



Universidad del Azuay

Facultad de Ciencia y Tecnología

Escuela de Ingeniería Electrónica

**Diseño e implementación de un sistema PID para el control
de nivel de un tanque desarrollado con el PLC Siemens
S7-200**

**Trabajo de graduación previo a la obtención del título de Ingeniero
Electrónico**

Autores

**Coronel Delgado Pedro Xavier
Peralta Espinoza Paúl Andrés**

Director

Ing. Francisco Vásquez Calero

**Cuenca, Ecuador
2009**

Agradecimientos

Queremos expresar nuestros agradecimientos a nuestro director de tesis Ing. Francisco Vásquez C. por toda la experiencia y ayuda brindada para realizar este trabajo. Así como, a todos nuestros profesores, que han llegado a nosotros con sus conocimientos. Y por último, sin menospreciar, a nuestros padres y familiares que con su apoyo han hecho posible la culminación de esta etapa.

Indice

Agradecimientos -----	ii
Indice -----	iii
Resumen -----	vii
Abstract -----	viii
Introducción -----	1

CAPITULO 1

Sistemas de control -----	2
1.1. Introducción al control-----	3
1.1.1. Definición de control-----	3
1.1.2. Variables de los sistemas de control de procesos-----	4
1.1.3. Elementos de control-----	4
1.2. Sistemas de control de lazo abierto-----	5
1.3. Sistemas de control lazo cerrado-----	6
1.4. Control lazo cerrado vs. lazo abierto-----	6

CAPITULO 2

Modelado matemático del problema -----	8
2.1 Transformada de laplace-----	9
2.1.1 Teorema de la transformada de laplace-----	10
2.1.2 Transformadas más utilizadas-----	11
2.2 Función de transferencia-----	12
2.2.1 Respuesta al impulso y al escalón-----	14
2.3 Sistemas de primer orden-----	17
2.3.1 Definición de sistemas de primer orden-----	17
2.3.2 Sistemas de primer orden reales-----	18
2.3.3 Variables de desviación-----	19
2.3.4 Respuesta del sistema de primer orden real-----	20
2.4 Modelado matemático del sistema de nivel de líquido-----	22

CAPITULO 3**Simulación y análisis del sistema con Matlab----- 25**

3.1 Diagrama de bloques-----	26
3.1.1 Operaciones elementales-----	27
3.1.2 Algebra elemental de bloques-----	29
3.2 Simulación y análisis-----	31
3.2.1 Código de programa en Matlab-----	32
3.2.2 Diagrama en Simulink-----	33

CAPITULO 4**Diseño del sistema de control----- 35**

4.1 Control por realimentación-----	36
4.2 Controlador proporcional P-----	36
4.2.1 Acción proporcional-----	36
4.2.2 Señal de salida-----	37
4.3 Controlador proporcional integral PI-----	38
4.3.1 Acción integral-----	38
4.3.2 Señal de salida-----	39
4.4 Controlador proporcional integral derivativo PID-----	39
4.4.1 Acción derivativa-----	39
4.4.2 Señal de salida-----	40
4.5 Sintonización para controladores PID-----	41
4.5.1 Introducción-----	41
4.5.2 Regla de Ziegler-Nichols-----	41
4.5.3 Sintonización y Simulación con "Control Station v3.7"-----	43
4.5.4 Simulación con Simulink de Matlab-----	51

CAPITULO 5**Descripción de equipos----- 55**

5.1 S7-200-----	56
5.1.1 Introducción al controlador lógico programable. (PLC)-----	56
5.1.2 Arquitectura-----	57

5.1.2.1 Unidades de entrada y salida-----	57
5.1.2.2 Unidad central de proceso (CPU)-----	57
5.1.2.3 Memoria-----	58
5.1.2.4 Interfaces-----	58
5.1.2.5 Unidades de Programación-----	59
5.1.2.6 Periféricos-----	59
5.1.3 Datos técnicos de la CPU 224-----	60
5.2 Módulo analógico EM 235-----	62
5.2.1 Introducción-----	62
5.2.2 Datos técnicos del EM 235-----	63
5.2.3 Terminales y tipos de conexión-----	64
5.2.4 Formas de configuración de las entradas del módulo EM 235-----	65
5.2.5 Formato de la palabra de datos de la entrada del módulo EM 235-----	65
5.2.6 Formato de la palabra de datos de la salida del módulo EM 235---	66
5.3 Sensor ultrasónico Sick UM30-13113-----	66
5.3.1 Descripción y funcionamiento-----	67
5.3.2 Rango de detección-----	67
5.3.3 Datos técnicos-----	68

CAPITULO 6

Programación y configuración de los elementos de control- 70

6.1 Descripción del funcionamiento-----	71
6.2 Algoritmo-----	72
6.3 Programación del PLC con Microwin-----	73
6.4 Configuración del Módulo analógico EM 235-----	83
6.5 Configuración del Sensor ultrasónico-----	85
6.6 Programación del microcontrolador-----	86

CAPITULO 7

Montaje----- 98

7.1 Diseño del circuito de control para la bomba-----	99
7.2 Montaje de los tanques-----	101

CAPITULO 8

Resultados prácticos----- 104

8.1 Pruebas y análisis de datos----- 105

Conclusiones----- 107

Recomendaciones----- 108

Bibliografía----- 109

Resumen

Este trabajo estudia, diseña e implementa un sistema proporcional, integral y derivativo (PID) para el control automático del nivel de líquido de un tanque con elementos industriales, como es el PLC Siemens **S7-200**, que incluye el módulo analógico **EM-235**, y un sensor de ultrasonido para medir el nivel de líquido. Para realizar dicho sistema PID, se estudia el modelo matemático del problema y se sintoniza las variables del controlador con el método de Ziegler Nichols. Además, se analiza el sistema ya en funcionamiento y se comprueban los datos obtenidos mediante el software **Matlab 7.0™** y **Control Station 3.7™**.

Abstract

This thesis deals with a study, design and implementation of a Proportional – Integral - Derivative (PID) system. This PID system will automatically control the level of liquid of a tank using an industrial sensor (ultrasonic sensor) and a Siemens PLC model **S7-200** which includes an Analogical Module type **EM-235**. Previous to the implementation a PID controller model was developed and its variables were tuned using Ziegler-Nichlos method. Model functionality was simulated using **Matlab 7.0™** and **Control Station 3.7™** software.

Coronel Delgado Pedro Xavier
Peralta Espinoza Paúl Andrés
Trabajo de graduación
Ing. Francisco Vásquez Calero
Julio 2009

Introducción

Este trabajo está preparado para capacitar a los estudiantes en el control de procesos, para que den soluciones prácticas y fiables al sector industrial. El estudiante estará capacitado para diseñar e implementar un sistema de control, no sólo de forma teórica sino trabajando con instrumentos actuales de la industria como son los controladores lógicos programables (PLC), electroválvulas diferenciales y sensores de nivel de gran precisión.

El PLC Simatic S7-200 de Siemens se constituye en una de las principales herramientas para la automatización en nuestro medio, están diseñados para varios sistemas de automatización a mediana y gran escala, resultan prácticos por su costo y adaptabilidad a sensores y actuadores, así como a sistemas de intercambio de información.

Se implementará trabajos prácticos en el laboratorio utilizando los módulos analógicos del PLC y así los estudiantes tendrán conocimiento, no solo teórico como ya se mencionó antes sino práctico, trabajando con los instrumentos necesarios y actuales que tiene el sector industrial.

Con este pequeño aporte se ayuda a la universidad a formar mejores profesionales en la rama de control automático con conocimientos más completos para contribuir con la producción y desarrollo del sector.

CAPITULO 1

Sistemas de control

En este primer capítulo se realiza una introducción al control; se definen las variables y elementos que intervienen en un sistema de control y se analiza los diferentes tipos de sistemas.

1.1. Introducción al control

El control automático en la industria aparece por primera vez con el regulador centrífugo de contrapesos en la máquina de vapor de James Watt construida en 1775. Este aparato fue utilizado para regular la velocidad de la máquina manipulando el paso de vapor por medio de una válvula. Por lo tanto, están presentes todos los elementos de realimentación. El primer análisis de control automático es la explicación matemática del regulador centrífugo por James Clerk Maxwell en 1868. Más tarde la técnica de regular se adjudicó a otras máquinas y turbinas.

