente: Autor

Tiempo de respuesta	28°C. a 40°C.
Sin perturbación	560 segundos
Con 1 perturbación	428 segundos
Con 2 perturbaciones	414 segundos

Tabla 5.2 Tiempos de respuesta de módulo de temperatura Fuente: Autor

2. PRÁCTICA # 2 – INTRODUCCIÓN A MATLAB Y SIMULINK

Para realizar las siguientes prácticas es necesario tener en claro los conocimientos básicos del uso del Software Matlab y del módulo Simulink (perteneciente al mismo programa).

Los Objetivos a cumplir en esta práctica serán:

- Conocer el uso y aplicación básica de Matlab y Simulink, respecto a su aplicación directa en control automático.
- Realizar simulaciones de sistemas de control en Simulink y conocer cuáles son las ventajas que tenemos con este programa a la hora de realizar las prácticas de control automático.

Las herramientas a utilizar serán las siguientes:

- ✓ PC
- ✓ Software Matlab
- ✓ Tarjeta de adquisición de Datos PCI-6024 E

Desarrollo:

Lo primero que debemos hacer es abrir el programa *Matlab* donde encontraremos la siguiente pantalla:

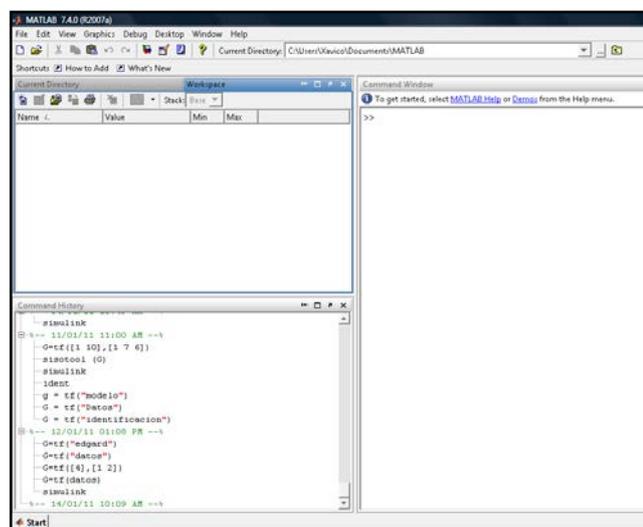


Figura 5.15 Vista de principal de programa Matlab

Fuente: Autor

Aquí podemos encontrar la pantalla dividida en las siguientes partes:

Command Window.- ó su nombre en español ventana de comandos, en esta ventana se realizan todas las acciones que se ejecuten dentro del programa.

Current Directory.- Directorio actual, muestra en qué carpetas se están guardando los archivos del programa.

Workspace.- Es la ventana donde podemos observar y utilizar las variables generadas en command window.

Command History.- En esta ventana se encuentra un historial de todos los comandos usados en matlab, desde la ventana de comandos (command window).

A continuación se muestran comandos básicos de matlab, para conocimiento general deberían ejecutarse y ver lo sus efectos en la ventana de comandos y en workspace.

Ahora vamos a crear funciones de transferencias desde la misma ventana de comandos. Entonces procedemos a escribir lo siguiente:

$G=tf([1 \ 10],[1 \ 2 \ 4])$

Con esto se guardará la función de transferencia de la siguiente manera:

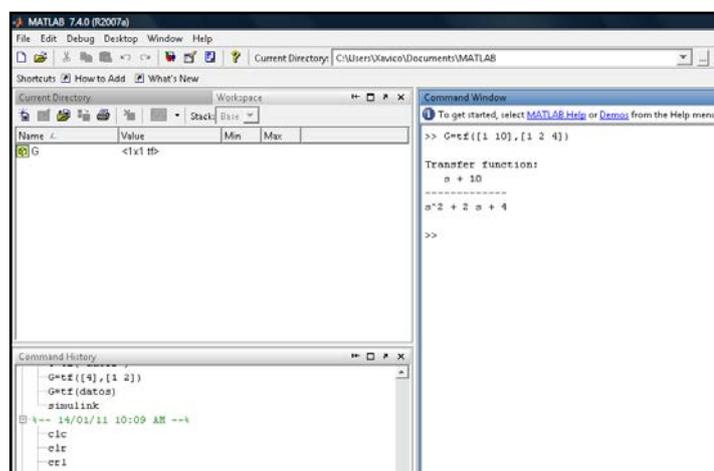


Figura 5.16 Vista de la creación de una función de transferencia Fuente: Autor

Podemos ver con esto que para crear una función de transferencia es necesario escribir las letras “tf”, después del signo “=”, con esto definimos a Matlab que los siguientes datos describen una función de transferencia, los números que van en el corchete del lado derecho son las constantes que pertenecen al numerador de la función, mientras los corchetes a la izquierda (separados por la coma “,”) corresponden a las constantes del denominador.

Reducción de Funciones de transferencia en *Matlab*

Es fácil realizar reducción de transferencias en *Matlab*, sólo se necesita realizarlo bajo el mismo método en el que se realiza normalmente, sólo que *Matlab*, lo hace más rápido. Para nuestro un ejemplo tendremos el siguiente proceso matemático:

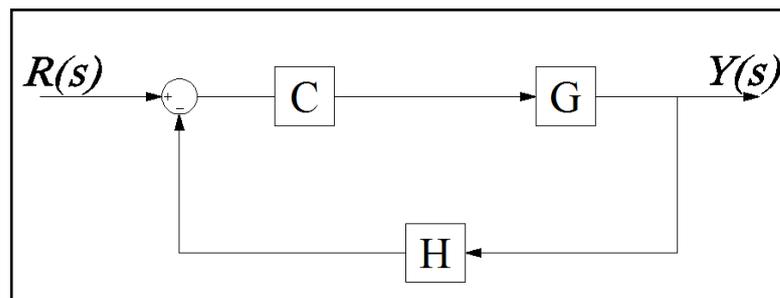


Figura 5.17 Representación de una función de transferencia Fuente: Autor

Donde:

$$C = \frac{3s + 1}{s}$$

$$G = \frac{5s + 4}{s^2 + 3s + 1}$$

$$H = \frac{s + 2}{s + 5}$$

Entonces se escriben los siguientes comandos para guardar esas variables:

```
>> C=tf([3 1],[1 0])
```

```
>> G=tf([5 4],[1 3 1])
```

```
>> H=tf([1 2],[1 5])
```

Después de esto podremos observar que la pantalla de matlab queda de la siguiente manera, después de que guarde las variables.

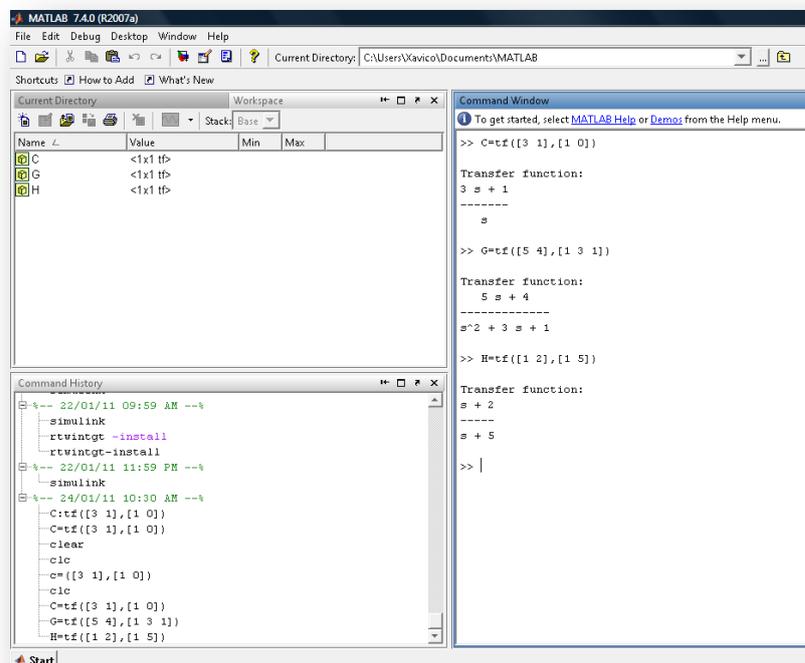


Figura 5.18 Pantalla en Matlab de construcción de bloques y variables. Fuente: autor

Para simplificar el proceso que tenemos, debemos empezar por los bloques que tenemos en paralelo para nuestro caso serán C y G.

Colocamos el nombre de una nueva variable que se llamara G1, que representará al conjunto en serie de las variables C y G

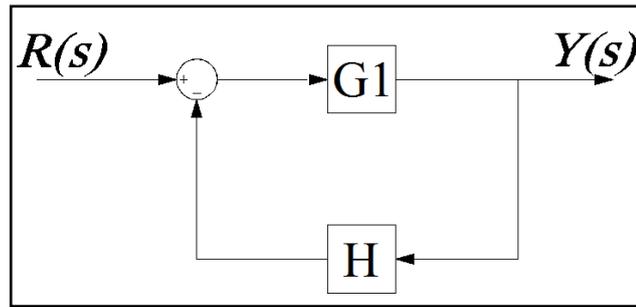


Figura 5.19 Función simplificada en los bloques en serie Fuente: autor

Para esto en matlab escribimos:

>> G1=series(C,G) y con esto obtenemos

$$\frac{15s^2 + 17s + 4}{s^3 + 3s^2 + s}$$

Luego de esto escribimos una nueva variable para terminar de simplificar el proceso la cual sería T. Debemos tener en cuenta la realimentación para poder simplificar G1 y H, ya que si esta es positiva se escribirá primero el bloque en la parte superior, luego separado por una coma el bloque inferior y se le adicionará +1, pero si es con realimentación negativa, sólo se pondrá las dos variables.

>> T=feedback(G1,H) ; con realimentación negativa

>> T=feedback(G1,H,+1); con realimentación positiva

Nosotros usaremos la realimentación negativa para nuestro caso.

Y nos mostrará el siguiente resultado:

$$\frac{15s^3 + 92s^2 + 89s + 20}{s^4 + 23s^3 + 63s^2 + 43s + 8}$$

Este sería el valor correspondiente al bloque T, tal como se muestra en la figura

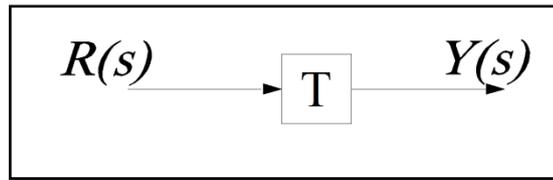


Figura 5.20 Función de Transferencia Simplificada Fuente: Autor

PRÁCTICA # 3 IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS

Para poder encontrar el controlador más efectivo para nuestra planta será necesario encontrar la función de transferencia que se asemeje a nuestro proceso.

Objetivos:

- Entender el procedimiento de identificación de sistemas con la herramienta *Identification tool*.

Las herramientas a utilizar serán las siguientes:

- ✓ PC
- ✓ Software Matlab

Desarrollo:

Asumimos que tenemos un proceso cuya función de transferencia es:

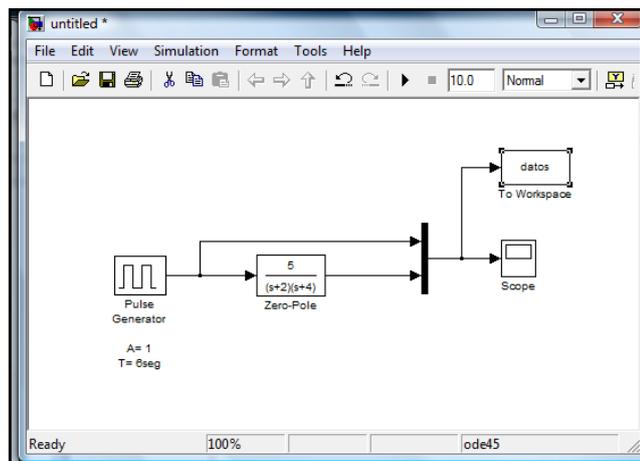


Figura 5.21 Simulación de proceso

Fuente: Autores

Primero, debemos tener en cuenta cual será el tiempo de muestreo (sample time) para este sistema, es fácil configurarlo teniendo en cuenta el generador de pulso cuyo periodo es 6 segundos a medio paso, que será 3 segundos en una amplitud de 1 y 3 segundos en una amplitud cero.

El tiempo de muestreo viene dada por la siguiente ecuación:

$$T_m = 1 / (n \cdot W_b)$$

Donde:

T_m = tiempo de muestreo

n = valor de constante de asentamiento para este caso es 20

W_b = frecuencia de ancho de banda

Sabemos que la frecuencia es el valor inverso del periodo con lo que decimos:

$$W_b = 1/6$$

Entonces reemplazando los valores la ecuación queda:

$$T_m = 1 / (20 * (1/6))$$

$$T_m = 0.3 \text{ segundos}$$

El tiempo total de simulación será de un valor múltiplo del tiempo de muestreo y del período de la onda. Para dejar que sean 5 períodos de medición, se dejará el valor del tiempo de simulación en 30 segundos.

Con esto procedemos a configurar el diseño.

Abrimos simulation, y damos click en configuration parameters.

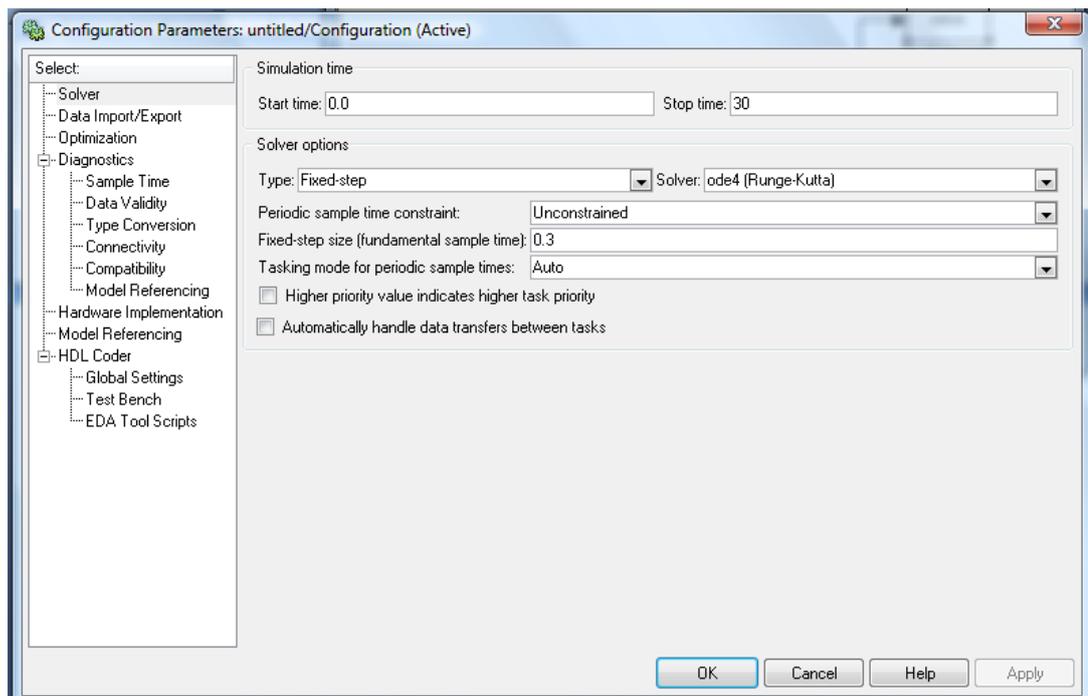


Figura 5.22 Configuración del tiempo de muestreo y tiempo total de simulación

Fuente: Autores

En type ponemos fixed step y en solver Ode4, además le ubicamos el tiempo de muestreo en fixed step size y en el stop time el valor del tiempo total de simulación.

Luego configuramos, el bloque to workspace.

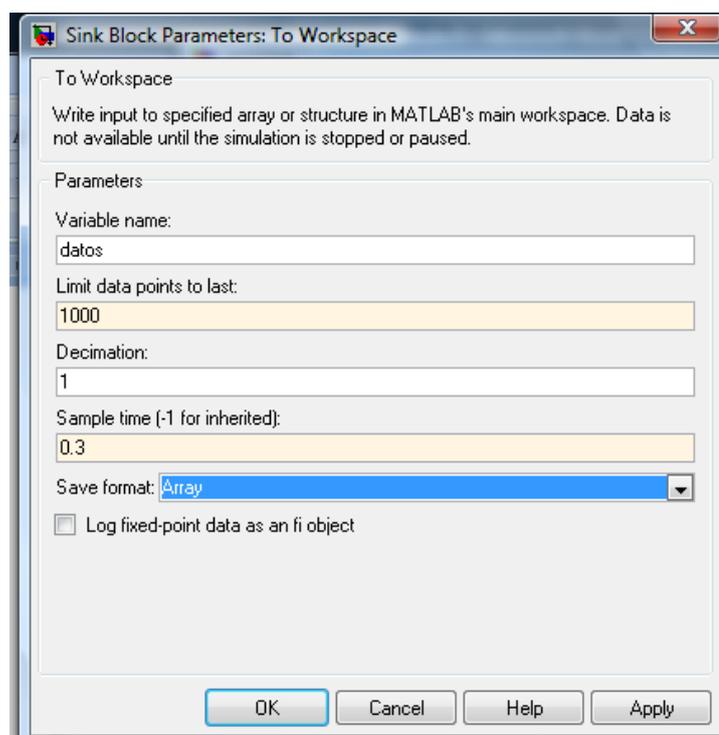


Figura 5.23 Configuración de los puntos de muestreo

Fuente: Autores

Ponemos el nombre de la variable, en este caso datos, luego en limit data ponemos la división entre el tiempo de simulación vs el tiempo de muestreo que nos dará el número de puntos a tomar. Ponemos el tiempo de muestreo y el formato en el que vamos a grabar será array. Damos un ok.

Configuramos scope dando un click en el icono.