1.1.1. Definición de control

Dentro del campo de los procesos industriales se entiende por control el hecho de procurar, mediante un algoritmo (de control), que una determinada variable del proceso (variable controlada) se mantenga igual (o dentro de unos márgenes fijados) a un valor (punto de consigna) modificando si es necesario una variable de entrada (variable manipulada).

Algunas de las ventajas del control automático son las siguientes:

- Aumento en la cantidad o número de productos.
- Mejora en la calidad de productos.
- Economía de materiales.
- Economía de energía o potencia.
- Economía de equipos industriales.
- Reducción en la inversión de mano de obra en tareas no especializadas.
- Facilitar el trabajo del obrero.

La difusión de la aplicación del control automático en la industria ha creado la necesidad de elevar el nivel de la educación de un sector de obreros semiespecializados, capacitándolos para desempeñar tareas de mayor responsabilidad: el manejo y mantenimiento de equipos e instrumentos de control.

1.1.2. Variables de los sistemas de control de procesos

-Variable controlada: Cantidad o parámetro que se mide o controla, normalmente es la salida del sistema.

-Variable manipulada: Cantidad o parámetro que el controlador modifica para actuar sobre la variable controlada, normalmente es la entrada del sistema.

-Error: Diferencia entre el valor deseado y el valor real de la variable controlada.

-Planta: Objeto o conjuntos de objetos a controlar.

-Proceso: Desarrollo natural progresivamente continuo, marcado por una serie de cambios graduales, que se suceden unos a otros de forma relativamente fija, y que conducen a un resultado o propósito determinado.

-Sistemas: Combinación de componentes que actúan juntos y realizan un objetivo determinado, No necesariamente limitado a existencia física (aplicable a conceptos abstractos o dinámicos: economía, sociología, comportamiento, etc.)

-Perturbaciones: Señal que tiende a afectar negativamente el valor de la salida de un sistema. Puede ser interna o externa, depende de dónde se genere.

1.1.3. Elementos de control

-Sensor: Dispositivo que convierte la variable de salida en otra variable manejable, tal como un desplazamiento, una presión, o un voltaje, que pueda usarse para comparar la salida con la señal de entrada de referencia. Ejemplo: Termopar.

-Actuador: Dispositivo que transforma una señal en alguna acción, típicamente mecánica. Ejemplo: Electroválvula.

-Controlador: Dispositivo con una salida que varía para regular una variable de control de una manera específica. Un controlador manual varía su salida automáticamente en respuesta a una entrada directa o indirecta de un proceso variable. Ejemplo: PLC.

-Líneas de transmisión: Es el medio utilizado para dirigir la transmisión de información entre dos lugares que se comunican. Ejemplo: Fibra óptica.

-Interface: Circuito físico a través del que se envían o reciben señales desde un sistema o subsistemas hacia otros. Ejemplo: Un optoacoplador

-Transductor: Dispositivo basado en un sensor que incorpora acondicionamiento de la señal. Ejemplo: Ultrasonido de nivel

-Elementos de registro: Sirven para almacenar y visualizar como se comportan las señales de un proceso, las mismas que son normalmente las variables medidas por el sistema de control.

1.2. Sistemas de control de lazo abierto

Un sistema de control de lazo abierto es aquel en el cual la acción de control es independiente de la salida. En otras palabras, en un sistema de control de lazo abierto no se mide la salida ni se realimenta para compararla con la entrada. Un ejemplo práctico es una lavadora. El remojo, el lavado y el enjuague en la lavadora operan con una base de tiempo. La máquina no mide la señal de salida, que es la limpieza de la ropa.

En cualquier sistema de control de lazo abierto, la salida no se compara con la entrada de referencia. Por tanto, a cada entrada de referencia le corresponde una condición operativa fija; como resultado, la precisión del sistema depende de la calibración. Ante la presencia de perturbaciones, un sistema de control de lazo abierto no realiza la tarea deseada.

En la práctica, el control de lazo abierto sólo se usa si se conoce la relación entre la entrada y la salida y si no hay perturbaciones internas ni externas. Es evidente que estos sistemas no son de control realimentado. Observe que cualquier sistema de control que opere con una base de tiempo es en lazo abierto. Por ejemplo, el control del tránsito mediante señales operadas con una base de tiempo es otro tipo de control de lazo abierto.

1.3. Sistemas de control de lazo cerrado

Un sistema que mantiene una relación prescrita entre la salida y la entrada de referencia, comparándolas y usando la diferencia como medio de control, se denomina sistema de control realimentado. Un ejemplo sería el sistema de control de temperatura de una habitación. Midiendo la temperatura real y comparándola con la temperatura de referencia (la temperatura deseada), el termostato activa o desactiva el equipo de calefacción o de enfriamiento para asegurar que la temperatura de la habitación se conserve en un nivel deseado sin considerar las condiciones externas.

Los sistemas de control realimentados se denominan también sistemas de control en lazo cerrado. En la práctica, los términos control realimentado y control en lazo cerrado se usan indistintamente. En un sistema de control de lazo cerrado, se alimenta al controlador la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación (que puede ser la señal de salida misma o una función de la señal de salida y sus derivadas y/o integrales), a fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor conveniente. El término control en lazo cerrado siempre implica el uso de una acción de control realimentado para reducir el error del sistema.

1.4. Control de lazo cerrado vs. lazo abierto

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

- a) La habilidad que estos tienen para ejecutar una acción con exactitud está determinada por su calibración.
- b) Estos sistemas no tienen el problema de la inestabilidad que presentan los de lazo cerrado.

Ciertas características del lazo cerrado son:

- a) Aumento de la exactitud.
- b) Reducción de la sensibilidad de la salida correspondiente a una determinada entrada, ante variaciones internas en los parámetros del sistema.

- c) Efectos reducidos de la no linealidad y de la distorsión.
- d) Aumento del intervalo de frecuencias en el cual el sistema responde satisfactoriamente (aumento del ancho de banda).
- e) Tendencia a la oscilación o a la inestabilidad.

CAPITULO 2

Modelado matemático del problema

Este capítulo estudia la transformada de laplace y algunos de sus teoremas que resuelven el modelo matemático del sistema, pero antes se hace un análisis del comportamiento de los sistemas de primer orden.

2.1. Transformada de Laplace

La transformada de Laplace es un método operativo que se utiliza para resolver ecuaciones diferenciales lineales. Mediante el uso de la transformada es posible convertir muchas funciones (senoidales, senoidales amortiguadas, exponenciales) en funciones algebraicas de una variable s compleja. Si se resuelve la ecuación algebraica en s para la variable dependiente, la solución de la ecuación diferencial (la transformada inversa de Laplace de la variable dependiente) se encuentra mediante una tabla de transformadas de Laplace o una técnica de expansión en fracciones parciales.

Algunas de las ventajas de la transformada de Laplace es que permite el uso de técnicas gráficas para predecir el desempeño del sistema, sin tener que resolver las ecuaciones diferenciales, y cuando se resuelve la ecuación diferencial, es posible obtener simultáneamente tanto el componente transitorio como el componente de estado estable de la solución.

Definamos

f(t): Una función del tiempo t tal que $f(t) = 0$ para $t < 0$

s: Una variable compleja.

£: Un símbolo que indica la cantidad a la que antecede se va a transformar mediante la integral de Laplace.

F(s): Transformada de Laplace de $f(t)$

La transformada de Laplace de $f(t)$ se obtiene de:

$$\mathcal{L}[f(t)] = F(s) = \int_0^{\infty} f(t) \cdot e^{-st} dt$$

Si $\mathcal{L}[f(t)] = F(s)$, se define la transformada inversa de Laplace de $F(s)$ de la forma siguiente:

$$f(t) = \mathcal{L}^{-1} [F(s)]$$

\mathcal{L}^{-1} es el operador de la transformada inversa de Laplace.

2.1.1. Teoremas de la transformada de Laplace

-Teorema del desplazamiento (retardo)

Si $\mathcal{L}[f(t)] = F(s)$, entonces

$$\mathcal{L}[e^{-\alpha t} f(t)] \rightarrow F(s + \alpha)$$

Ejemplo:

$$f(t) = \cos(\beta t) \rightarrow F(s) = \frac{s}{s^2 + \beta^2}$$

-Teorema del valor final

Si $\mathcal{L}[f(t)] = F(s)$, entonces

$$\lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = \lim_{s \rightarrow 0} [sF(s)]$$

Permite calcular el valor de la función cuando $t \rightarrow \infty$, si se conoce su transformada de Laplace. Como ejemplo vamos a calcular $f(t)$ cuando $t \rightarrow \infty$ si:

$$\mathcal{L}[f(t)] = \frac{s + 4}{s(s + 1)(s + 2)(s + 3)}$$

Si aplicamos el teorema, se tiene que:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = \lim_{s \rightarrow 0} [sF(s)] = \lim_{s \rightarrow 0} \left[\frac{s(s + 4)}{s(s + 1)(s + 2)(s + 3)} \right] = \frac{4}{6}$$

-Teorema del valor inicial

Si $\mathcal{L}[f(t)] = F(s)$, entonces

$$\lim_{t \rightarrow 0} f(t) = \lim_{s \rightarrow \infty} [sF(s)]$$

Este teorema se utiliza bastante menos que el del valor final.

2.1.2. Transformadas más utilizadas

$$\mathcal{L}[A] = \frac{A}{s}; \quad A = \text{constante}$$

$$\mathcal{L}[At] = \frac{A}{s^2}$$

$$\mathcal{L}[Af(t)] = AF(s)$$

$$\mathcal{L}[Af_1(t) + Bf_2(t)] = AF_1(s) + BF_2(s)$$

$$\mathcal{L}\left[\frac{d}{dt} f(t)\right] = sF(s) - F(0)$$

$$\mathcal{L}\left[\frac{d^2}{dt^2} f(t)\right] = s^2 F(s) - sF(0) - F'(0)$$

$$\mathcal{L}\left[\frac{d^n}{dt^n} f(t)\right] = s^n F(s) - s^{n-1} F(0) - s^{n-2} F'(0) - \dots - sF^{(n-2)}(0) - F^{(n-1)}(0); (s^0 = 1)$$

$$\mathcal{L}\left[A(1 - e^{-tB})\right] = \frac{A}{s} \frac{1}{(Bs + 1)}; \quad A \text{ y } B \text{ constantes}$$

$$\mathcal{L}\left[Ae^{-at}\right] = \frac{A}{s + a}$$

$$\mathcal{L}\left[A \frac{t^{n-1} e^{at}}{(n-1)!} \right] = \frac{A}{(s-a)^n}; \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

$$\mathcal{L}\left[\int_0^t f(t) dt \right] = \frac{1}{s} F(s)$$

$$\mathcal{L}[\text{sen } wt] = \frac{w}{s^2 + w^2}$$

$$\mathcal{L}[\text{cos } wt] = \frac{s}{s^2 + w^2}$$

2.2. Función de transferencia

Una vez que se han definido los diferentes tipos de sistemas, es necesario conocer la dinámica de los mismos a partir de ecuaciones que relacionen el comportamiento de una variable respecto a otra. Para lograr esto se requiere de gran conocimiento de los procesos y de los elementos que los conforman, y de cada una de las disciplinas de la ingeniería involucradas. Es por ello que la ingeniería de control se considera un campo interdisciplinario.

Una planta o cada una de las partes que forman un sistema de control, puede ser representada por un conjunto de ecuaciones integro-diferenciales de n-ésimo orden con coeficientes lineales invariantes en el tiempo que relacionan la variable de entrada con la variable de salida de la forma:

$$a_0 y^{(n)} + a_1 y^{(n-1)} + \dots + a_{n-1} \dot{y} + a_n y = b_0 x^{(m)} + b_1 x^{(m-1)} + \dots + b_{m-1} \dot{x} + b_m x \quad (2.2.1)$$

Usando la transformada de Laplace para convertir la ecuación integro diferencial (2.2.1) en una ecuación algebraica considerando que las condiciones iniciales son iguales a cero llegamos a la siguiente expresión:

$$Y(s) \left| s^n + a_n s^{n-1} + \dots + a_1 \right| = X(s) \left| b_{m+1} s^m + \dots + b_1 \right| \quad (2.2.2)$$

Relacionando la salida $Y(s)$ con la entrada $X(s)$ tenemos:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_{m-1} s + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n} \quad (2.2.3)$$

Esta última expresión es denominada la función de transferencia de sistema.

La función de transferencia de un sistema lineal con coeficientes constantes invariantes en el tiempo esta definida como: "La relación de la transformada de Laplace de la salida con la transformada de Laplace de la entrada, suponiendo condiciones iniciales cero".

El hecho de trabajar con funciones de transferencia, simplifica en gran medida el manejo matemático de los sistemas dado que las ecuaciones diferenciales se transforman en ecuaciones algebraicas lineales, y las operaciones en el dominio de la frecuencia compleja s son multiplicaciones simples.

Una metodología a seguir para la determinación de la función de transferencia de un sistema es la siguiente:

1. Identificar las ecuaciones de equilibrio o leyes físicas involucradas en el sistema.
2. Siguiendo las ecuaciones de equilibrio, plantear las ecuaciones integro-diferenciales correspondientes a cada variable de interés.
3. Obtener la transformada de Laplace de cada ecuación considerando condiciones iniciales cero.
4. Relacionar la variable de salida con la variable de entrada.

El enfoque de la función de transferencia se usa extensamente en el análisis y diseño de los sistemas descritos mediante ecuaciones diferenciales lineales invariantes en el tiempo, es por eso que:

- La función de transferencia de un sistema es un modelo matemático porque es un método operacional para expresar la ecuación diferencial que relaciona la variable de salida con la variable de entrada.
- La función de transferencia es una propiedad de un sistema, independiente de la magnitud y naturaleza de la entrada o función de excitación.
- La función de transferencia incluye las unidades necesarias para relacionar la entrada con la salida; sin embargo, no proporciona información acerca de la estructura física del sistema. (Las funciones de transferencia de muchos sistemas físicamente diferentes pueden ser idénticas.)
- Si se conoce la función de transferencia de un sistema, se estudia la salida o respuesta para varias formas de entrada, con la intención de comprender la naturaleza del sistema.
- Si se desconoce la función de transferencia de un sistema, puede establecerse experimentalmente introduciendo entradas conocidas y estudiando la salida del sistema. Una vez establecida una función de transferencia, proporciona una descripción completa de las características dinámicas del sistema, a diferencia de su descripción física.

Dada la naturaleza multidisciplinaria de un sistema de control este puede estar conformada por subsistemas interconectados, donde cada uno de ellos contiene elementos cuyo comportamiento es estudiado por diferentes ramas de la ingeniería.

2.2.1. Respuesta al impulso y al escalón

El estudio de la respuesta al impulso se debe a que la función de transferencia de un sistema continuo en el tiempo es la transformada de Laplace de su respuesta al impulso con condiciones iniciales nulas. Es muy común estudiar el comportamiento

de la dinámica de los sistemas usando la respuesta al escalón, es decir $U(s) = 1/s$, por lo que:

$$Y(s) = G(s) \frac{1}{s}$$

Es muy útil definir una serie de parámetros que describen algunas propiedades relevantes de la dinámica de los sistemas. Para estas definiciones, se considera funciones de transferencia estables teniendo como respuesta al escalón la figura 2.2.1:

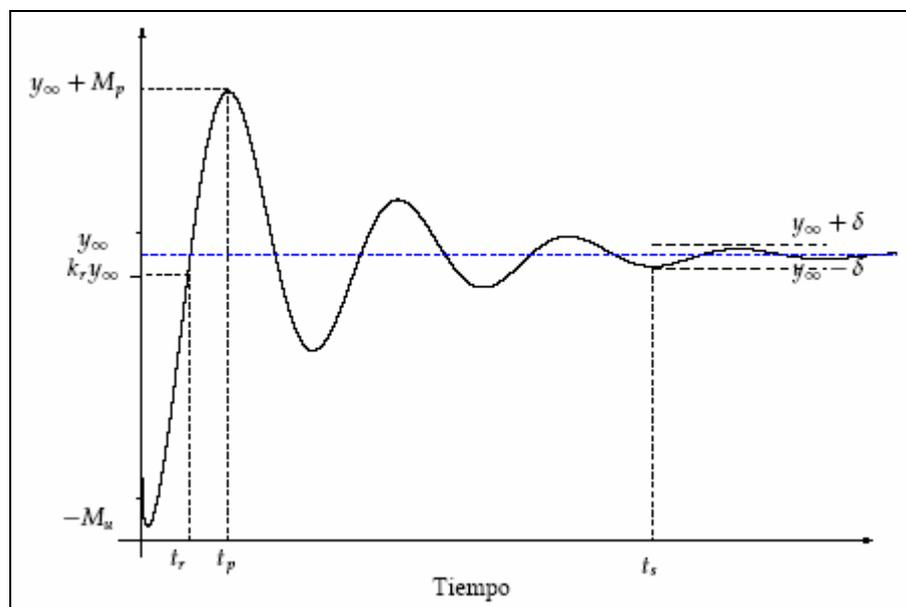


Figura 2.2.1 Indicadores de la respuesta escalón.