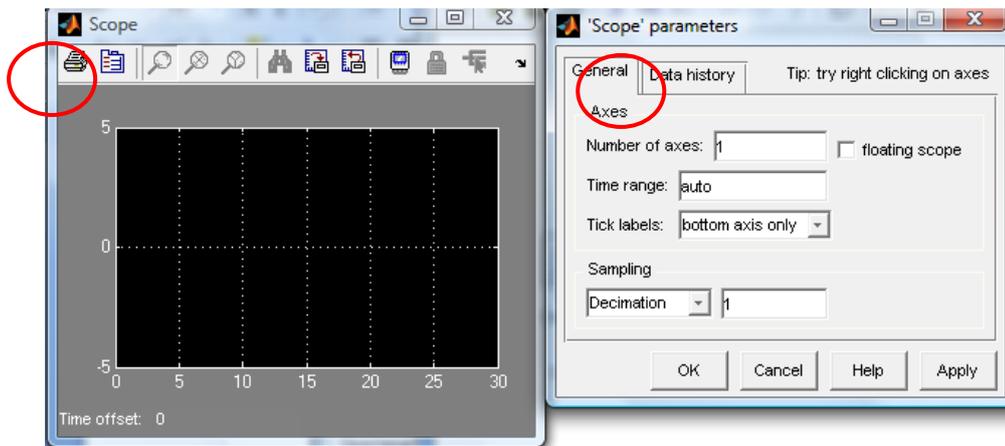


Figura 5.24 Configuración del scope

Fuente: Autores

Y ponemos en data history el valor del límite de puntos que vamos a tomar para este proceso, en nuestro caso 1000.

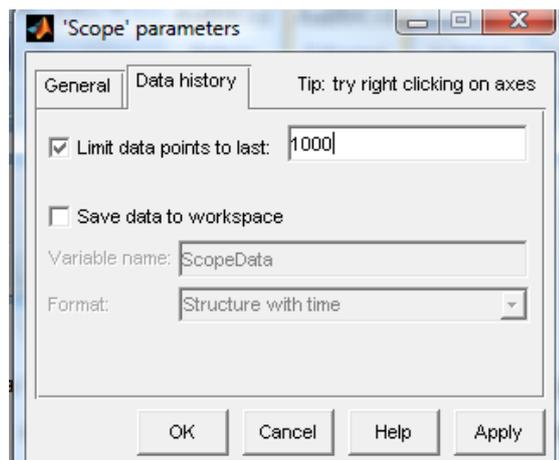


Figura 5.25 Configuración de límites de puntos en el scope

Fuente: Autores

Por último guardamos nuestro proyecto, para proceder a realizar la simulación.

Dando click en Play. Luego abrimos el scope y podemos visualizar el gráfico.

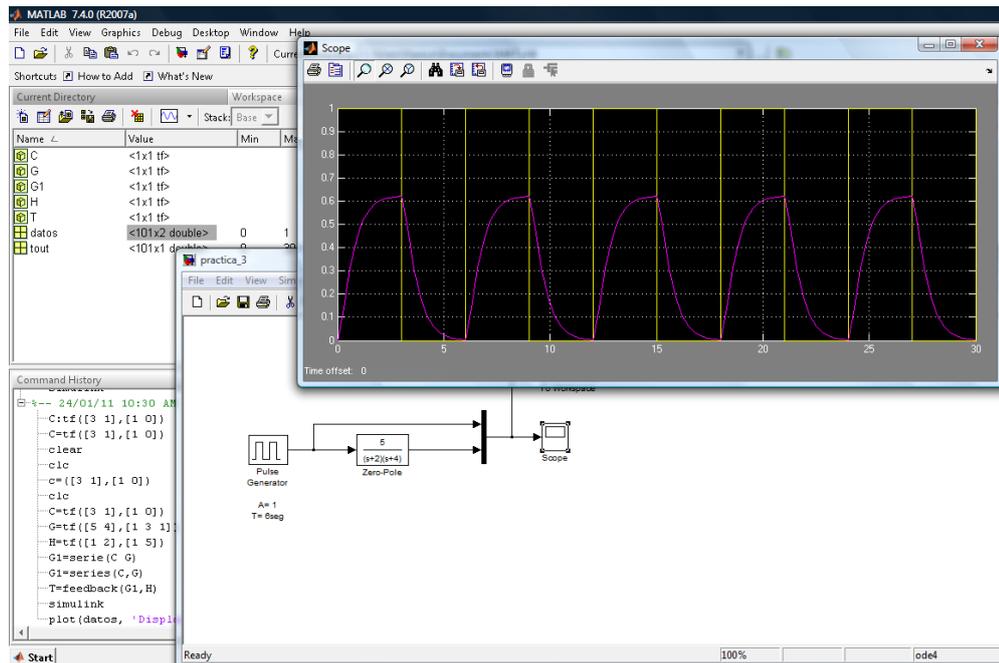


Figura 5.26 Visualización del scope

Fuente: Autores

En la ventana principal de Matlab abrir la herramienta de identificación “System Identification” usando el comando “ident”, aparecerá la siguiente ventana:

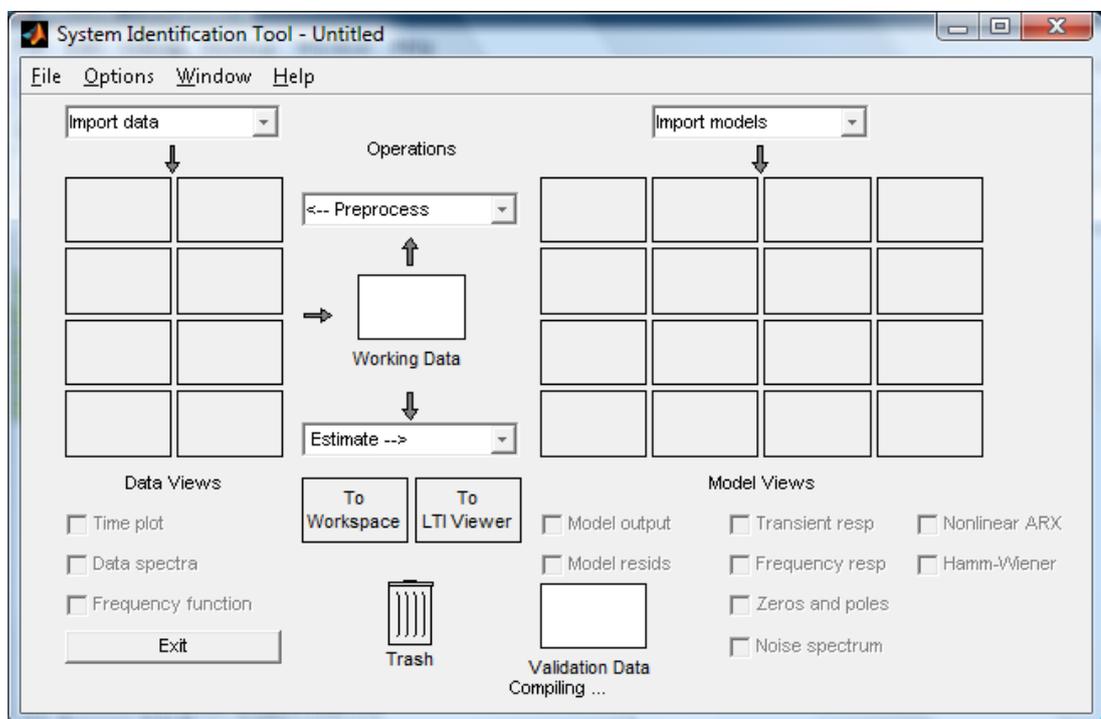


Figura 5.27 Importación de datos

Fuente: Autores

Presionamos Import data y seleccionamos Time domain y configuramos, ubicando el nombre de nuestros datos y ubicando para la entrada la columna 1 y para la salida la columna 2. Le ponemos un nombre a estos datos, el tiempo de inicio es cero y el intervalo de muestreo es igual al tiempo de muestreo. Con lo que obtenemos:

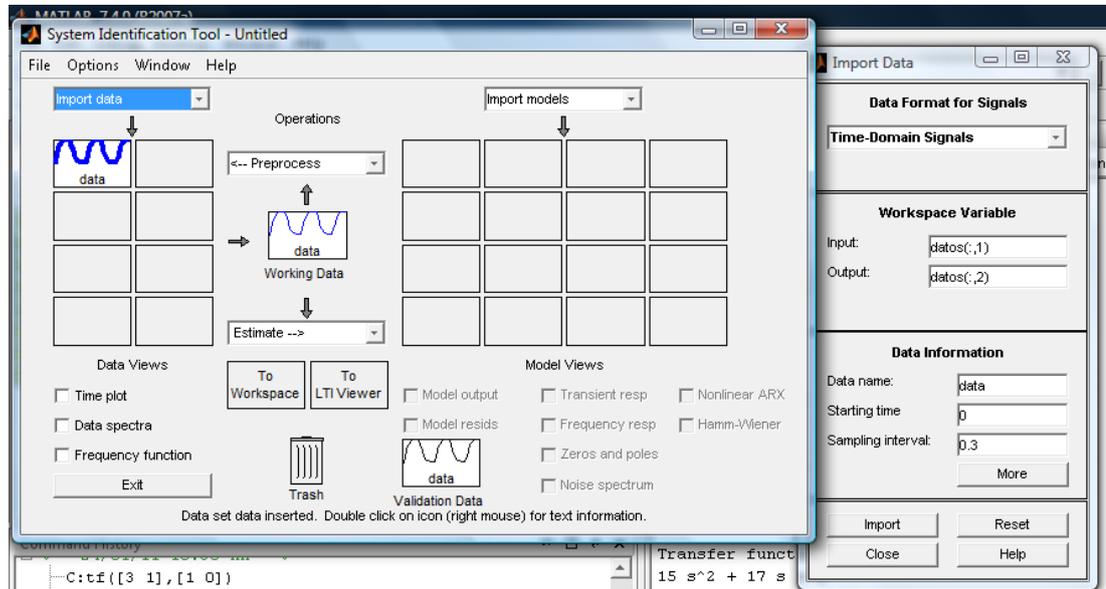


Figura 5.28 Selección de periodos de muestreo Fuente: Autores

En Operations ponemos select range, y seleccionamos cuantos periodos vamos a muestrear, en nuestro caso como ya seleccionamos 5 periodos, no le hacemos nada.

En operations nuevamente seleccionamos remove means con lo que se borran los valores promedios. Y aparece un nuevo gráfico.

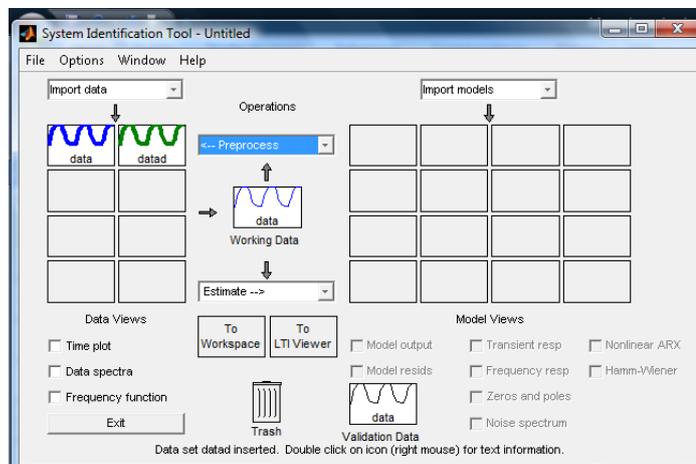


Figura 5.29 Desplazamiento de gráfico a working data y validación data Fuente: Autores

Y halamos con el mouse este ultimo gráfico al cuadro working data y validation data

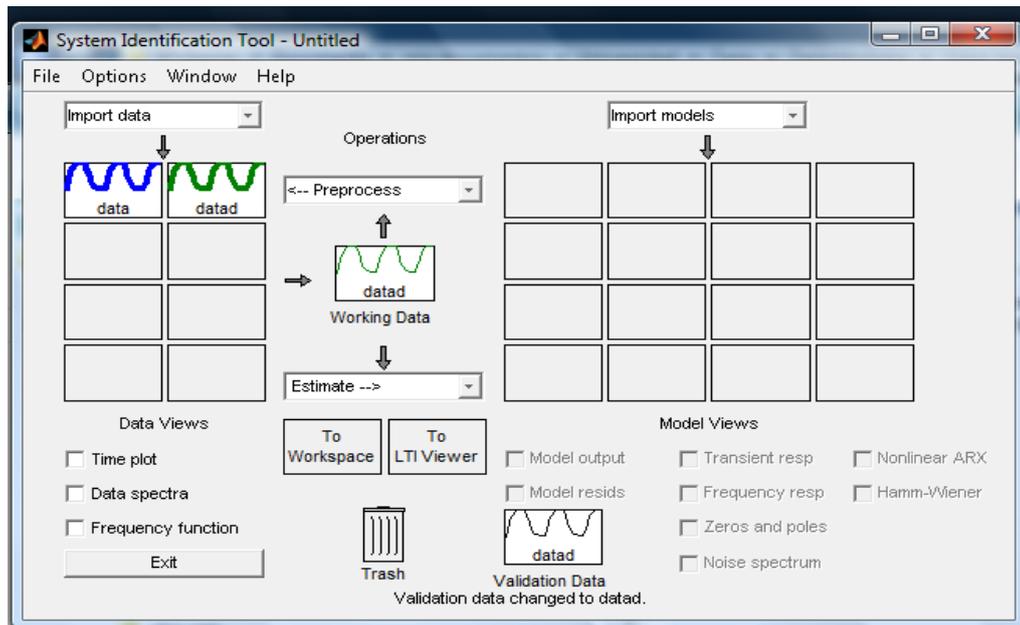


Figura 5.30 Estimación del proceso con proces model

Fuente: Autores

Para realizar la estimación usamos proces model, le borramos el cuadro de retraso (delay) y ponemos con un polo, luego estimamos, después con dos polos y estimamos, al final con dos polos y un cero. tal como se muestra en la figura.

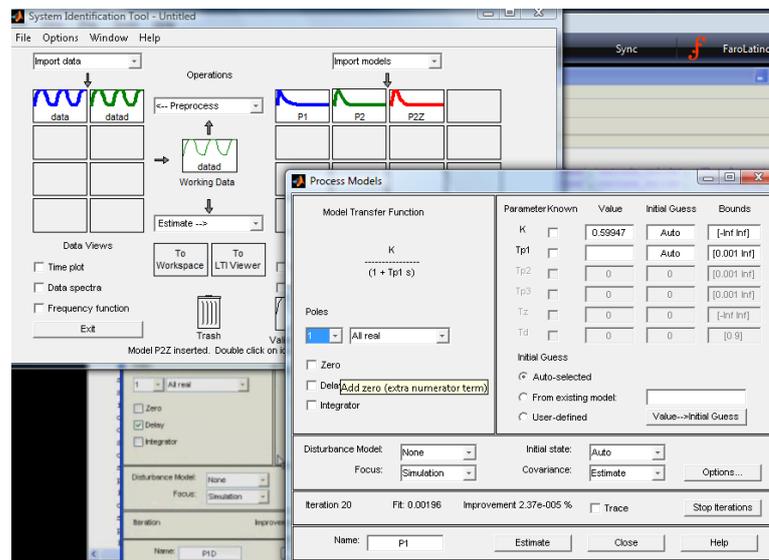


Figura 5.31 Selección del model output

Fuente: Autores

Volvemos a la página de system identification tool y presionamos model output.

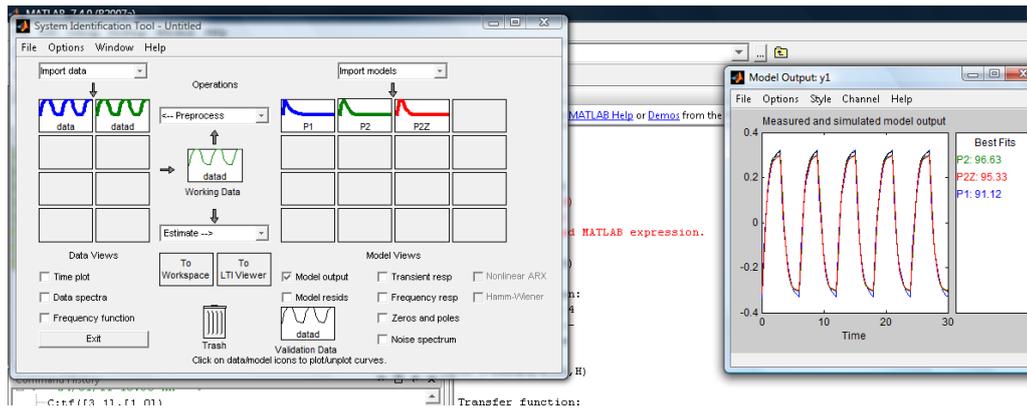


Figura 5.32 Estimación de polos

Fuente: Autores

Como podemos observar quién tiene más porcentaje de acercamiento es la estimación con dos polos. Halamos la gráfica P2 a to workspace.

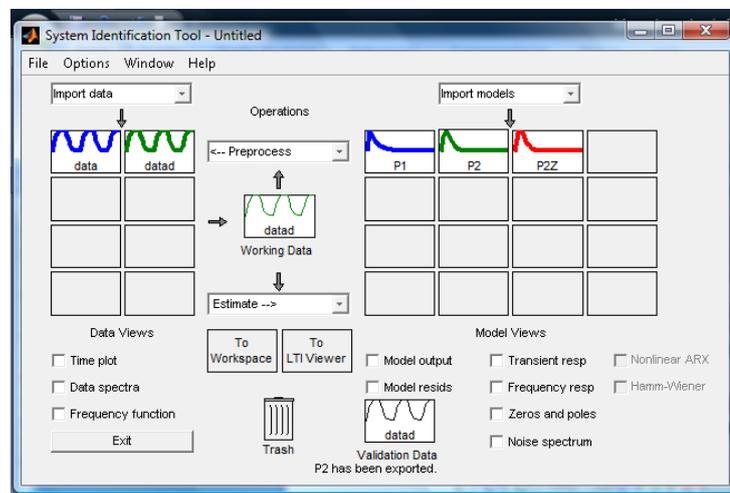


Figura 5.33 Simulación de proceso

Fuente: Autores

Escribimos un comando para hacerlo una función de transferencia. `>> F=tf(P2)`

Con lo que obtenemos lo siguiente:

```
>> F=tf(P2)
```

Transfer function from input "u1" to output "y1":

$$\frac{4.451}{s^2 + 5.42s + 7.344}$$

Transfer function from input "v@y1" to output "y1":

0.0238

Input groups:

Name	Channels
Measured	1
Noise	2

Comprobamos que los valores son parecidos a los de la función de transferencia inicial.