Valor en el régimen estacionario, y_∞ : el valor final de la respuesta al escalón (esto no tiene sentido si el sistema tiene polos en el semiplano derecho).

Tiempo de crecimiento, t_r : el tiempo que transcurre hasta el instante en el cual la respuesta al escalón alcanza, la primera vez, el valor $k_r y_\infty$. La constante k_r varía según el diseño, comúnmente se toma tanto 0.9 o 1.

Sobre error, M_p : el máximo valor por el que la respuesta al escalón excede su valor final. Generalmente se expresa como un porcentaje de y_∞ .

Subvalor, M_u : el máximo (valor absoluto) por el que la respuesta al escalón pasa por debajo del cero.

Tiempo de establecimiento, t_s : el tiempo transcurrido hasta que la respuesta al escalón ingresa (sin dejarlo en tiempo subsiguiente) a una banda $\pm \delta$, alrededor del valor final. Esta banda δ , generalmente se define como un porcentaje de y_∞ , 2% a 5%

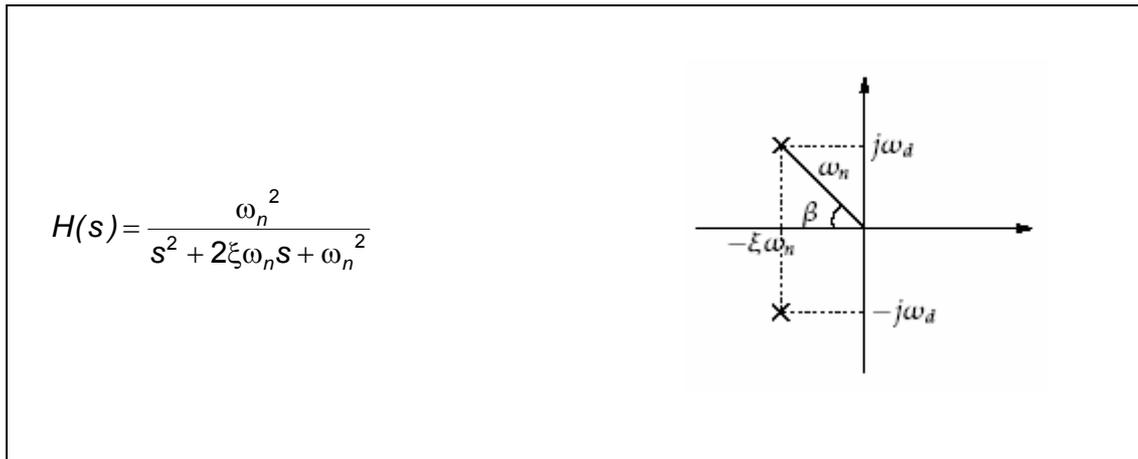


Figura 2.2.2 Función transferencia y ubicación de par de polos conjugados.

Para el caso de un par de polos complejos conjugados, figura 2.2.2, donde $\xi(0 < \xi < 1)$ es conocido como el factor de amortiguamiento y ω_n , como la frecuencia natural.

Definimos también la frecuencia natural de amortiguamiento, ω_d como:

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2}$$

Los polos complejos conjugados de este sistema, s_1 y s_2 , pueden expresarse de la forma:

$$s_{1,2} = -\xi\omega_n \pm j\omega_d = \omega_n e^{\pm j(\pi - \beta)}$$

Las características de la respuesta al escalón unitario de este sistema llevan a calcular los indicadores descriptos en la figura 2.2.1:

Tiempo de crecimiento

Para este caso tomaremos $k_r = 1$, y obtenemos

$$t_r = \frac{\pi - \beta}{\omega_d} \approx \frac{1.8}{\omega_n}$$

Sobre valor

El máximo valor de la salida, M_p ocurre en el tiempo $t_p = \frac{\pi}{\omega_d} = \frac{T_d}{2}$ entonces:

$$M_p = e^{-\frac{\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}}$$

Tiempo de establecimiento

Para un error en el régimen estacionario de 1% tenemos que:

$$e^{-\xi\omega_n t_s} = 0.01 \text{ por lo que } t_s = \frac{4.6}{\xi\omega_n}$$

2.3. Sistemas de primer orden**2.3.1. Definición de sistemas de primer orden**

Dado el siguiente proceso, mostrado en la figura 2.3.1, donde $f(t)$ es la señal de entrada e $y(t)$ la señal de salida de un sistema, se dice que es de “primer orden” cuando la señal de salida $y(t)$ puede modelarse por una ecuación diferencial de primer orden.

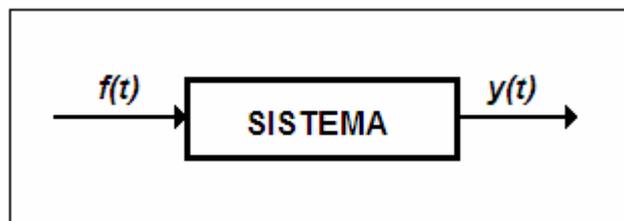


Figura 2.3.1 Sistema de primer orden.

En el caso de un sistema lineal o linealizable se tiene la siguiente expresión representada en la ecuación 2.3.1

$$a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b f(t) \quad (2.3.1)$$

2.3.2. Sistemas de primer orden reales

Los sistemas de primer orden son los descritos por la ecuación (2.3.1) cuando $a_0 \neq 0$. Si se divide esta ecuación por a_0 se obtiene lo siguiente:

$$\frac{a_1}{a_0} \frac{dy}{dt} + y = \frac{b}{a_0} f(t) \quad (2.3.2)$$

De la (2.3.2) obtenida se define:

$$\frac{a_1}{a_0} = \tau_p \equiv \text{“constante de tiempo de proceso”}$$

$$\frac{b}{a_0} = K_p \equiv \text{“ganancia del proceso”}$$

De estas definiciones es posible reescribir la ecuación (2.3.2) reemplazando los términos definidos como: constante de tiempo de proceso τ_p y la ganancia del proceso K_p como se muestra en la ecuación (2.3.3) descrita a continuación.

$$\tau_p \frac{dy}{dt} + y = K_p f(t) \quad (2.3.3)$$

Para calcular la función de transferencia del proceso mostrada en la ecuación (2.3.4) a continuación, se aplica laplacianos en la ecuación (2.3.3), suponiendo que las condiciones iniciales son 0 se tiene que: $y(0) = 0$; $f(0) = 0$.

$$\tau_p (s y(s)) + y(s) = K_p F(s)$$

Luego la función de transferencia será:

$$G(s) = \frac{y(s)}{F(s)} = \frac{K_p}{\tau_p s + 1}$$

(2.3.4)

La ecuación (2.3.4) es la función de transferencia correspondientes a todos los procesos de prime orden en el caso $a_0 \neq 0$

2.3.3. Variables de desviación

La variable de desviación (figura 2.3.3) es la diferencia entre el valor de una variable en un momento dado y el valor de la misma en estado estacionario. La utilidad de estas variables se verá a continuación para el modelado matemático del problema.

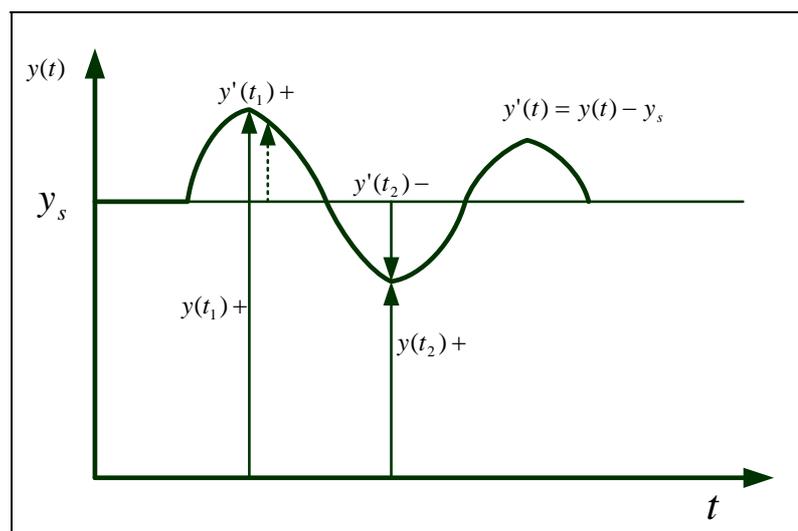


Figura 2.3.3 Variable de desviación.

2.3.4. Respuesta del sistema de primer orden real

La función de transferencia para estos sistemas viene dada por la ecuación:

$$G(s) = \frac{h'(s)}{F_i'(s)} = \frac{K_p}{\tau_p s + 1}$$

Considerando que la entrada es un escalón se llega a que:

$$y(s) = F(s) G(s) = \frac{1}{s} \frac{K_p}{\tau_p s + 1}$$

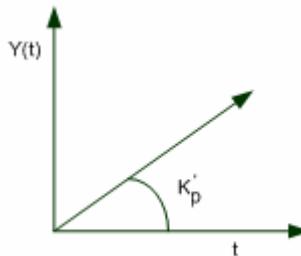
Y tomando antilaplacianas

$$y(t) = K_p (1 - e^{-t/\tau_p})$$

Si el cambio en escalón es de magnitud A, en lugar de ser unitario, se tiene:

$$y(t) = AK_p (1 - e^{-t/\tau_p})$$

Dado que si $t \rightarrow \infty \Rightarrow y(t) \rightarrow K_p$, el sistema es estable a lo largo del tiempo.



En el límite la respuesta del sistema será, asintótica al valor AKp, debido a que:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = AK_p \Rightarrow \frac{1}{AK_p} \lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = 1$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \left[\frac{y(t)}{AK_p} \right] = 1$$

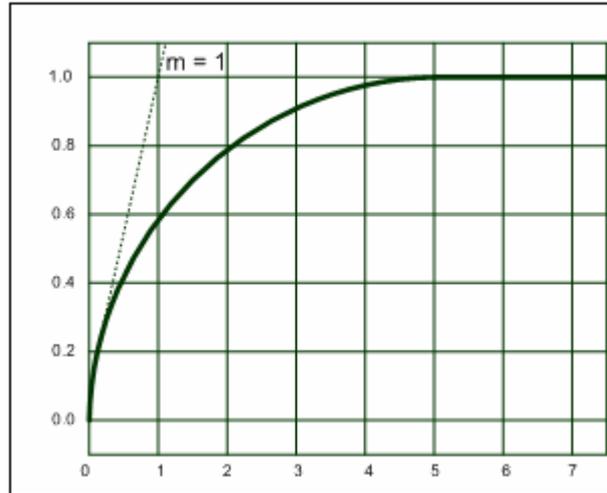


Figura 2.3.4 Señal de salida de un sistema de primer orden.

Como se observa en la gráfica (figura 2.3.4) la ecuación de la señal de salida de un sistema de primer orden real es de tipo exponencial cuyo límite es AK_p .

1. El sistema de primer orden real se autorregula por si mismo.
2. La pendiente de la respuesta para $t = 0$ es igual a 1, lo que implica que se mantiene la velocidad inicial de variación de $y(t)$, la respuesta alcanza su valor final en un tiempo constante (línea discontinua de la gráfica). La constante de tiempo es la medida del tiempo necesario para que el proceso se ajuste a los cambios en su variable de entrada. Cuanto menor sea τ_p , más rápido responde el sistema.

$$\left[\frac{d\left(\frac{y(t)}{AK_p}\right)}{d\left(\frac{t}{\tau_p}\right)} \right] = \left(e^{-t/\tau_p} \right)_{t=0} = 1$$

3. El valor de la respuesta $y(t)$ alcanza el 63.2 % de su valor cuando el tiempo pasado es igual a la constante de tiempo τ_p ya que;

$$y(\tau_p) = AK_p(1 - e^{-1}) = AK_p(0.632)$$

además:

Tiempo transcurrido	$2 \tau_p$	$3 \tau_p$	$4 \tau_p$
y(t) (en % de su valor final)	86.5	95	98.2

4. El último valor de la respuesta y(t) es K_p para un cambio en la variable de entrada de una unidad. Si el cambio de la variable es A, el último valor de la respuesta será AK_p . K_p es la ganancia y permite conocer cuanto se debe modificar la variable de entrada para producir un determinado cambio en la variable de salida.

$$K_p = \frac{\Delta(\text{Variable de salida})}{\Delta(\text{Variable de entrada})}$$

2.4. Modelado matemático del sistema de nivel de líquido

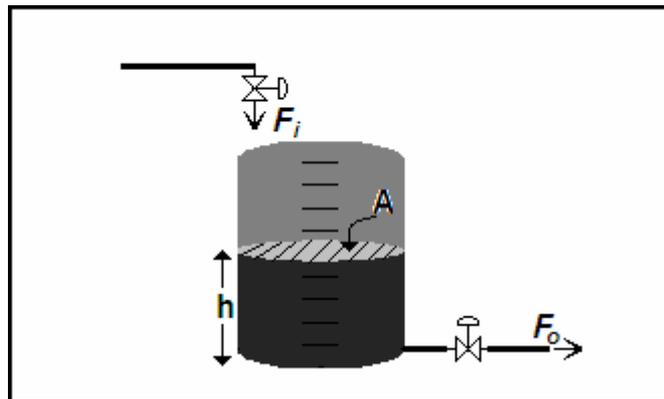


Figura 2.4 Sistema de nivel de líquido.

De la figura 2.4 y con simple deducción se tiene:

$$F_i = \left(\frac{\text{Volumen}}{\text{tiempo}} \right)$$

$$V = A \cdot h$$

$$\frac{dV}{dt} = A \cdot \frac{dh}{dt}$$

(2.4.1)

Sea el tanque mostrado en la figura 2.4, al que está entrando un caudal volumétrico F_i y del que sale un caudal F_o . Suponemos que F_o es directamente proporcional a la altura de líquido en el tanque, e inversamente proporcional a la resistencia R (debida al estrechamiento de la salida, rozamientos en la tubería, válvulas, etc.)

$$F_o = \frac{h}{R} \neq cte$$

$$F_i = f(t)$$

Con estos datos se muestra a continuación el balance de materia en estado no estacionario del sistema en la ecuación (2.4.1)

Entrada = Salida + Acumulado

$$F_i = F_o + A \frac{dh}{dt} \quad \Rightarrow \quad F_i = \frac{h}{R} + A \frac{dh}{dt} \quad (2.4.2)$$

Se multiplica (2.4.2) por R y se obtiene lo siguiente:

$$RF_i = h + AR \frac{dh}{dt}$$

Si $\tau_p = AR$ y $K_p = R$ Entoces se tiene :

$$\tau_p \frac{dh}{dt} + h = K_p F_i \quad (2.4.3)$$

La ecuación (2.4.3) corresponde a un sistema de primer orden. Tal como fue definido el proceso hasta ahora, cuando $t = 0$, $h(0)$. El tiempo (t) comienza a contar cuando se produce una modificación respecto al estado estacionario. Se utiliza ahora las variables de desviación para que $h''(0) = 0$. El balance de materia en estado estacionario al tanque resulta la ecuación (2.4.4):

$$E = S \quad \rightarrow \quad E - S = 0 \quad \rightarrow \quad F_{i,s} - F_{o,s} = 0$$

$$F_{i,s} - \frac{h_s}{R} = 0 \quad (2.4.4)$$

Restando (2.4.4) de (2.4.2) se obtiene:

$$A \frac{dh}{dt} = F_i - F_{i,s} - \frac{1}{R}(h - h_s)$$

Se define $F_i' = F_i - F_{i,s}$ y $h' = h - h_s$, donde F_i' y h' son variables de desviación, entonces:

$$A \frac{dh}{dt} = F_i' - \frac{1}{R} h'$$

Como $\frac{dh'}{dt} = \frac{dh}{dt}$ porque $\frac{d(h - h_s)}{dt} = \frac{dh}{dt}$ pues $h_s = cte$

$$A \frac{dh'}{dt} = F_i' - \frac{1}{R} h'$$

(2.4.5)