4. PRÁCTICA # 4 IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS EN MODULO CONTROL DE NIVEL

Para poder encontrar el controlador más efectivo para nuestra planta será necesario encontrar la función de transferencia que se asemeje a nuestro proceso.

Objetivos:

- Entender cómo se realiza el procedimiento de identificación de sistemas en un módulo real de control de nivel.

Las herramientas a utilizar serán las siguientes:

- ✓ PC
- ✓ Software Matlab
- ✓ Tarjeta PCI-6024 E
- ✓ Cable Blindado SCB 68-68
- ✓ Bloque conector
- ✓ Modulo de control de Nivel

Desarrollo:

Generar el siguiente modelo:

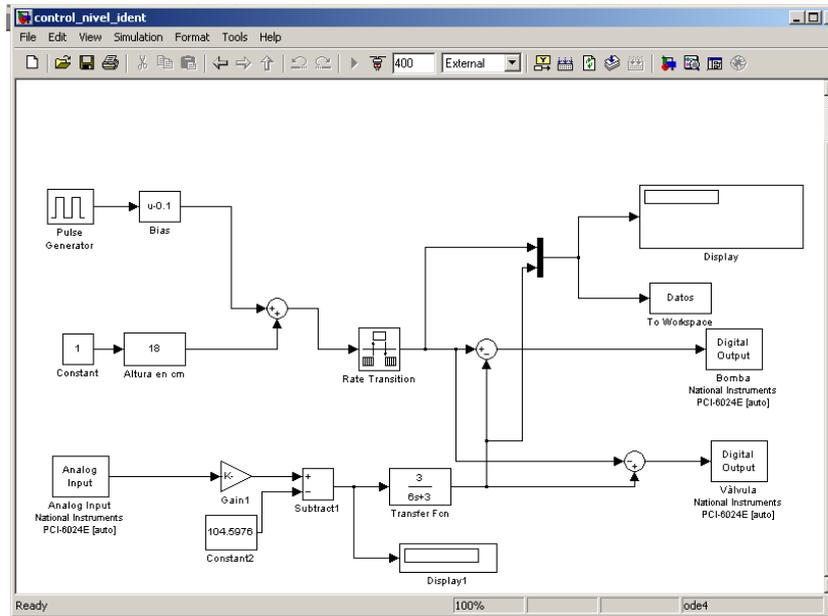


Figura 5.34 Modelo de control de nivel

Fuente: Autores

Sample Time: 0.1

Stop time: 400

Pulse generator

A: 5

Time: 60

Pulse Width: 15%

Se realiza la simulación en tiempo real de este sistema donde se obtendrán los siguientes datos:

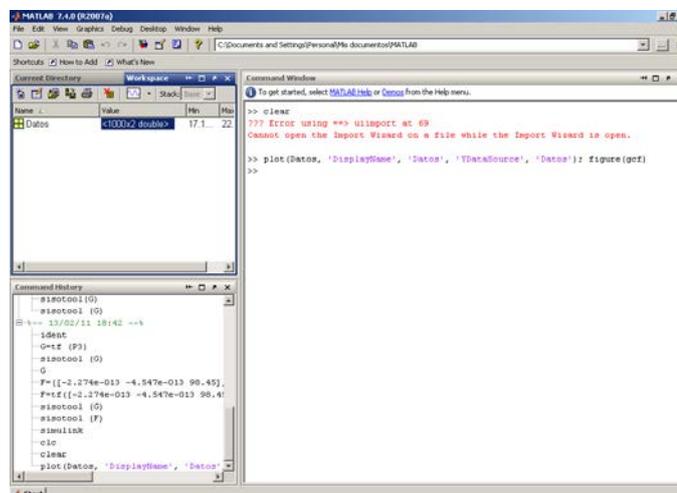


Figura 5.35 Vista de la creación de datos en el workspace

Fuente: Autores

Y se abre la herramienta Identification Tool presionando el comando ident en la ventana de comando de Matlab.

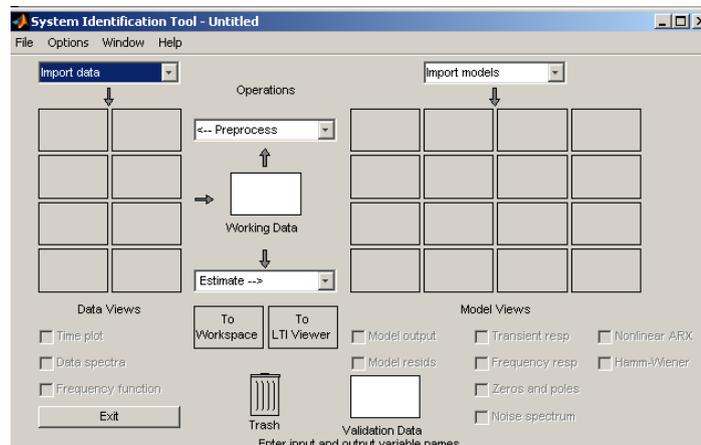


Figura 5.36 Ingreso a Sisotool Fuente: Autores

Luego se procede a importar los datos de la planta presionando Time domain y se ajustará de la siguiente manera:

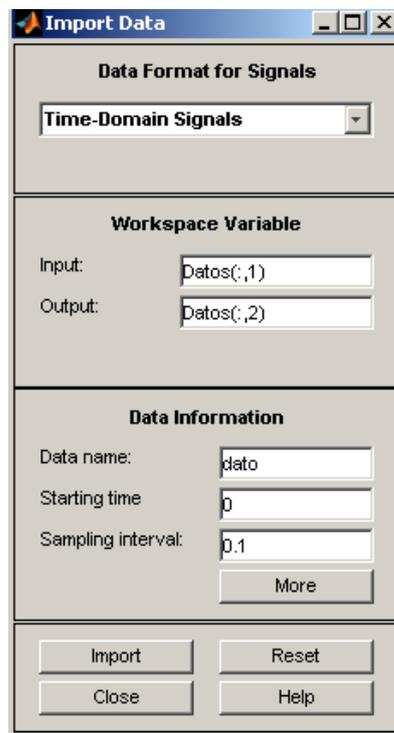


Figura 5.37 Importación de datos Fuente: Autores

Una vez obtenido los datos procedemos a sacar los promedios en Operations se escoge la opción Remove Means.

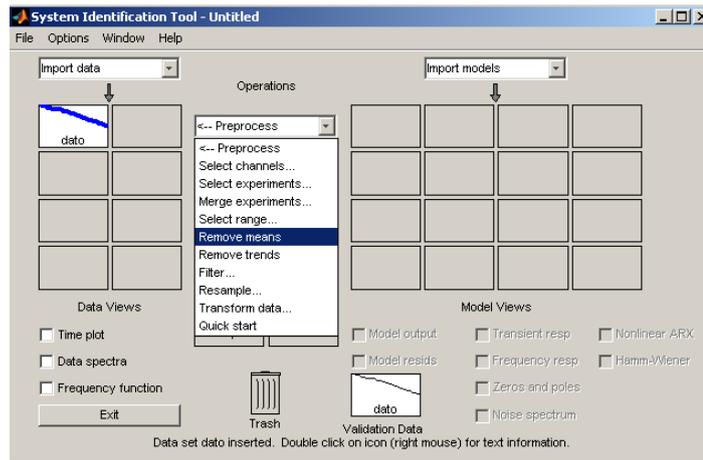


Figura 5.38 Selección de Remove means

Fuente: Autores

Con esto se obtiene un nuevo recuadro (Datod), el cual se lo debe llevar a Working Data y Validating Data

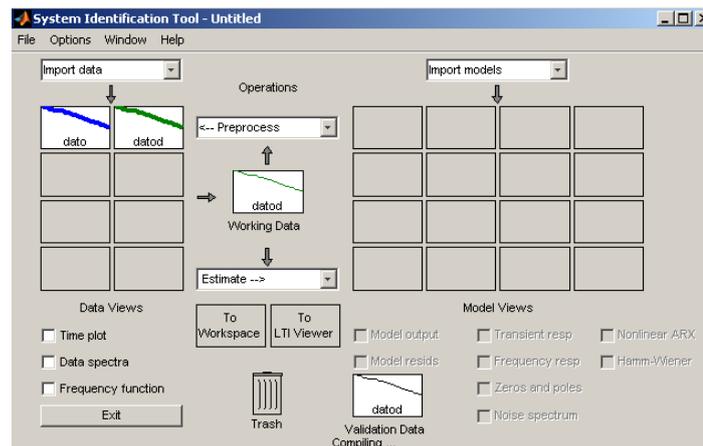


Figura 5.39 Desplazamiento de gráficos a working data y validation data

Fuente: Autores

Ahora se debe estimar la función de transferencia equivalente al sistema ubicando en Estimate el comando Process Model y se debe borrar el retraso (Delay). Se debe estimar con todas las variable posibles de tal manera que se tenga la mayor cantidad de opciones posibles.

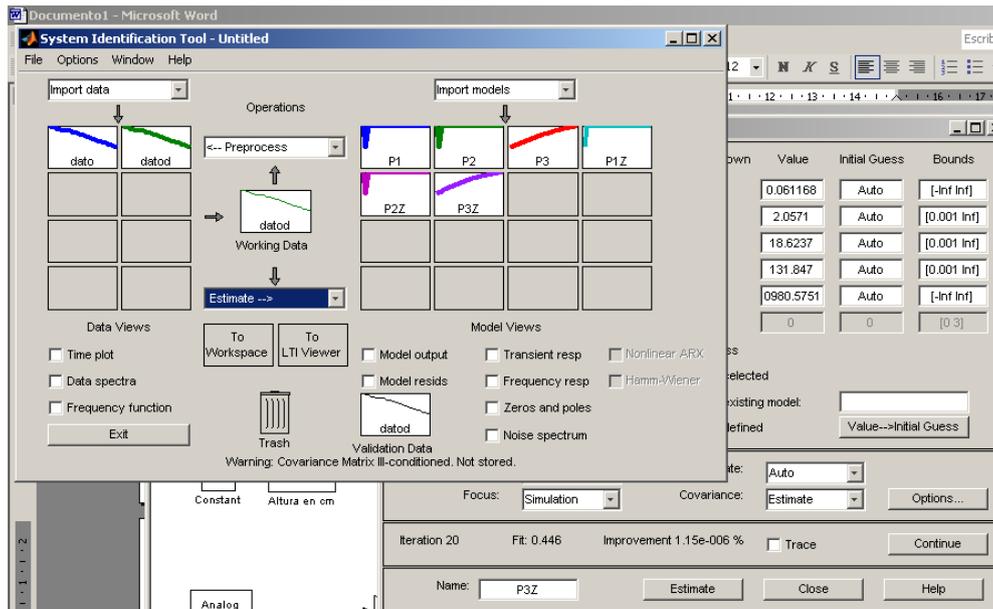


Figura 5.40 Generación de modelos Fuente: Autores

Para encontrar cuál de estos modelos es el más parecido al sistema se presiona el botón Model Output y con esto aparecen las opciones y se escoge la que mejor parezca. Para este caso es la opción con 3 Polos como se muestra en la figura:

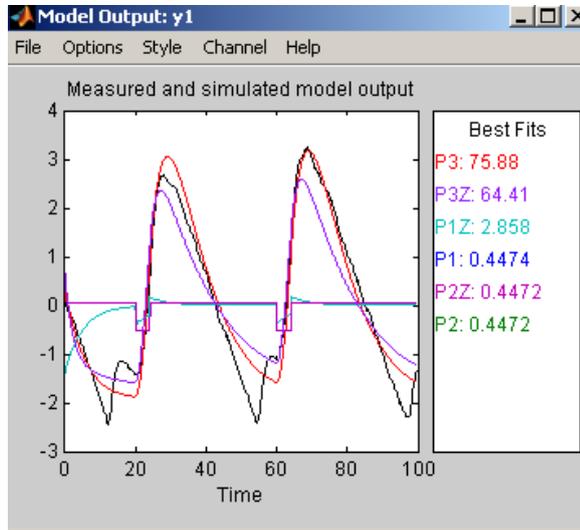


Figura 5.41 Selección del modelo más parecido al sistema Fuente: Autores

En la ventana system identification se lleva P3 manteniendo presionado hasta To Workspace. Una vez hecho esto aparece en la ventana Workspace de Matlab esta variable. Se procede a transformar esta variable en una función de transferencia escribiendo el siguiente comando:

$$G=tf(P3)$$

Y se mostrará la siguiente Figura:

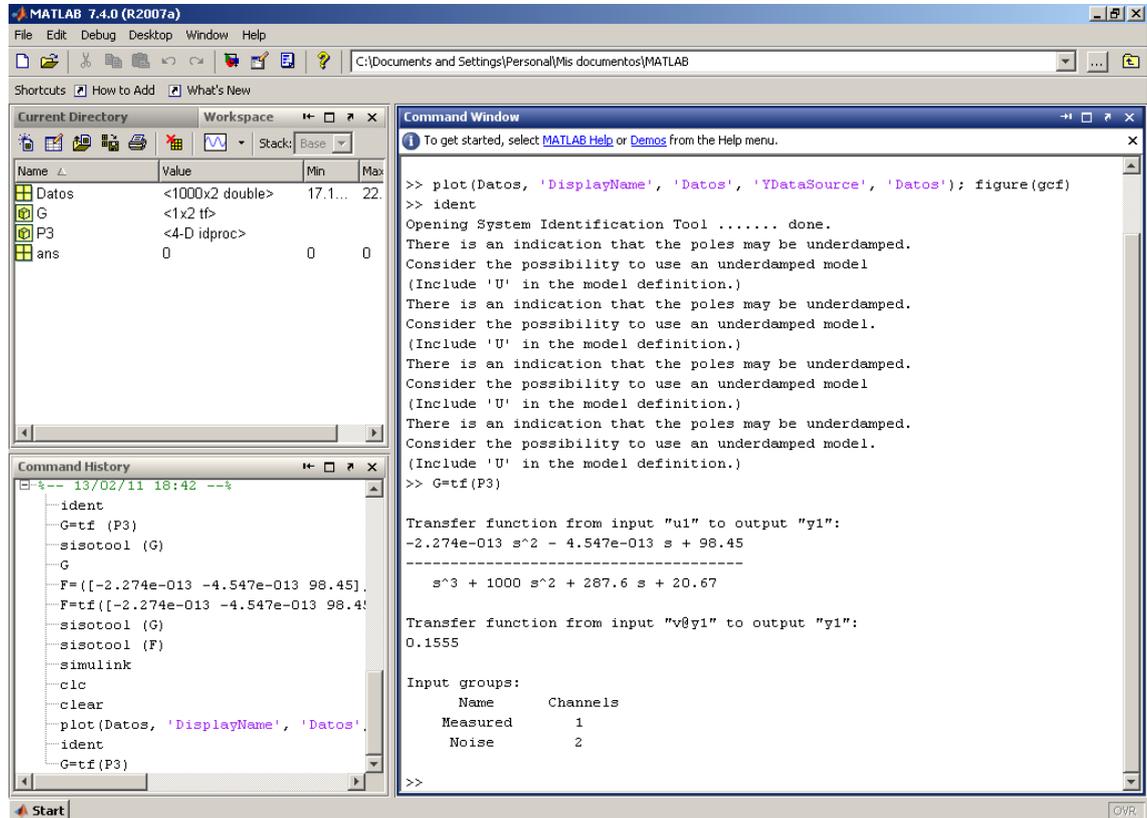


Figura 5.42 Obtención de la función de transferencia del sistema

Fuente: Autores

Con esto se obtiene la función de transferencia del sistema:

$$G = \frac{-2.274e^{-13}S^2 - 4.547e^{-13}S + 98.45}{S^3 + 1000S^2 + 287.6S + 20.67}$$

5. PRÁCTICA # 5 IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS EN MODULO CONTROL DE TEMPERATURA

Para poder encontrar el controlador más efectivo para la planta será necesario encontrar la función de transferencia que se asemeje al proceso.

Objetivos:

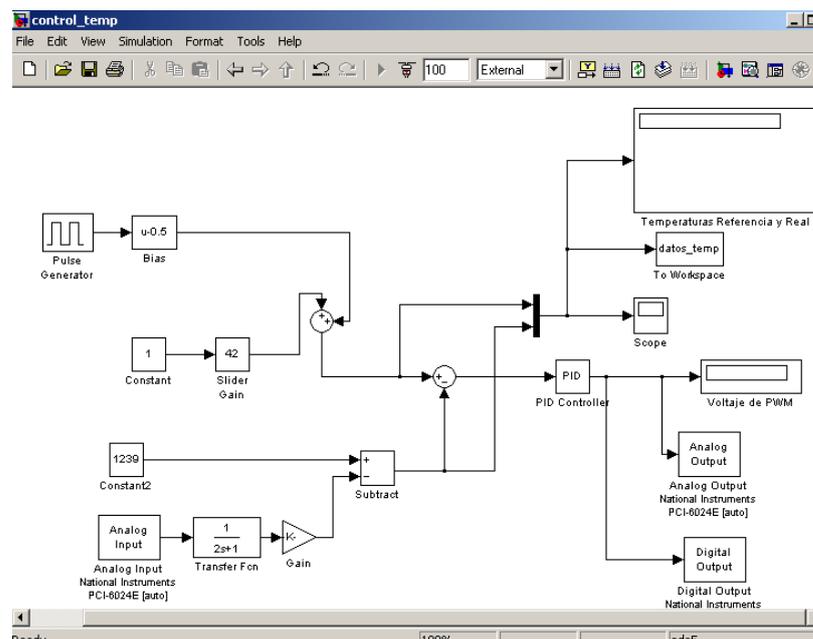
- Entender cómo se realiza el procedimiento de identificación de sistemas en un módulo real de control de temperatura.