Se multiplica por R la ecuación (2.4.5) y se obtiene:

$$AR \frac{dh'}{dt} + h' = F_i' R \quad \text{ò} \quad \tau_p \frac{dh'}{dt} + h' = K_p F_i'$$

(2.4.6)

La función de transferencia del sistema, considerando que $h'(0) = 0$, será:

$$G(s) = \frac{h'(s)}{F_i'(s)} = \frac{K_p}{\tau_p s + 1} = \frac{R}{ARs + 1}$$

(2.4.7)

CAPITULO 3

Simulación y análisis del sistema con Matlab™

Para un mejor estudio del sistema se realiza la simulación del sistema en Matlab con el cual se muestra su comportamiento frente a una función escalón. Este capítulo hace una introducción a los diagramas de bloque y algunas operaciones elementales.

3.1. Diagramas de bloques

Un sistema de control puede constar de cierta cantidad de componentes. Para mostrar las funciones que realiza cada componente se acostumbra usar representaciones esquemáticas denominadas Diagrama de Bloques. Este tipo de diagramas emplea tres símbolos:

Bloque



Sirve para representar un sistema al que llega información (variable de entrada) y en el que se produce información (variable de salida). Se lo identifica con una letra Mayúscula que da el valor del bloque.

Señal



Representativa de variables de entrada o salida. La dirección del flujo de información viene dado por el sentido de la flecha. Se caracteriza con una letra minúscula.

Sumador



Elemento que sirve para combinar dos señales de entrada generando una salida que es su suma (o resta).

3.1.1. Operaciones elementales

Dos son las operaciones elementales definidas para los Diagramas en bloque. Una la que define la función del bloque y que se esquematiza como sigue:

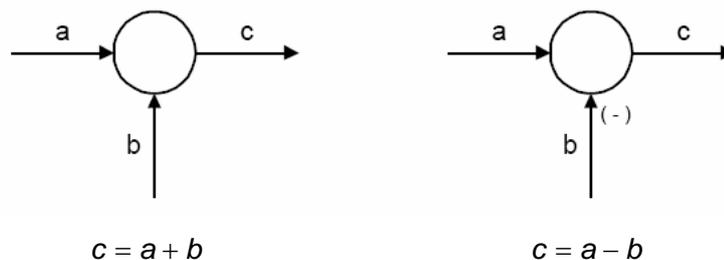


La variable de entrada es 'a', perfectamente individualizada por la dirección de la flecha. La variable de salida es 'b' y la relación matemática entre ambas es:

$$b = G \cdot a$$

Se quiere poner de manifiesto una relación causa-efecto. La variable de entrada 'a' influye (causa) en el sistema determinado por el bloque G que genera una variable de salida (efecto). Esta variable de salida es la consecuencia de la entrada 'a' y de la naturaleza del sistema 'G'. Cada bloque tiene una sola entrada y una sola salida.

La combinación de señales se hace a través del sumador al que ingresan dos señales de entrada y de la que resulta una salida, la suma (o resta) de las entradas:



Cuando una de las señales se resta, debe indicarse explícitamente en la proximidad del sumador con el signo '(-)'. Toda la representación de un sistema físico en el que existen diversos subsistemas y en que se relacionan diversas variables se debe describir con estos tres elementos.

A modo de ejemplo se considera un tanque agitado (figura 3.1.1) continuo al que ingresa una corriente F_1 y sale una corriente F_2 . Mediante un flujo de vapor W que

condensa en un serpentín que transfiere calor haciendo que la corriente que ingresa a la temperatura T_1 salga a una mayor T_2 .

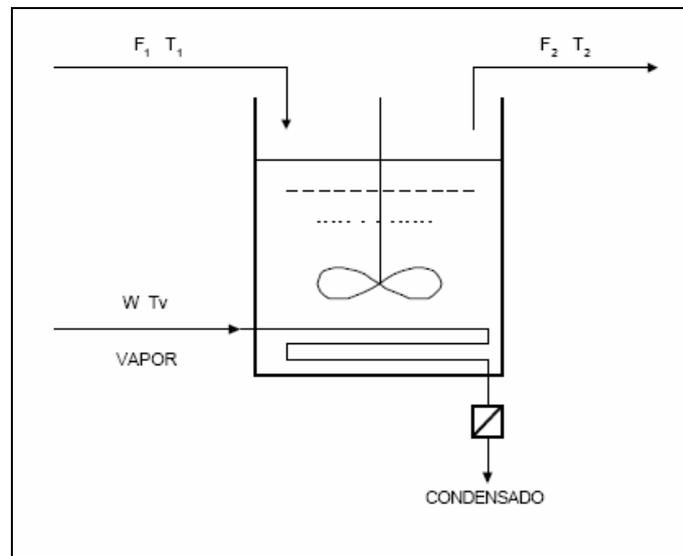
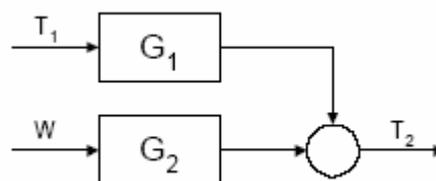


Figura 3.1.1 Sistema de un tanque agitado.

Hay diversas variables de entrada. Considérese T_1 y W (se supone que solo éstas cambian). Debido al cambio de estas entradas, la temperatura T_2 cambiará. Se observa la acción de dos causas (variables de entrada) y el efecto sobre una variable de salida T_2 a través de un sistema que en este caso es el tanque. Para representar esta relación entrada-salida (causa-efecto) se puede emplear el siguiente diagrama de bloques:



que matemáticamente se puede expresar como:

Salida = (Bloque 1) entrada 1 + (Bloque 2) entrada 2

$$T_2 = T_1 G_1 + W G_2$$

y que puede interpretarse de la siguiente forma:

T_2 cambia como resultado de la influencia de cambios en T_1 (una de las entradas) a través del bloque G_1 a lo que se le debe sumar la influencia de la otra variable de entrada W que produce cambios en la salida a través del bloque G_2 . Tanto G_1 como G_2 representan la influencia del sistema (en este caso el tanque con calefacción) sobre la variable de salida, pero cada una considera la influencia de una variable de entrada.

La representación con diagramas en bloques sirve exclusivamente para sistemas lineales, es decir para aquellos en los que la influencia de diversas variables de entrada resultan igual a la suma de las influencias individuales. No obstante esto, se puede extender este análisis a sistemas no lineales.

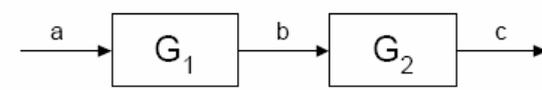
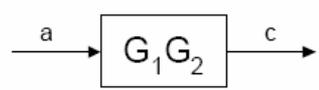
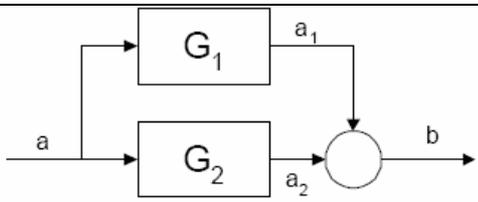
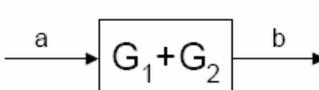
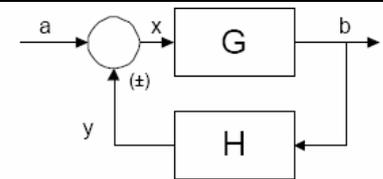
Las ventajas de esta representación es que resulta fácil formar el diagrama en bloques global de todo el sistema, colocando simplemente los bloques de sus componentes de acuerdo con el flujo de señales. De esta forma es posible evaluar la contribución de cada componente al comportamiento general de todo el sistema. El funcionamiento de un sistema se puede ver más fácilmente examinando el diagrama de bloques, que analizando el sistema físico en sí.