Las herramientas a utilizar serán las siguientes:

- ✓ PC
- ✓ Software Matlab
- ✓ Tarjeta PCI-6024 E
- ✓ Cable Blindado SCB 68-68
- ✓ Bloque conector
- ✓ Modulo de control de Temperatura

Desarrollo:

Generar el siguiente modelo:



Sample Time: 0.1

Stop time: 400

Pulse generator

A: 1 Time: 60 Pulse Width: 15%

Slider Gain: 28

Se realiza la simulación en tiempo real de este sistema donde se obtendrán los siguientes datos:

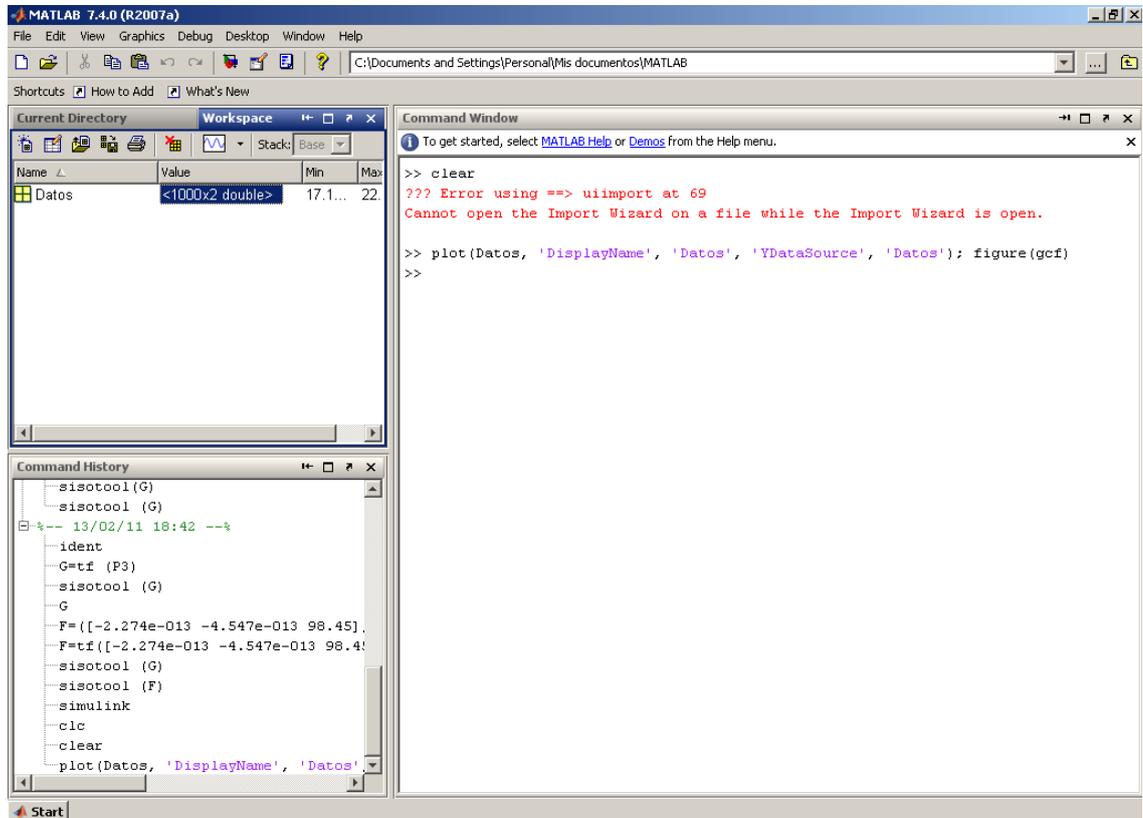


Figura 5.44 Vista de la creación de datos en workspace Fuente: Autores

Y se abre la herramienta Identification Tool presionando el comando ident en la ventana de comando de Matlab.

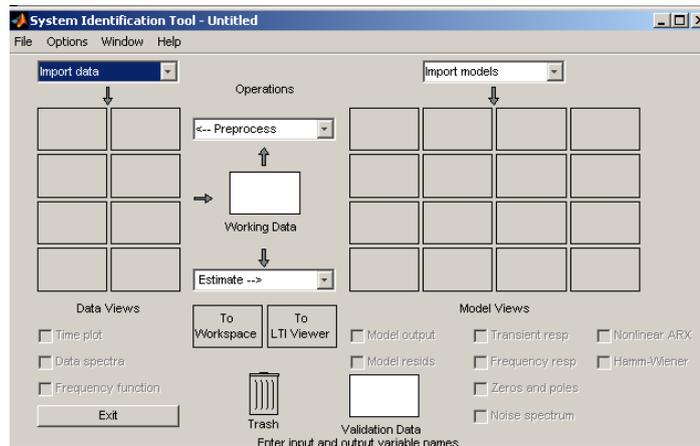


Figura 5.45 Ingreso a sisotool Fuente: Autores

Luego se procede a importar los datos de la planta presionando Time domain y se ajustará de la siguiente manera:

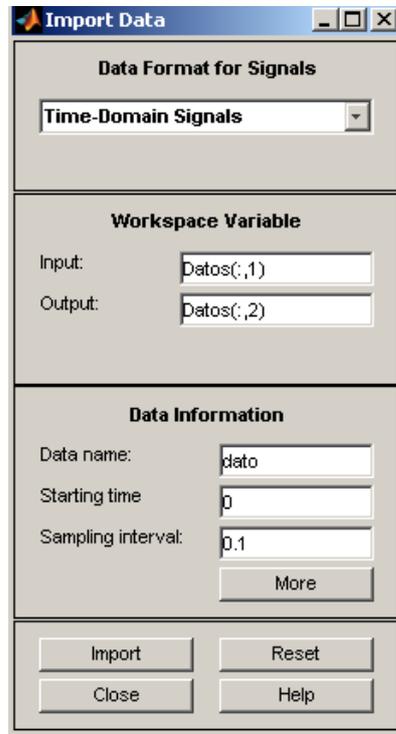


Figura 5.46 Importación de datos

Fuente: Autores

Una vez obtenido los datos procedemos a sacar los promedios en Operations se escoge la opción Remove Means.

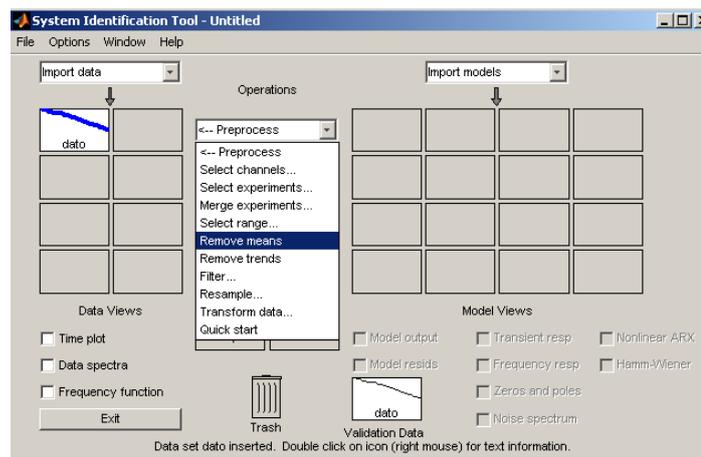


Figura 5.47 Selección de Remove means

Fuente: Autores

Con esto se obtiene un nuevo recuadro (Datod), el cual se lo debe llevar a Working Data y Validating Data

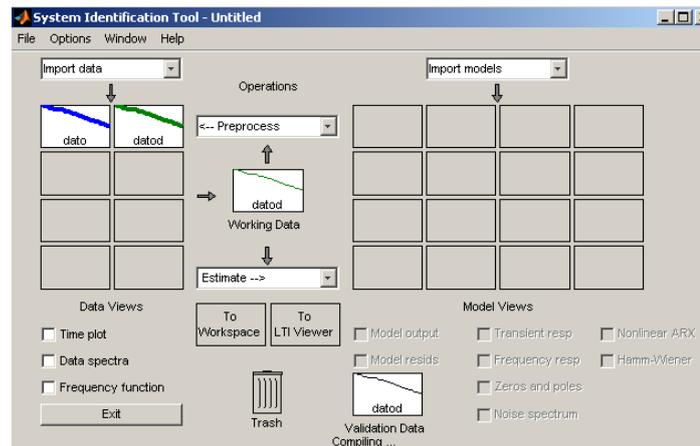


Figura 5.48 Desplazamiento de gráficos a working data y validating data

Fuente: Autores

Ahora se debe estimar la función de transferencia equivalente al sistema ubicando en Estimate el comando Process Model y se debe borrar el retraso (Delay). Se debe estimar con todas las variable posibles de tal manera que se tenga la mayor cantidad de opciones posibles

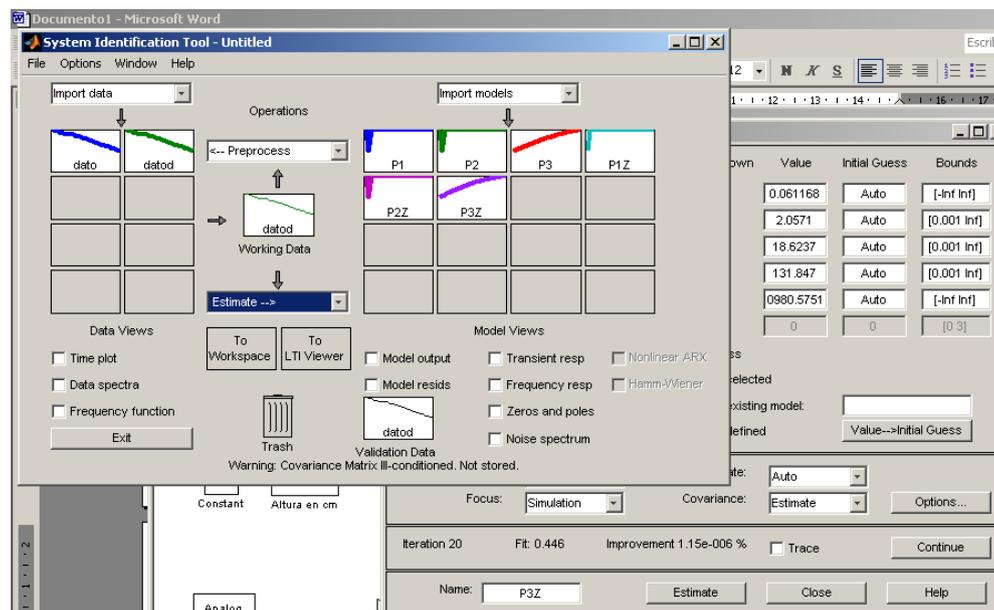


Figura 5.49 Generación de modelos

Fuente: Autores

Para encontrar cuál de estos modelos es el más parecido al sistema se presiona el botón Model Output y con esto aparecen las opciones y se escoge la que mejor parezca. Para este caso es la opción con 3 Polos como se muestra en la figura:

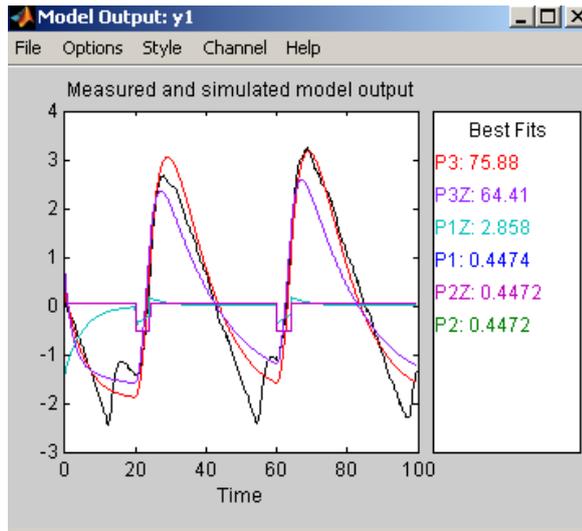


Figura 5.50 Selección del modelo más parecido al sistema Fuente: Autores

En la ventana system identification se lleva P3 manteniendo presionado hasta To Workspace. Una vez hecho esto aparece en la ventana Workspace de Matlab esta variable. Se procede a transformar esta variable en una función de transferencia escribiendo el siguiente comando:

$$G=tf(P3)$$

Y se mostrará la siguiente Figura:

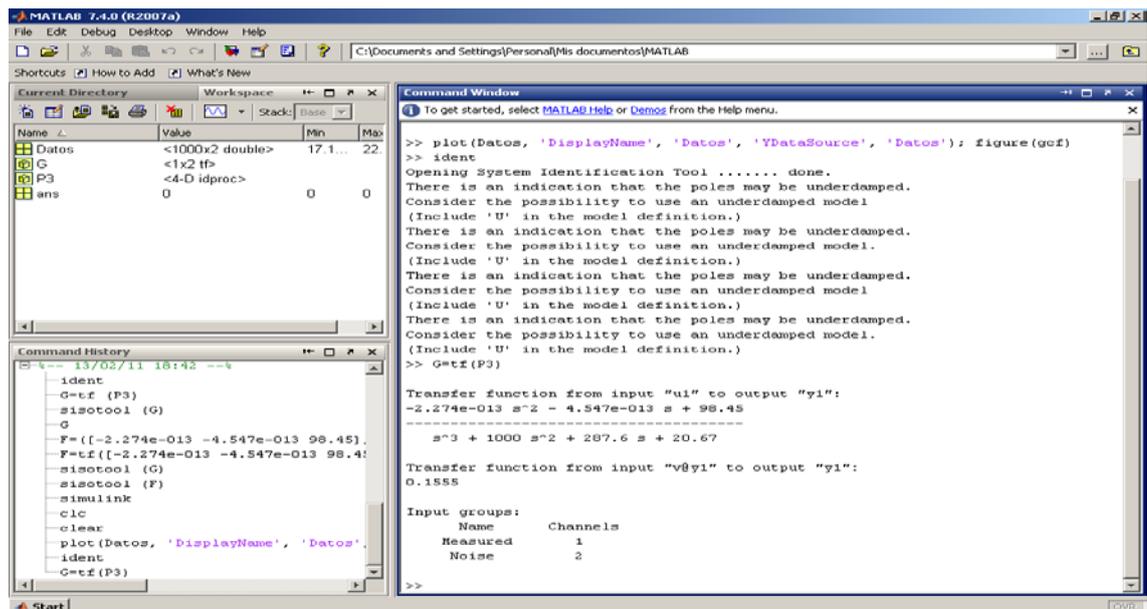


Figura 5.51 Obtención de la función de transferencia del sistema Fuente: Autores

Con esto se obtiene la función de transferencia del sistema:

$$\frac{-2.274e-013 s^2 - 4.547e-013 s + 98.45}{s^3 + 1000 s^2 + 287.6 s + 20.67}$$

PRACTICA # 6 SELECCIÓN DE CONTROLADORES

Una vez Identificado el Sistema de transferencia que domina el proceso, es necesario encontrar un controlador que pueda satisfacer las necesidades de la Planta, a continuación se muestra dos modelos que mostrará cómo Matlab puede ayudar a encontrar el controlador adecuado para cada sistema.

Objetivos:

- Entender cómo se realiza el procedimiento de selección de Controladores dependiendo del Tipo de función de transferencia.

Las herramientas a utilizar serán las siguientes:

- ✓ PC
- ✓ Software Matlab

Desarrollo:

Para el desarrollo de Sistemas de Control Matlab cuenta con una herramienta llamada Sisotool, es una herramienta muy útil para poder encontrar un sistema de control preciso para un sistema. Primero se debe definir qué tipo de sistema se va a controlar, de esto depende el Sistema de control:

Controlador Tipo “0”: Es cuando la función de transferencia que gobierna el sistema *no tiene* sus polos en el origen.

Controlador Tipo “1”: Es cuando la función de transferencia que gobierna el sistema *tiene* sus polos en el origen.

Uso de la Herramienta Sisotool para Controlador Tipo “0”

Crear una función de Transferencia “G” en la ventana de comando de Matlab.

$$G = \text{tf}([1 \ 10],[1 \ 7 \ 6])$$

Una vez creada la función de transferencia, abrir con Sisotool la función de Transferencia G. Escribir la palabra Sisotool en la ventana de comando de Matlab.

Sisotool (G)

Aparece el siguiente Gráfico:

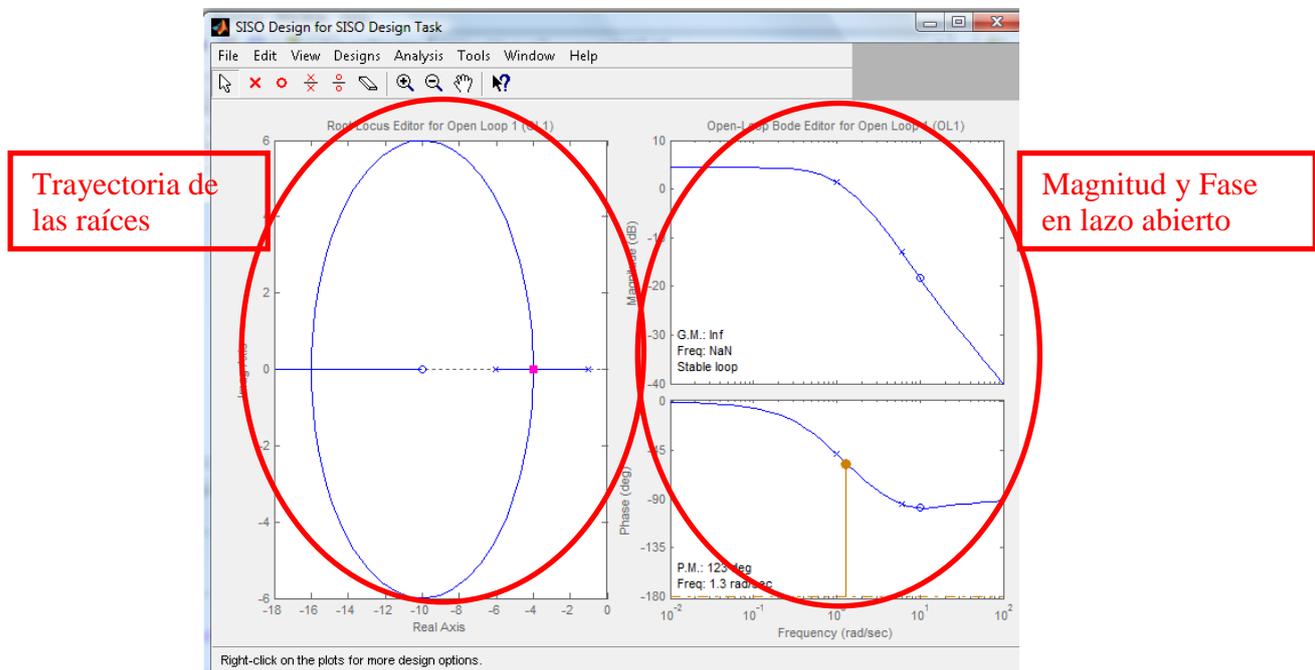


Figura 5.52 Gráfico de Trayectoria de raíces y Lazo Abierto de la función de transferencia

Fuente: Autores

Se debe trabajar en el gráfico de trayectoria de las raíces, por esto en la ventana Graphical tuning de la ventana principal Control and Stimulation Tool Manager, se debe desactivar la opción Open Loop Bode del plot 2 y ubicar en none.

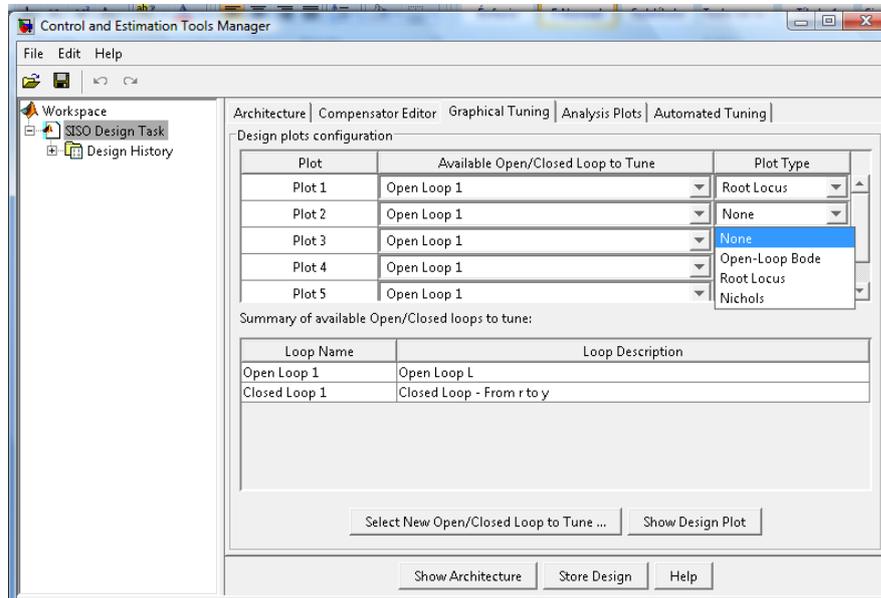


Figura 5.53 Configuración en el Graphical tuning Fuente: Autores

Con esto se obtiene el siguiente gráfico:

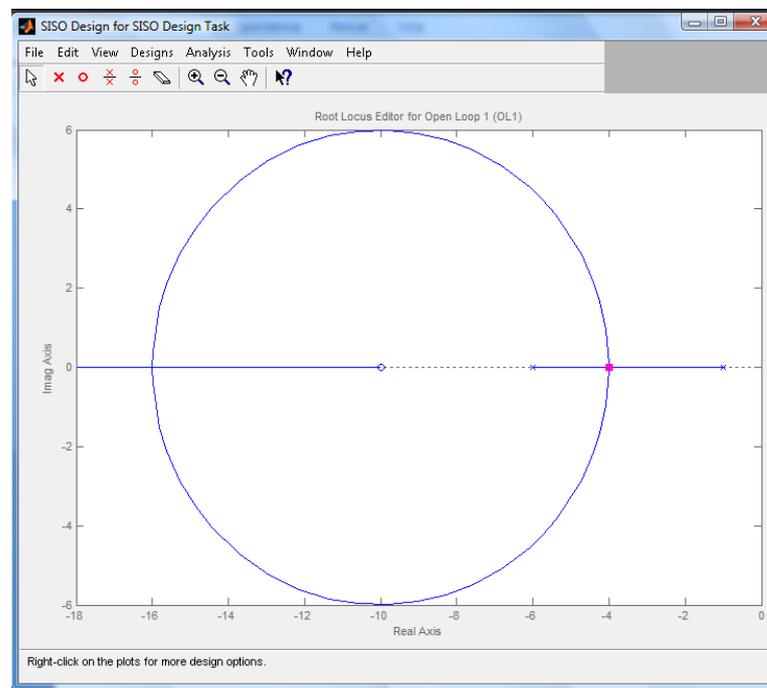


Figura 5.54 Respuesta del sistema a una entrada escalón Fuente: Autores

Respuesta del Sistema a una entrada escalón.

En la ventana Analysis del Gráfico activar la opción Step to response command, con esto se abrirá el gráfico LTI Viewer, en este gráfico, se presiona click derecho y en systems se desactiva la opción Closed loop r to u (green). Con esto quedará el siguiente gráfico:

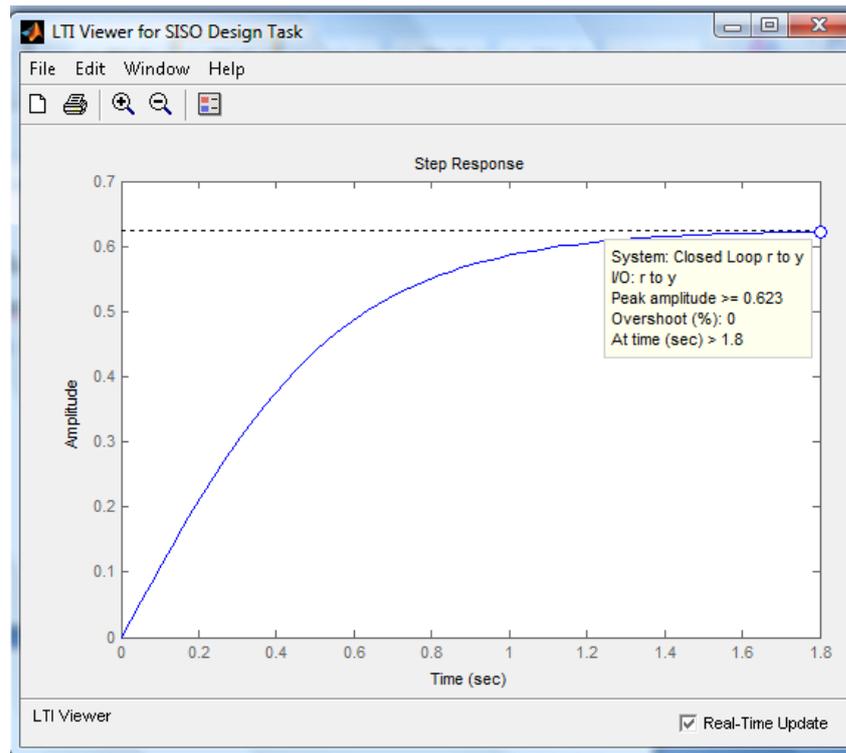


Figura 5.55 Gráfico LTI Viewer

Fuente: Autores

Para observar el error de estado estacionario se da un click derecho en el gráfico y en characteristics se activa la opción steady state. Se obtiene que en estado estacionario la función alcanza sólo hasta el valor de 0.625 de un valor requerido de 1. Con esto se determina que el error en estado estacionario es de 0.375 ó 37.5%.

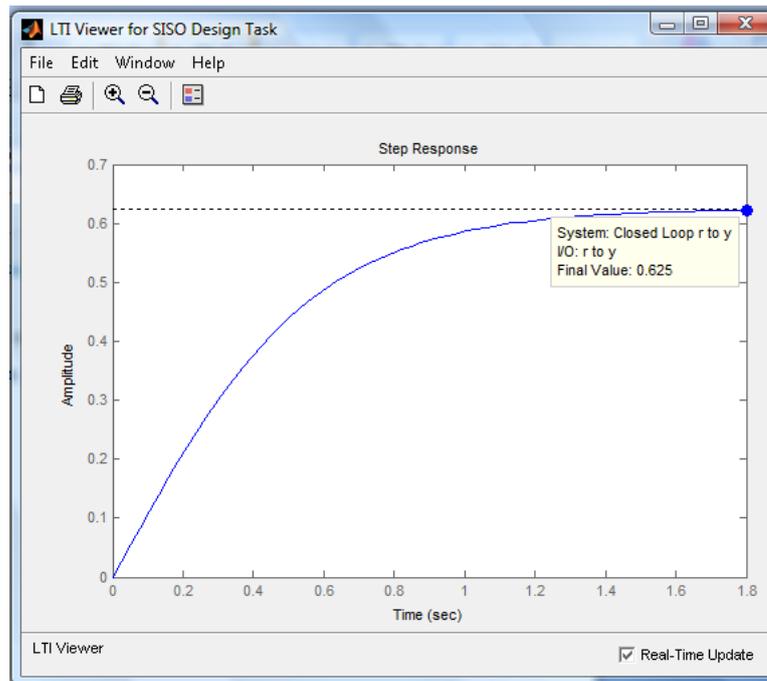


Figura 5.56 Error del estado estacionario de 0.375 o 37.5% Fuente: Autores

Para una mejor visualización en el comando Edit de Sisotool, abrir la ventana Sisotool Preferences, en la ventana Options activamos el comando Zero/Pole/Gain, Tal como se muestra en la figura:

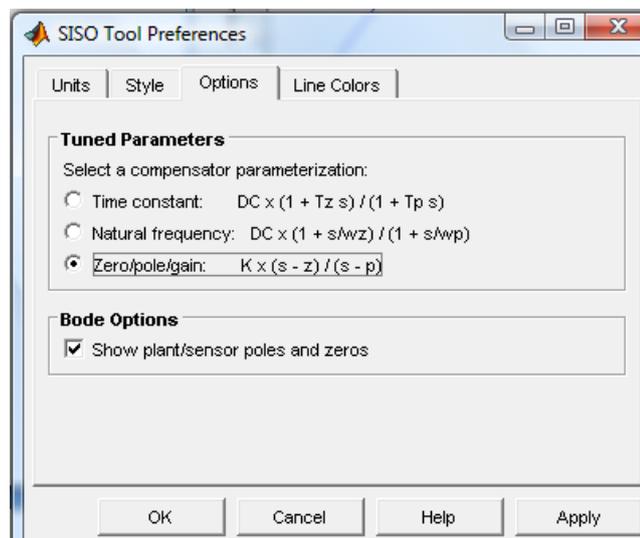


Figura 5.57 Ventana sisotool preferences Fuente: Autores

Parte del requerimiento del sistema es que se tenga un error de estado estacionario de 0% y un porcentaje de sobre paso del 10%. Para alcanzar esto, se puede aumentar un controlador que sea Integral. En la ventana compensator editor con click derecho en el

espacio Pole/Zero, se adiciona un Integrador en Add Pole/Zero y luego activando Integrator.

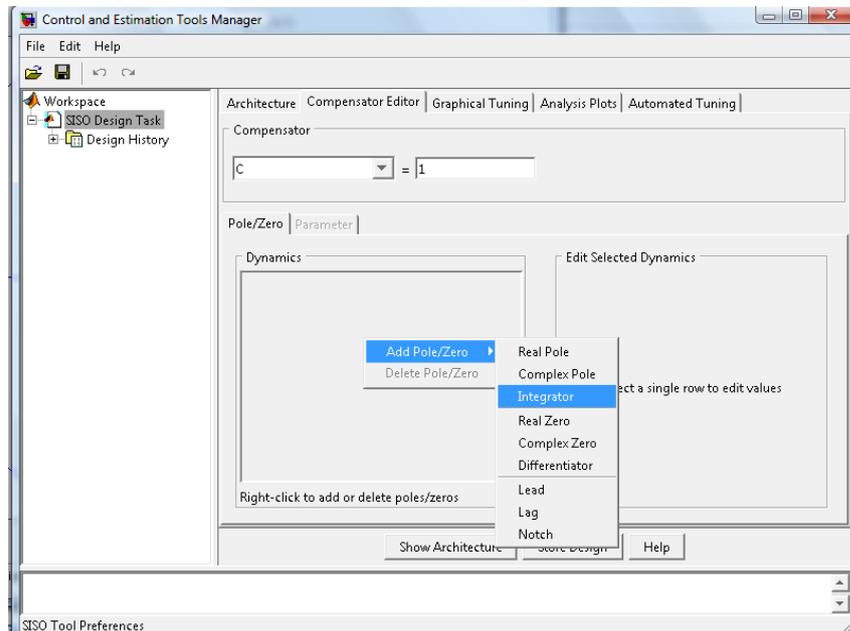


Figura 5.58 Incremento de un controlador integral Fuente: Autores

El gráfico cambia de la siguiente manera. Luego se aplica en esa misma ventana dando click derecho en el gráfico, se selecciona characteristics y se activa el comando peak response, con lo que se obtiene la cantidad de sobre paso, para este caso 1.31, siendo el porcentaje de sobre paso del 31.1%, tal como lo indica la figura:

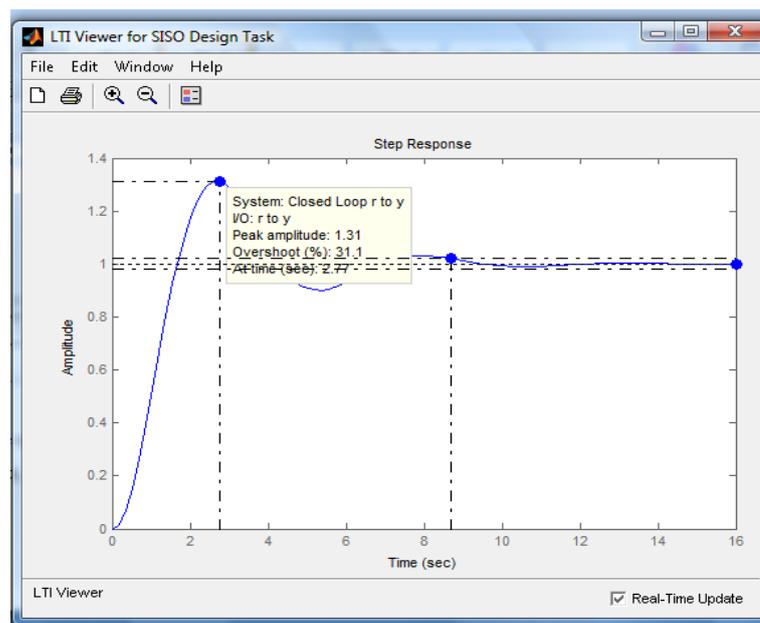


Figura 5.59 Cantidad de sobre paso 1.31 Fuente: Autores

Se observa que el settling time es de 6 segundos, con esto se procede a ir al gráfico de trayectoria de raíces en donde con click derecho se despliega la ventana y se escoge la opción Design requirements-New. Se ubica un settling time de 6 segundos y ejerciendo la misma acción anterior se selecciona un porcentaje de sobrepaso del 10%.

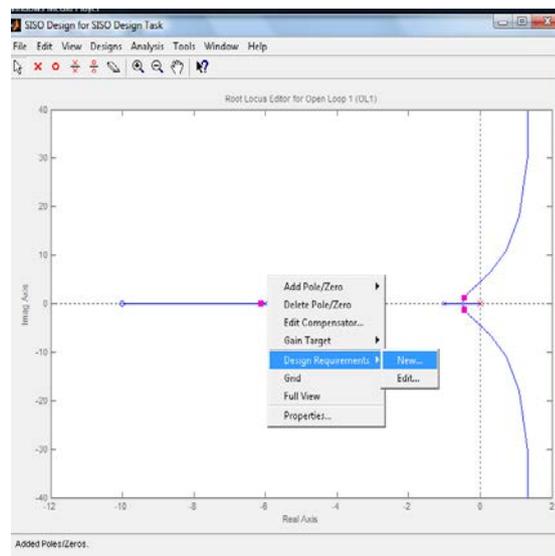


Figura 5.60 Selección de sobrepaso a un 10%

Fuente: Autores

Se debe adicionar en el gráfico de trayectoria un cero y se lo ubica en el eje x se lo ubica de tal manera que las trayectorias de la función tocan con las intersecciones, una vez realizado esto, se deben desplazar los polos hasta las intersecciones de tal manera que en el gráfico de respuesta de estado se puede notar que se cumple los requerimientos establecidos, como el porcentaje de sobrepaso y el ajuste de tiempo.

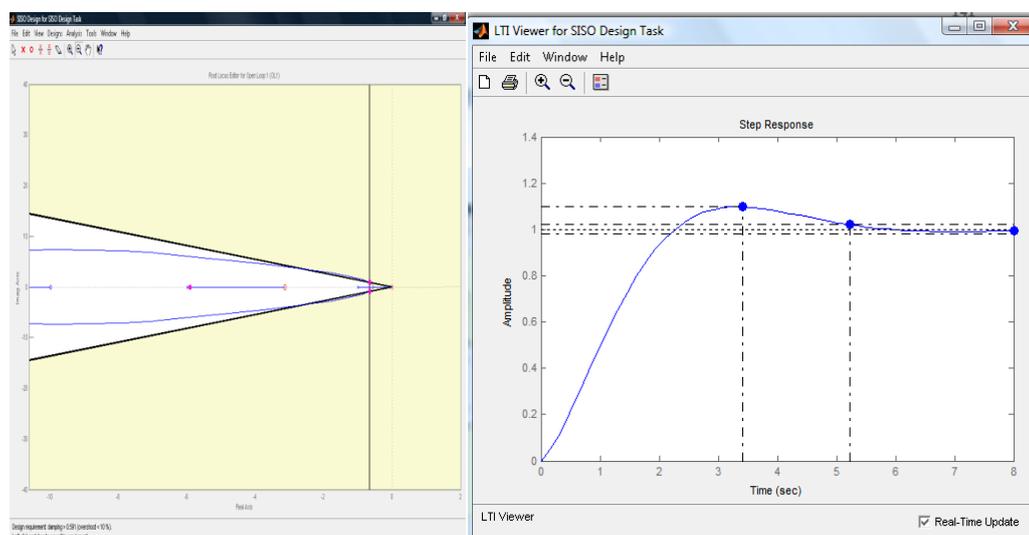


Figura 5.61 Incremento de un cero para modificación de la respuesta de estado

Fuente: Autores

En el cuadro de control and stimation tool manager se puede visualizar que el controlador tiene un zero en -3.14.