Un diagrama de bloques contiene información respecto al comportamiento dinámico, pero no de la constitución física del sistema. En consecuencia, muchos sistemas distintos, sin relación alguna entre ellos, pueden estar representados por el mismo diagrama de bloques.

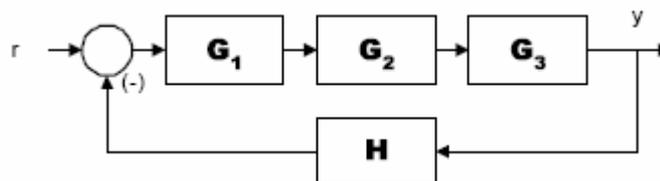
3.1.2. Álgebra elemental de bloques

Los diagramas de bloques representados por muchos bloques y señales intermedias pueden simplificarse en un solo bloque cuyo valor es una función de los bloques individuales pero no de las señales intermedias.

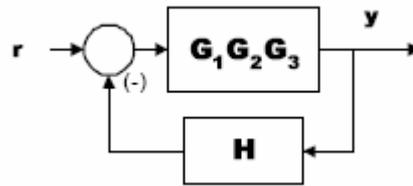
Para simplificar diagramas muy complejos se pueden emplear las tres reglas elementales (y toda otra que se deduzca a partir de ellas) que se presentan en la tabla siguiente.

Bloques en serie	
 <p style="text-align: center;">$b = G_1 a$ $c = G_2 b$</p>	 <p style="text-align: center;">$\Rightarrow c = G_1 G_2 a = G a$</p>
Bloques en paralelo	
 <p style="text-align: center;">$a_1 = G_1 a$ $a_2 = G_2 a$ $b = a_1 + a_2$</p>	 <p style="text-align: center;">$\Rightarrow b = (G_1 + G_2) a = G a$</p>
Realimentación	
 <p style="text-align: center;">$x = a + y$</p> <p style="text-align: center;">$b = Gx$ $y = Hb$</p> <p style="text-align: center;">$x = a - y$</p>	 <p style="text-align: center;">$\Rightarrow b = \frac{G}{1 - GH} a = Fa$</p> <p style="text-align: center;">$\Rightarrow b = \frac{G}{1 + GH} a = Fa$</p>

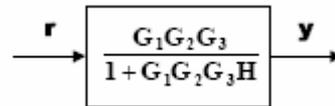
Empleando estas reglas se puede simplificar diagramas integrados por diversos elementos hasta llegar a una representación mínima. A modo de ejemplo, se puede considerar el diagrama siguiente (muy difundido en Control de Procesos) que consta de 4 bloques y 2 sumadores. Se pretende encontrar la relación entre "r" (entrada) e "y" (salida) a través de un solo bloque equivalente.



Considerando los bloques en serie G_1 , G_2 y G_3 queda:



y resolviendo la realimentación:



o expresado en términos de ecuaciones:

$$y = \frac{G_1G_2G_3}{1 + G_1G_2G_3H} \cdot r$$

Esto nos refiere a la conocida "*Regla de Mason*" que dice que cuando existe un lazo de realimentación, la transferencia entre la entrada y la salida es igual al producto de todas las transferencias en el camino directo entrada-salida dividido en 1 más el producto de todas las transferencias incluidas en el circuito de realimentación (o 1 menos si la realimentación es positiva).

3.2. Simulación y análisis

Para la simulación y análisis del sistema se utiliza la ecuación 2.4.7 obtenida en el capítulo anterior, los datos a sustituir por las variables son los correspondientes a las medidas del tanque descritos a continuación:

Radio del tanque $r = 27.5\text{cm}$

$$A = \pi \cdot r^2$$

$$A = \pi \cdot (0.275\text{m})^2$$

$$A = 0.2376\text{m}^2$$

$$R = 1$$

Se reemplaza estos datos en la función y se tiene:

$$G(s) = \frac{h'(s)}{F_i'(s)} = \frac{K\rho}{\tau_p s + 1} = \frac{R}{ARs + 1}$$

$$G(s) = \frac{1}{0.2376s + 1} \quad (3.2.1)$$

3.2.1. Código de programa en Matlab

```
>> A=pi*0.275^2      %Se calcula el área del tanque

A =

    0.2376

>> R=1              %Se define R = 1

R =

    1

>> G=tf(R,[A*R 1]) %comando para definir la función de transferencia (tf)

Transfer function:
    1
-----
0.2376 s + 1

>> step(G)         %comando para visualizar la respuesta al escalón de la FT
```

La figura 3.2.1 muestra la respuesta al escalón de la función de transferencia ejecutado por el comando “step”.

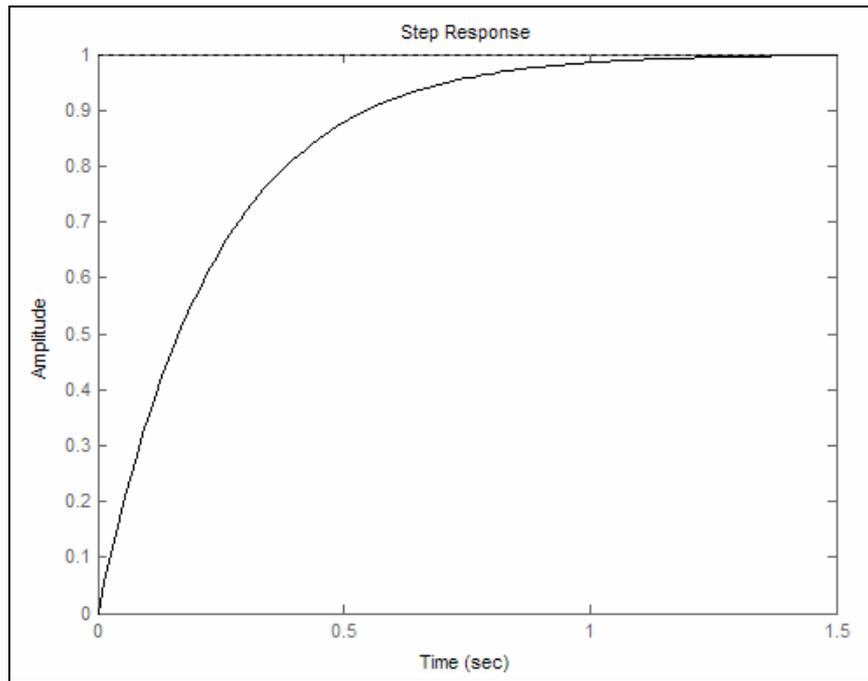


Figura 3.2.1 Respuesta al escalón.

3.2.2. Diagrama en Simulink

A continuación se realiza la simulación en diagramas de bloques con “Simulink” de Matlab figura 3.3.2 y la respuesta vista en el “scope” figura 3.2.3.

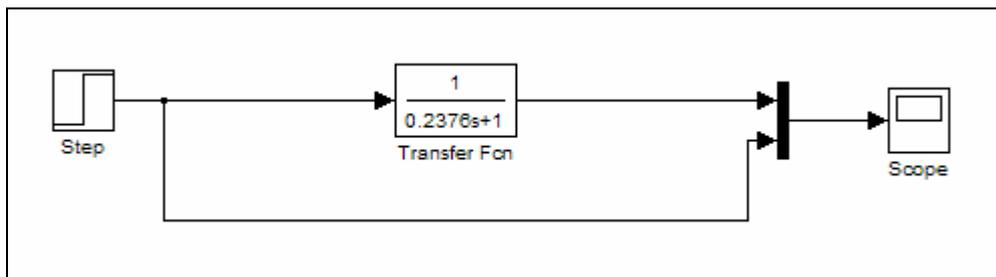


Figura 3.2.2 Diagrama de bloques del sistema.