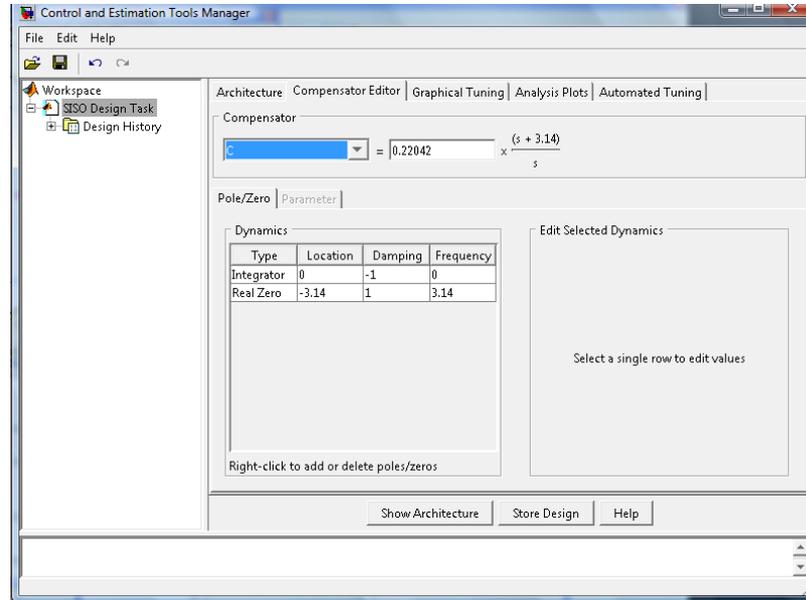


Figura 5.62 Visualización del controlador Fuente: Autores

Para eliminar el efecto del zero en el controlador, se debe crear un prefiltro. En la ventana compensator editor, se selecciona F y en Dynamics se ubica Add Zero/Pole y se selecciona Real Pole.

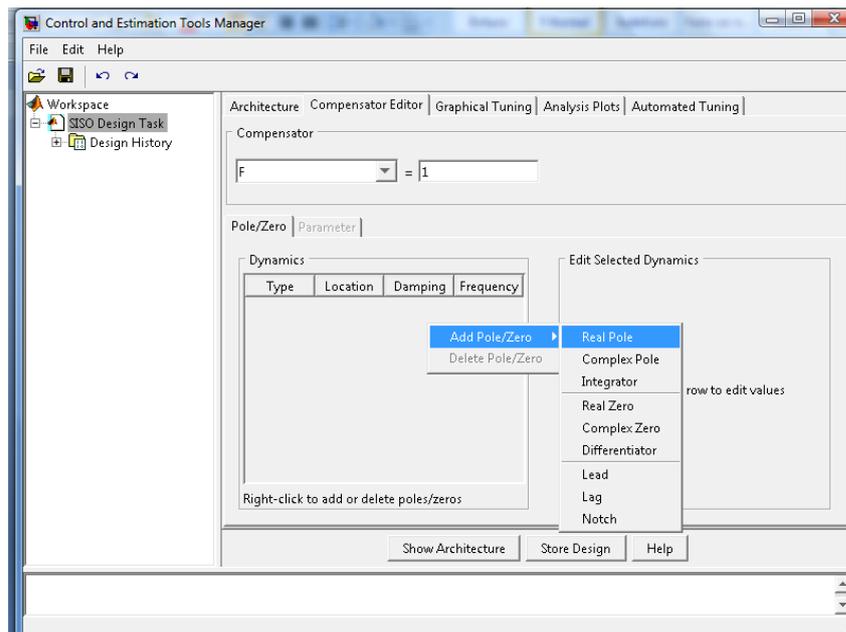


Figura 5.63 Creación de prefiltro Fuente: Autores

El valor de la ganancia será -3.14 para eliminar el zero del controlador.

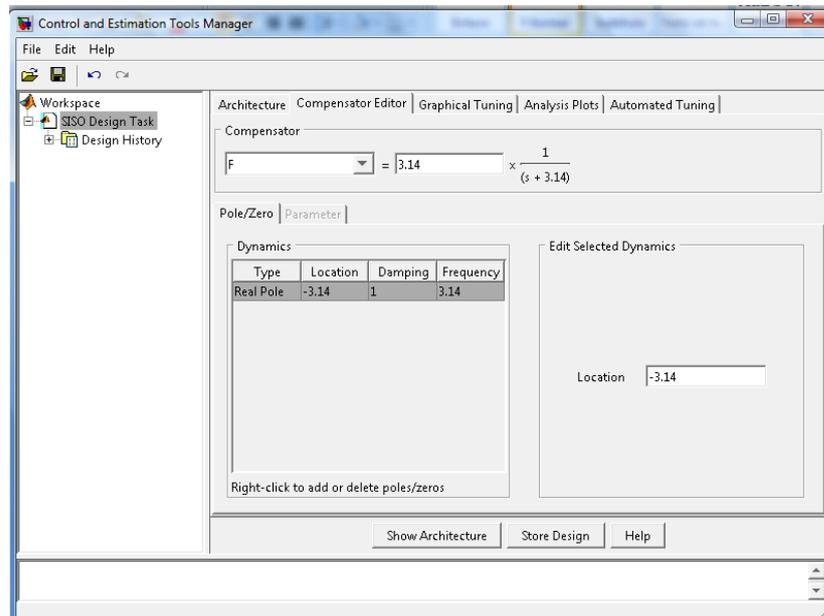


Figura 5.64 Eliminación del zero en el controlador Fuente: Autores

Como último paso en la ventana del gráfico de trayectorias, en la pestaña File se selecciona export y se procede a exportar el controlador y el prefiltro.

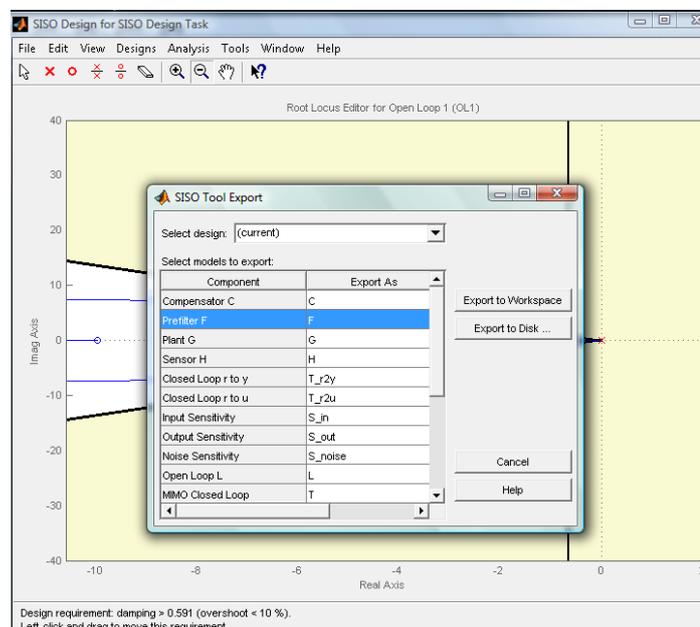


Figura 5.65 Exportación de controlador y prefiltro Fuente: Autores

Como último paso se deben presentar en la ventana de comando de Matlab tanto el prefiltro como el compensador.

```

>> C

Zero/pole/gain from input "Input" to output "Output":
0.22042 (s+3.14)
-----
      s

>> F

Zero/pole/gain from input "Input" to output "Output":
  3.14
-----
(s+3.14)

```

Figura 5.66 Presentación del prefiltro y controlador en Matlab Fuente: Autores

Con esto se debe entender que la estructura queda de la siguiente manera:

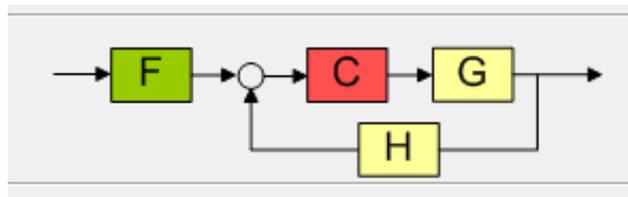


Figura 5.67 Estructura de sistema controlador con prefiltro. Fuente: Autores

Uso de la Herramienta Sisotool para Controlador Tipo “1”

Crear una función de Transferencia “G” en la ventana de comando de Matlab.

$$G = \text{tf}([114],[1 \ 11.4 \ 14 \ 0])$$

$$G = \frac{114}{s^3 + 11.4 s^2 + 14 s}$$

Una vez creada la función de transferencia, abrir con Sisotool la función de Transferencia G. Escribir la palabra Sisotool en la ventana de comando de Matlab.

Sisotool (G)

Aparece el siguiente Gráfico:

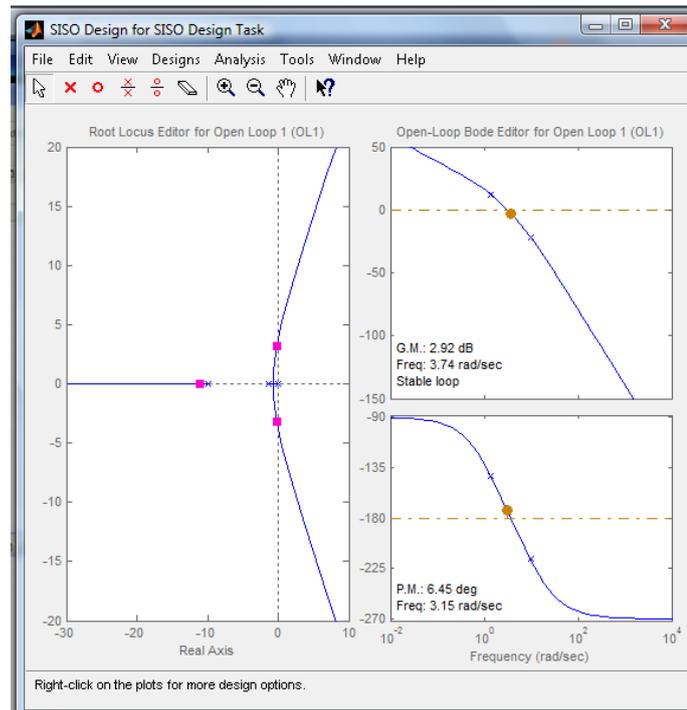


Figura 5.68 Respuesta de la función en Lazo Abierto y Ruta de las raíces de la función Fuente: Autores

Se debe trabajar en el gráfico de trayectoria de las raíces, por esto en la ventana Graphical tuning de la ventana principal Control and Stimulation Tool Manager, se debe desactivar la opción Open Loop Bode del plot 2 y ubicar en none.

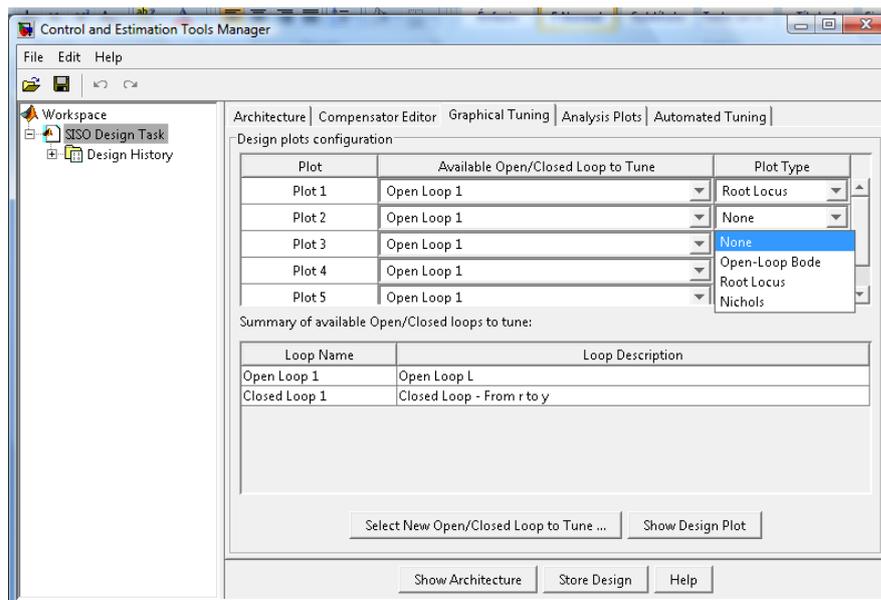


Figura 5.69 Configuración en el Graphical tuning Fuente: Autores

Con esto se obtiene el siguiente gráfico:

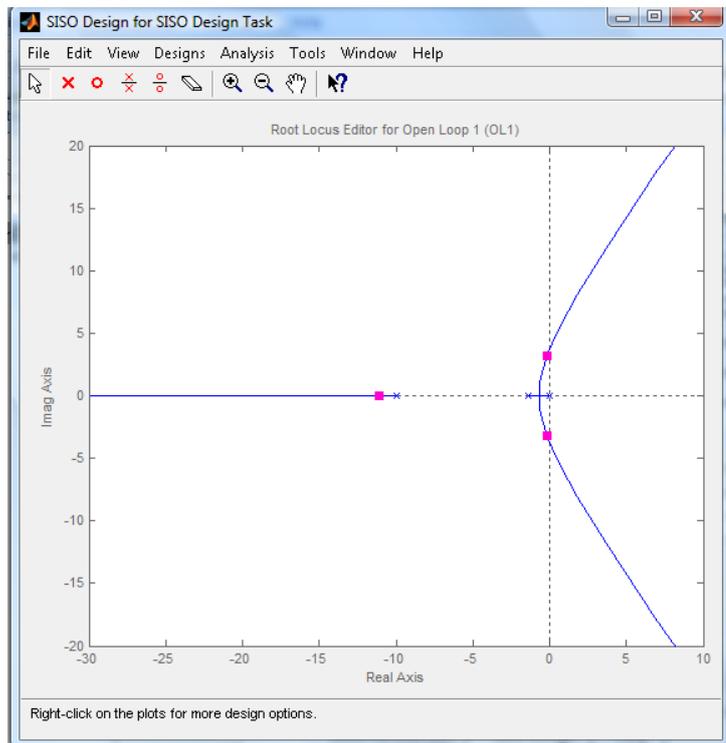


Figura 5.70 Trayectoria de las Raíces de la función de transferencia Fuente: Autores

En la ventana Analysis del Gráfico activar la opción Step to response command, con esto se abrirá el gráfico LTI Viewer, en este gráfico, se presiona click derecho y en systems se desactiva la opción Closed loop r to u (green). Con esto quedará el siguiente gráfico:

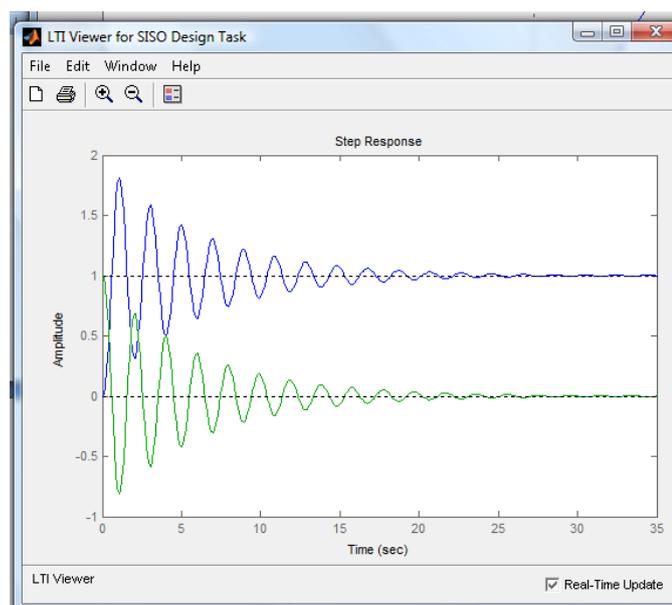


Figura 5.71 Respuesta de la Función a una entrada Escalón Fuente: Autores

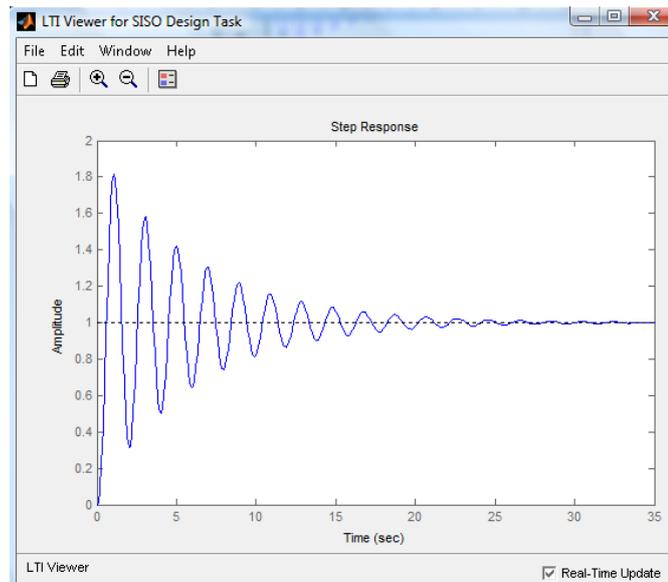


Figura 5.72 Respuesta de la Función a una entrada Escalón sin inversión Fuente: Autores

Para encontrar el porcentaje de sobrepaso y el tiempo de estabilización, se aplica en esa misma ventana dando click derecho en el gráfico, se selecciona characteristics y se activa el comando peak response, con lo que se obtiene la cantidad de sobre paso, para este caso 1.81, siendo el porcentaje de sobre paso del 81.4%, tal como lo indica la figura:

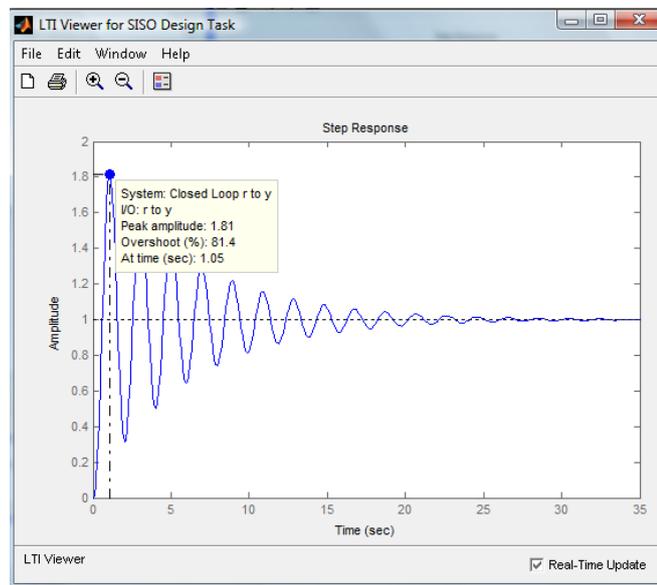


Figura 5.73 Porcentaje de sobrepaso de la función de transferencia Fuente: Autores

De la misma manera, dando click derecho en el área de gráfico se da click en characteristics y se escoge la opción settling time, donde se puede observar que el tiempo de estabilización de la función de transferencia es 22.8 segundos.

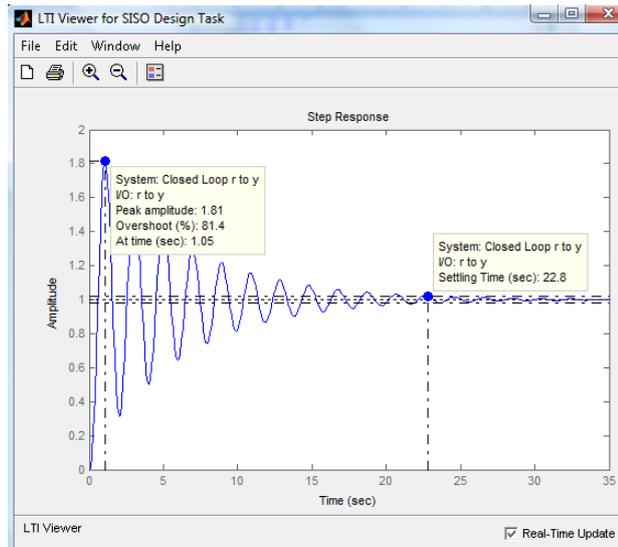


Figura 5.74 Tiempo de estabilización de la función en respuesta a una entrada escalón Fuente: Autores

Ya que la función de transferencia es de tipo 1 y la entrada que se utiliza es de tipo escalón bastará con un controlador proporcional, para ajustar los parámetros deseados.

Dando click derecho en el gráfico de trayectoria de las raíces, en Design Requirements se selecciona New y se escoge un porcentaje de sobrepaso (Percent Overshoot) del 10%. Con lo que el gráfico queda de la siguiente manera:

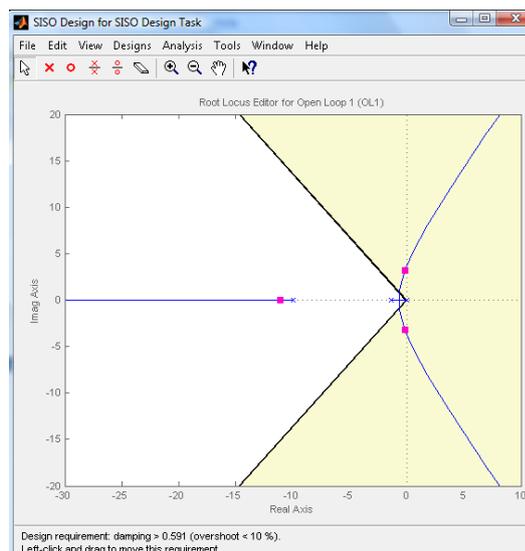


Figura 5.75 Cambio de gráfico de trayectoria de las raíces con 10% de Sobrepaso Fuente: Autores

Para obtener el nivel de Sobrepaso deseado, se debe modificar la trayectoria de las raíces para interceptarlo con la línea de trayectoria del nivel de sobrepaso deseado.

Esto se realiza manualmente desplazando los puntos de color rojo de la trayectoria hasta el lugar donde se interceptan las dos líneas de trayectoria, donde el gráfico de respuesta a una entrada escalón también cambia.

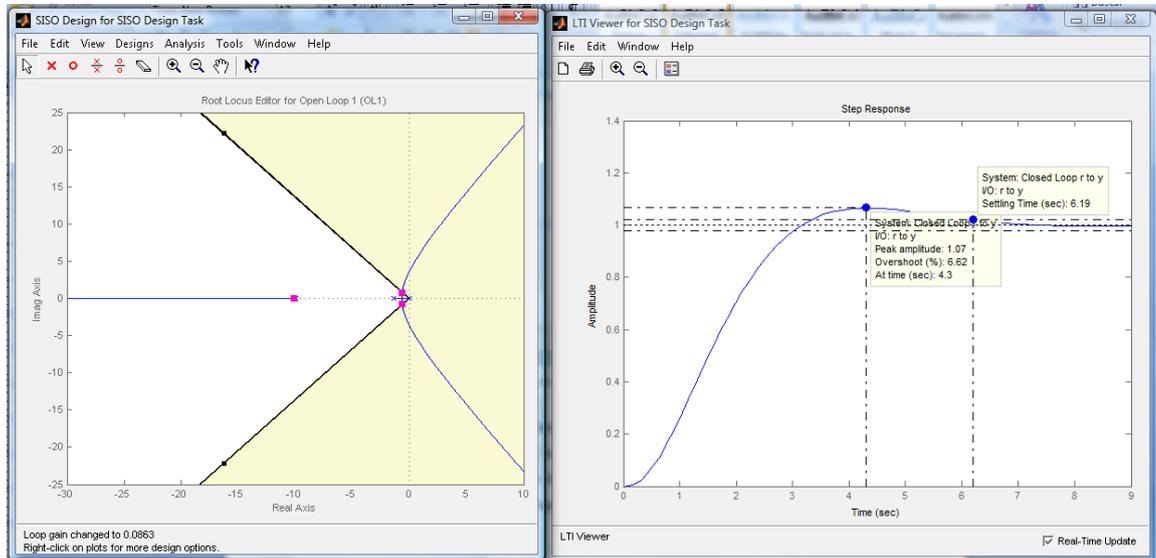


Figura 5.76 Movimiento de las raíces para conseguir el porcentaje de sobrepaso deseado. Fuente: Autores

Para disminuir el valor del tiempo de estabilización, se da click derecho en el gráfico de trayectoria de las raíces y se escoge la opción new de design requirements, donde se pone al tiempo de estabilización (settling time) 4 segundos.

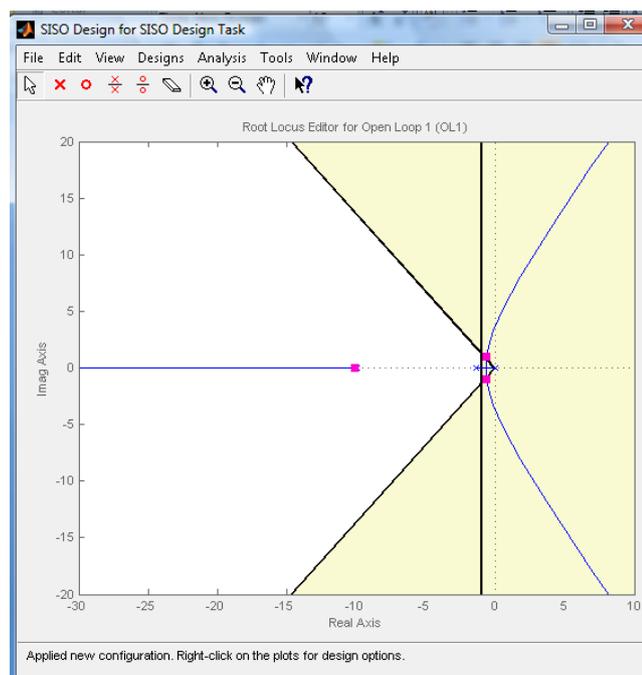


Figura 5.77 Ajuste de tiempo de estabilización en gráfico de trayectoria de raíces. Fuente: Autores

Para lograr satisfacer los dos parámetros se debe adicionar un zero, ya que de esta manera se altera la trayectoria de las raíces, hasta el punto de intersección de las dos líneas.

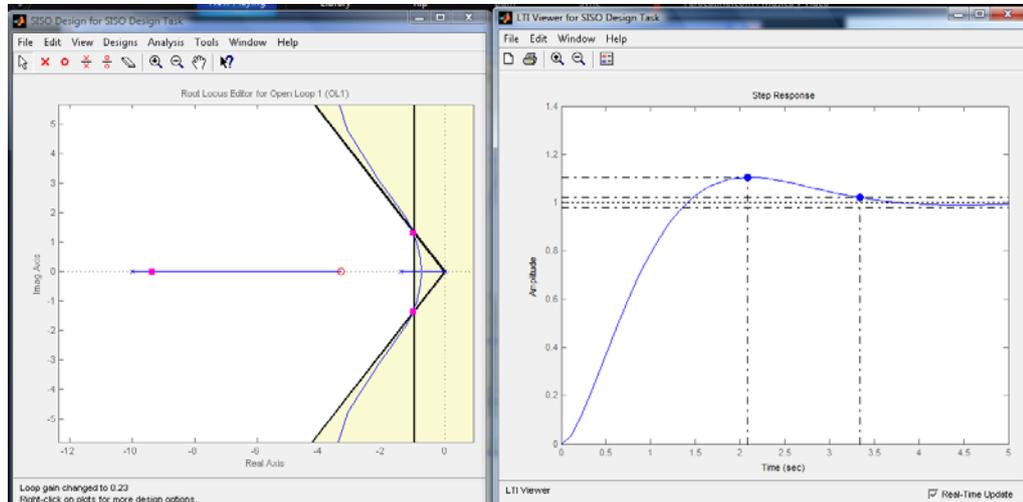


Figura 5.78 Ajuste de raíz para alcanzar porcentaje de sobrepaso y tiempo de estabilización. Fuente: Autores

Para eliminar la interferencia del zero adicionado, se puede disponer de un filtro que eliminará la influencia del mismo en la respuesta de la función. Para esto, en la ventana de Siso Tool Preferences de Control and estimation tool manager, se selecciona de la pestaña option Zero/Pole/Gain y vemos que en el controlador en compensator editor sale de la siguiente manera:

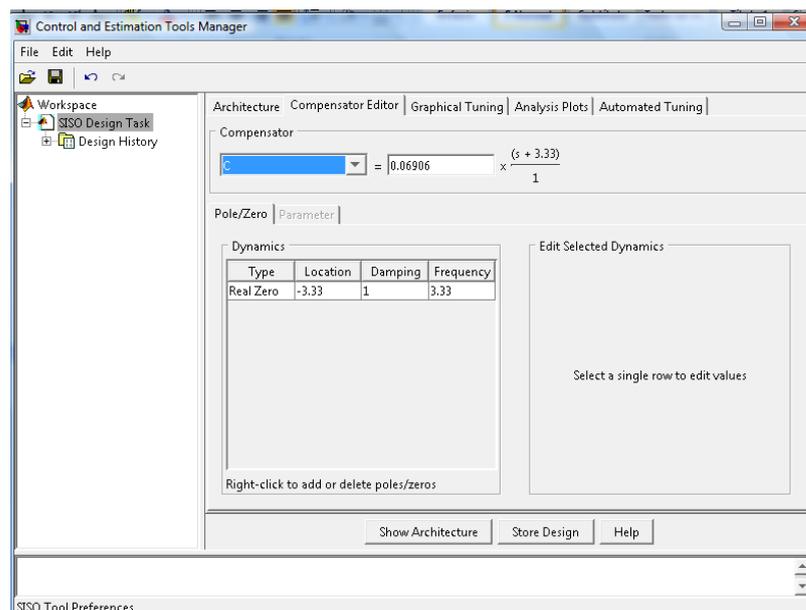


Figura 5.79 Muestra del controlador en la ventana Compensator Editor Fuente: Autores

El filtro se lo realiza de tal manera que se elimine el zero adicionado para que la ganancia del sistema sea igual a 1, de tal manera que la acción del zero se anule. Se aumenta el filtro dando en la pestaña donde se encuentra la letra “C” de controlador y ubicando la “F” de filtro y se adiciona un Polo.

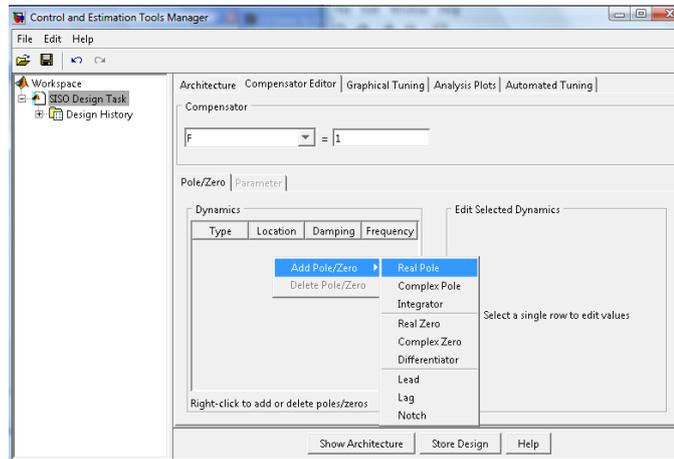


Figura 5.80 Adición de un polo para el Filtro del Sistema Fuente: Autores

Y el valor del polo se ubica en el mismo punto donde está ubicado el zero del controlador.

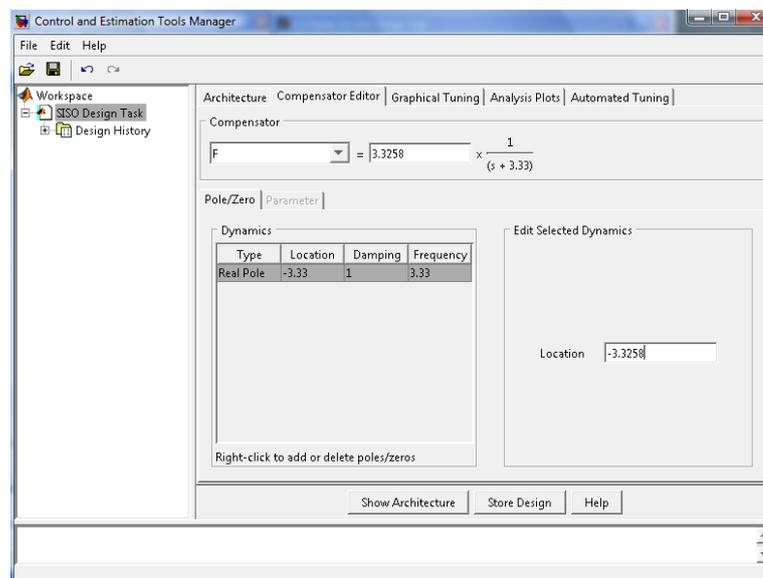


Figura 5.81 Adición de un polo para el Filtro del Sistema Fuente: Autores

Con esto deducimos que un controlador proporcional derivativo es mejor que un controlador proporcional, ya que nos ha permitido fijar un tiempo de estabilización para el control de esta función.

Por último se exporta el filtro y el controlador a Workspace de Matlab, desde la ventana trayectoria de las raíces, donde se presentan de la siguiente manera:

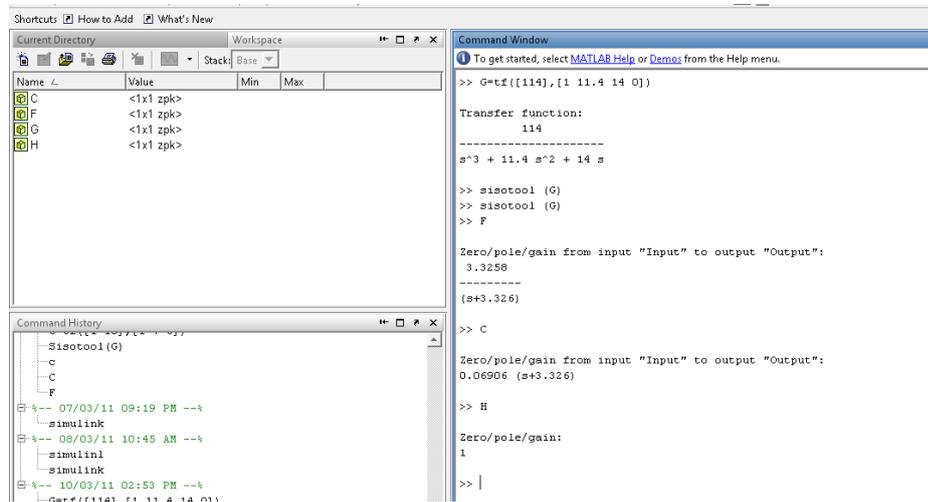


Figura 5.81 Ventana de Matlab donde se muestra el Filtro y el controlador Fuente: <http://www.jdelpozo.espol.edu.ec/web/herramientas/referencias.asp>

De esta manera la arquitectura de la función de transferencia queda de la siguiente forma:

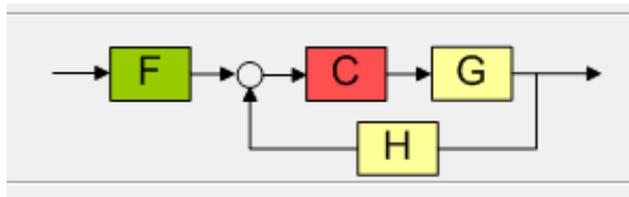


Figura 5.82 Estructura de sistema controlador con prefiltro. Fuente: Autores

7. PRÁCTICA # 7 SELECCIÓN DE CONTROLADOR PARA MÓDULO DE CONTROL DE TEMPERATURA

Existe un método práctico para la selección de controladores en un sistema que es el método de Ziegler & Nichols, que puede ser utilizado para el control de una entrada escalón para el módulo de control de Temperatura.

Objetivos:

- Comprender la aplicación de los métodos de Ziegler & Nichols para el ajuste de un controlador PID.
- Aplicar el método de Ziegler & Nichols al módulo de control de temperatura y encontrar la opción que represente menos error.

Desarrollo:

Primer Método de Ziegler & Nichols.

El método de respuesta a escalón de Ziegler-Nichols caracteriza un sistema mediante dos parámetros, L y T , obtenidos a partir de la respuesta a lazo abierto del mismo como representa la siguiente figura:

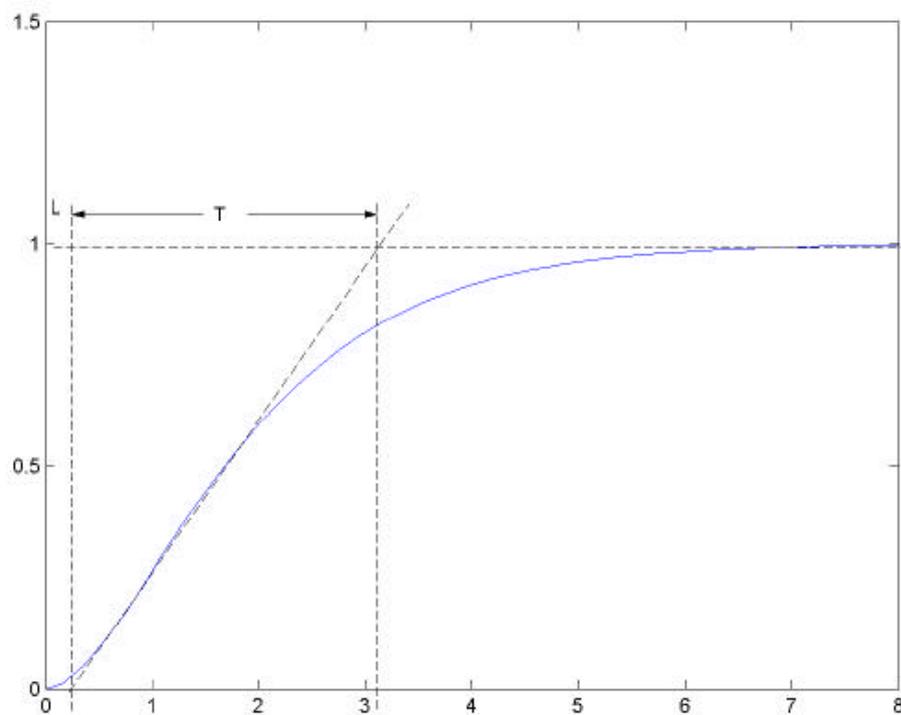


Figura 5.83 Respuesta de un sistema a una entrada escalón.

Fuente: Autores

De tal manera que los parámetros del controlador pueden hallarse, con la siguiente tabla dependiendo del controlador que quiera implementarse:

Controlador	K_p	K_i	K_d
P	$\frac{T}{L}$	0	0
PI	$0.9\frac{T}{L}$	$\frac{0.3}{L}$	0
PID	$1.2\frac{T}{L}$	$\frac{1}{2L}$	$0.5L$

Tabla 5.3 Tabla para el cálculo del controlador con el primer método de Ziegler & Nichols. Fuente: Autores

Para la práctica se debe hallar una curva a una entrada a escalón para el módulo de control de temperatura y debe implementarse el método de Ziegler & Nichols para encontrar un controlador que dé la menor cantidad de error posible.

La primera parte consiste en obtener una curva a una entrada escalón. Aquí debe aplicarse un control on-off para este módulo, tal como se muestra en la figura:

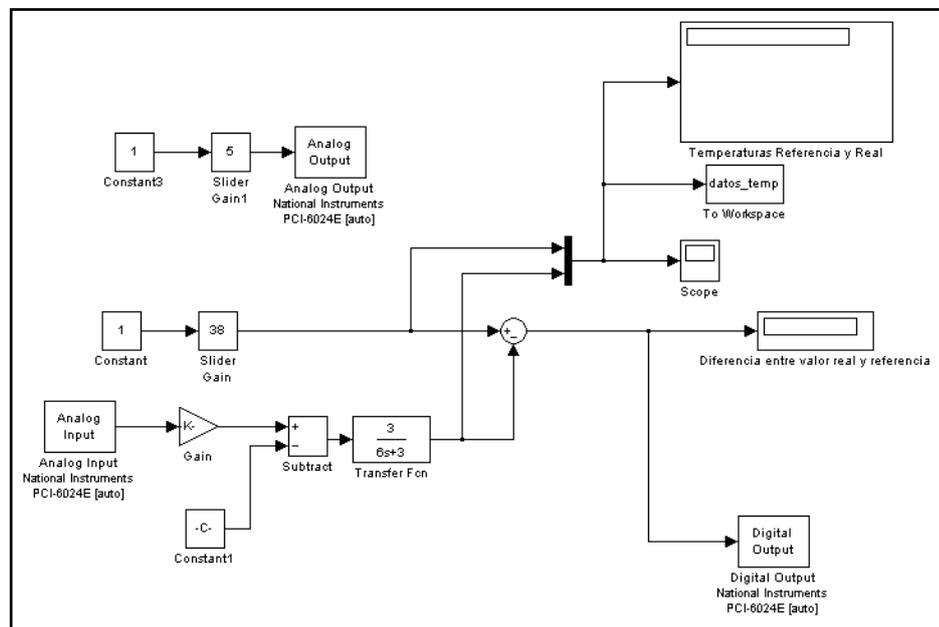


Figura 5.84 Sistema para el control on-off del Módulo de Control de Temperatura.

Fuente: Autores

Ejecutando este proceso se obtiene la siguiente curva, donde se pueden obtener los datos de “L y T”.

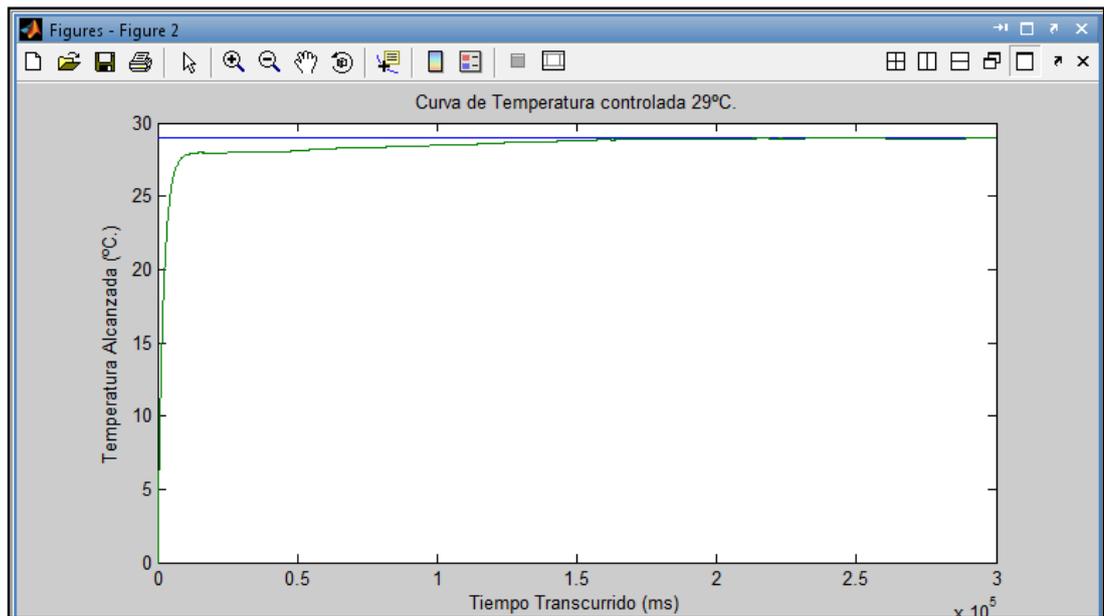


Figura 5.85 Respuesta del Módulo de control de temperatura a una entrada escalón de 29°C. Fuente: Autores

Para esta curva los valores de T y L quedan de la siguiente manera:

T = 150 segundos

L = 2°C.

Aplicando las fórmulas de la tabla, las posibles variables quedan de la siguiente manera:

	Kp	Ki	Kd
P	75	0	0
PI	67,5	0,15	0
PID	90	0,25	1

Tabla 5.3 Tabla para selección del controlador con el primer método de Ziegler & Nichols. Fuente: Autores

Tomando estos datos se realiza la comparación de cada uno de los controladores para el módulo de control de temperatura. Se debe utilizar un bloque de controlador PID que se encuentra en la librería Simulink extras, de simulink en MatLab.

A continuación se muestra un gráfico que puede utilizarse para la comparación de los controladores para el módulo de control de temperatura.

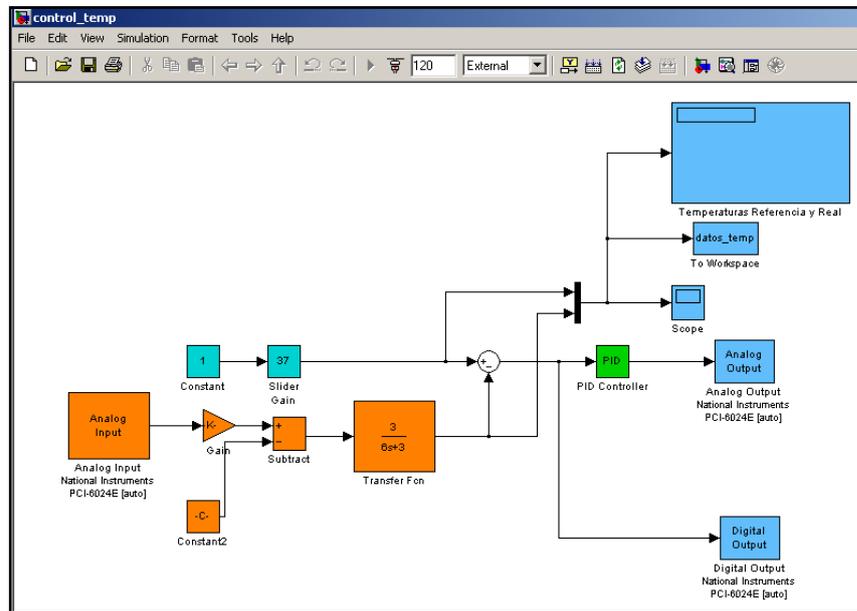


Figura 5.86 Modelo para el control de temperatura con uso de controlador Fuente: Autores

Segundo Método de Ziegler & Nichols.

El segundo método de Ziegler-Nichols, o método de respuesta en frecuencia es un método alternativo de sintonización de PID's que puede describirse como sigue:

En primer lugar es necesario ajustar las ganancias integral y derivativa a cero, esto es $K_i = 0$ y $K_d = 0$.

A continuación, partiendo de un valor bajo de la ganancia proporcional, K_p , se aumentando ésta gradualmente hasta conseguir un comportamiento oscilatorio mantenido en la respuesta del sistema tal como muestra la gráfica. A esta ganancia la llamaremos K_U .

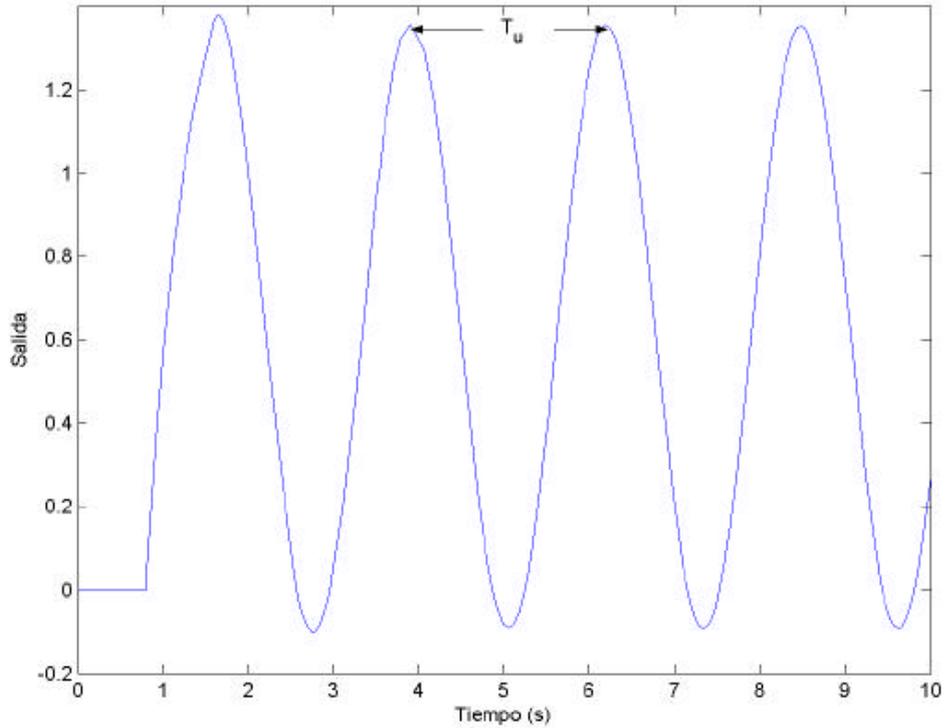


Figura 5.87 Respuesta del sistema ante un control proporcional pequeño. Fuente: Autores

El otro parámetro que nos hace falta es el periodo de oscilación del sistema para esta ganancia, que llamaremos T_U , y que se calcula como muestra la tabla:

Controlador	K_p	K_i	K_d
P	$0.5K_U$	0	0
PI	$0.45K_U$	$\frac{1.2}{T_U}$	0
PID	$0.6K_U$	$\frac{2}{T_U}$	$0.125T_U$

Tabla 5.4 Tabla para el cálculo del controlador con el segundo método de Ziegler & Nichols. Fuente: Autores

Después de esto debe realizarse el procedimiento descrito con el siguiente modelo para el manejo del módulo de control de temperatura, se sugiere el valor proporcional para el cálculo sea “1”.

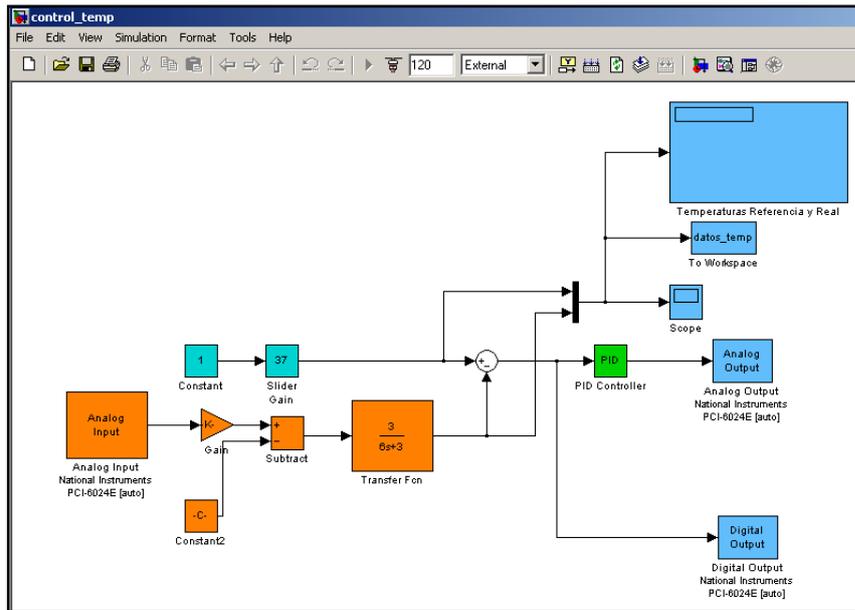


Figura 5.87 Modelo para el control de temperatura con uso de controlador Fuente: Autores

Obteniendo los datos de T_U y K_U , se selecciona los controladores para el modelo expuesto en la figura 5.87.

CONCLUSIONES

En este trayecto hemos descubierto que este módulo puede servir muchísimo al crecimiento de un estudiante de control automático, puede ayudar en el profesionalismo de un maestro en esta cátedra y elevará el nivel de una institución que día a día crece.

Para cumplir los objetivos de este proyecto usamos el software Matlab, que nos ayudó de una manera extraordinaria, ya que su interface en Simulink es muy amistosa, muy visual y de cierta manera muy comprensiva sí se la sabe utilizar.

En el desarrollo de este módulo, descubrimos que el mundo del control automático es tan amplio y cambiante en el tiempo que es difícil pensar cuales son los límites del conocimiento en este campo y que innovaciones podemos traer para el mundo superando los hitos que la tecnología ha encontrado.

En conclusión general, podemos decir que este módulo ayudará muchísimo a los estudiantes a desarrollar y consolidar los conocimientos adquiridos en las aulas. Que toda la teoría con respecto al control automático puede ser utilizada en las prácticas con este módulo.

RECOMENDACIONES

Recomendaciones Generales con el módulo

- Después de utilizar el módulo de control de nivel será necesario quitarle todo el agua en el sistema, el módulo cuenta con un sistema de drenaje que puede ser utilizado con este fin.
- Antes de realizar una práctica con los módulos cada estudiante deberá tener conocimiento de cómo funciona y cuáles son las normas de seguridad a seguir en el uso del mismo.
- Es importante que el cable de fuente de poder esté desconectado en el caso de que no esté en completo uso el módulo.
- Ningún estudiante debe abrir los tableros eléctricos, ya que estos pueden afectar la seguridad física de las personas y equipos que están alrededor. Estos sólo pueden ser manipulados por personal debidamente capacitado.
- Cuando esté en uso el módulo de control de temperatura es necesario que no se acerquen al tanque de calefacción, ya que se pueden sufrir quemaduras.

Recomendaciones generales con el uso de la tarjeta de interfaz

- Antes de que se utilice el modulo será necesario que se dé una charla acerca del uso del mismo. Ya que la tarjeta de interfaz que usa podría sufrir algún daño, sí no es manejada con precaución
- Antes de utilizar el módulo debe estar conectado el cable de interfaz de la tarjeta con el bloque conector.
- Después del uso del módulo debe desconectarse el cable de interfaz.

BIBLIOGRAFIA

CONTROL AUTOMÁTICO

http://www.sapiensman.com/control_automtico/

SIMULINK Y SIMULACIÓN DE MODELOS

<http://es.wikipedia.org/wiki/Simulink>

http://www.esi2.us.es/~vivas/prac_RA_ITI/prac_5.pdf

<http://www.jdelpozo.espol.edu.ec/web/herramientas/referencias.asp>

[http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/electronica/n18_2006/a01.p
df](http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/electronica/n18_2006/a01.pdf)

<http://www.angelfire.com/la/hmolina/matlab7.html>

TERMORRESISTORES

<http://es.wikipedia.org/wiki/RTD>