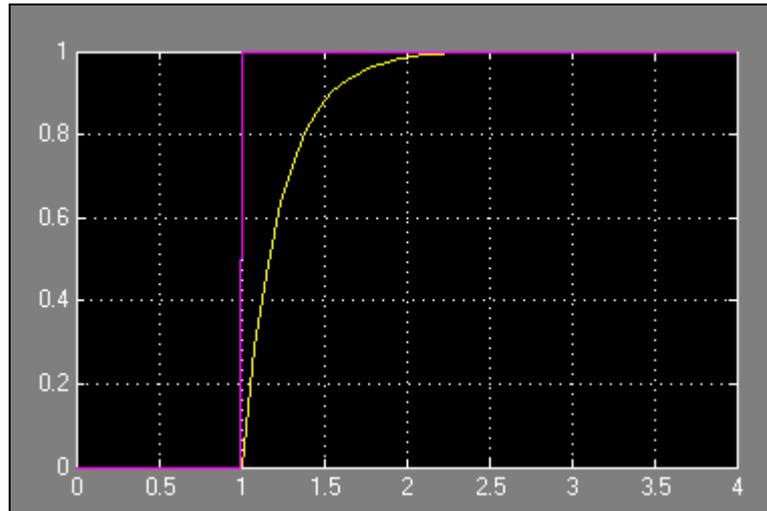


Figura 3.2.3 Respuesta al escalón en simulink.

Como se puede observar en las gráficas (figura 3.2.2 y figura 3.2.3) corresponden a un sistema de primer orden (Subcapítulo 2.3) véase figura 2.3.4

CAPITULO 4

Diseño del sistema de control

Mediante la simulación y análisis estudiado en el capítulo 3, donde se muestra el comportamiento de la respuesta al escalón, se procede a realizar el diseño del controlador PID.

4.1. Control por realimentación

La función de un controlador por realimentación es la de recibir la señal del instrumento de medida $Y_m(t)$, y una vez comparada con el punto de consigna, Y_{sp} , producir la señal que accione el elemento final de control, $c(t)$, para que el valor de Y se aproxime al de Y_{sp} . La función de entrada al controlador es el error $\varepsilon(t) = Y_{sp} - Y_m(t)$. Todo esto mostrado en la figura 4.1.1 a continuación.

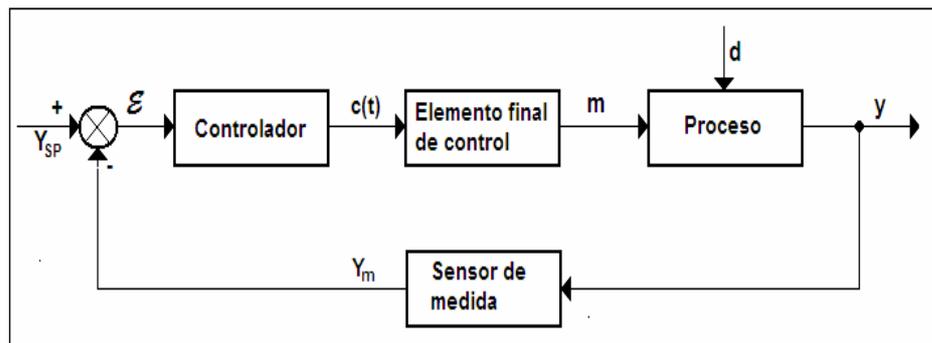


Figura 4.1.1 Diagrama de bloques de un control realimentado.

4.2. Controlador proporcional P

4.2.1. Acción 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 4.2.1 muestra la característica de un controlador proporcional. De esta manera, el controlador está caracterizado por la función no lineal $u = f_c(e)$ dependiente del error de control, que se muestra en la figura.

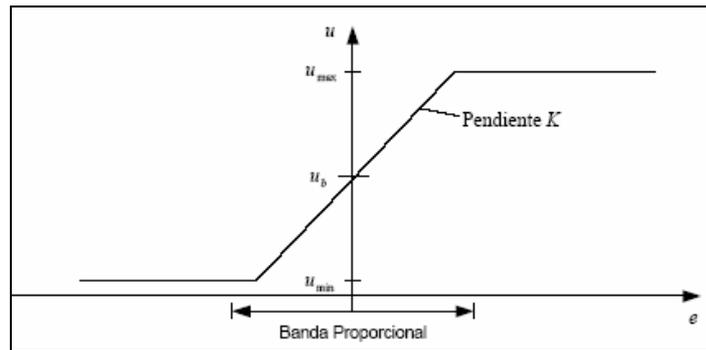


Figura 4.2.1 Característica de un controlador proporcional.

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_c del controlador) o, bien, por el rango donde la curva característica es lineal (conocida como *banda proporcional* P_b).

4.2.2. Señal de salida

La señal de salida del controlador es la que se muestra a continuación en la ecuación 4.2.2 de la cual se tiene:

$K_c \equiv$ Ganancia proporcional del controlador.

$C_s \equiv$ Señal del controlador cuando el error es cero.

$$C(t) = C_s + K_c \varepsilon(t) \quad (4.2.2)$$

Se deduce entonces que un controlador proporcional queda definido por su ganancia proporcional. Si se define la variable de desviación se tiene lo siguiente:

$$C'(t) = C(t) - C_s$$

Entonces se tiene:

$$C'(t) = K_c \varepsilon(t)$$

Tomando laplacianas

$$L[C'(t)] = C'(s) = L[K_c \varepsilon(t)] = K_c \varepsilon(s)$$

$$C'(s) = K_c \varepsilon(s)$$

$$G_c = \frac{C'(s)}{\varepsilon(s)} = K_c$$

(4.2.3)

La función de transferencia del controlador proporcional P coincide con su ganancia K_c . Como se muestra en la ecuación (4.2.3)

4.3. Controlador proporcional integral PI

4.3.1. Acción integral

Esta función es llamada acción integral o reset. La respuesta del lazo abierto del modo reset es mostrada en la figura 4.3.1 que indica un escalón de cambio en algún instante en el tiempo. En tanto que la medición estuviera en su valor de consigna, no existiría ningún cambio en la salida debido al modo de reset en el controlador.

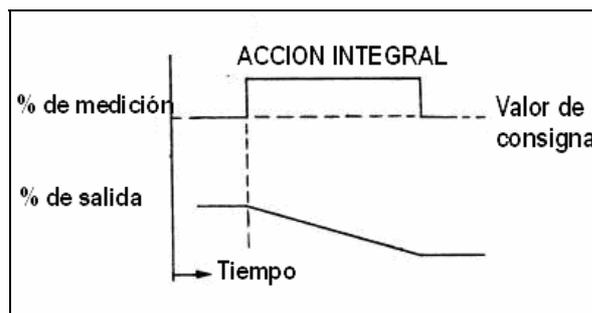


Figura 4.3.1 Acción Integral

Sin embargo, cuando cualquier error exista entre la medición y el valor de consigna, la acción de reset hace que la salida comience a cambiar y continúe cambiando en tanto el error exista. Esta función, entonces, actúa sobre la salida para que cambie hasta un valor correcto necesario para mantener la medición en el valor de consigna a varias cargas.

4.3.2. Señal de salida

La señal de salida del controlador es la que se muestra a continuación en la ecuación 4.3.2 de la cual se tiene:

τ_I = Constante de tiempo integral

K_c = Ganancia proporcional del controlador

C_s = Señal del controlador cuando la señal es cero

$$C(t) = C_s + K_c \varepsilon(t) + \frac{K_c}{\tau_I} \int_0^t \varepsilon(t) dt \quad (4.3.2)$$

Si se define $C'(t) = C(t) - C_s$ y tomando laplacianas:

$$L[C'(t)] = C'(s) = L\left[K_c \varepsilon(t) + \frac{K_c}{\tau_I} \int_0^t \varepsilon(t) dt\right] = K_c \varepsilon(s) + \frac{K_c}{\tau_I} \frac{1}{s} \varepsilon(s)$$

La función de transferencia del controlador proporcional integral PI será la que se muestra a continuación en la ecuación 4.3.3:

$$G(s) = \frac{C'(s)}{\varepsilon(s)} = K_c \left(1 + \frac{1}{\tau_I s}\right) \quad (4.3.3)$$

4.4. Controlador proporcional integral derivativo PID

4.4.1. Acción derivativa

La tercera respuesta encontrada en controladores es la acción derivativa. Así como la respuesta proporcional responde al tamaño del error y el reset responde al tamaño y duración del error, el modo derivativo responde a cuan rápido cambia el error. En la figura 4.4.1, dos respuestas derivativas son mostradas.

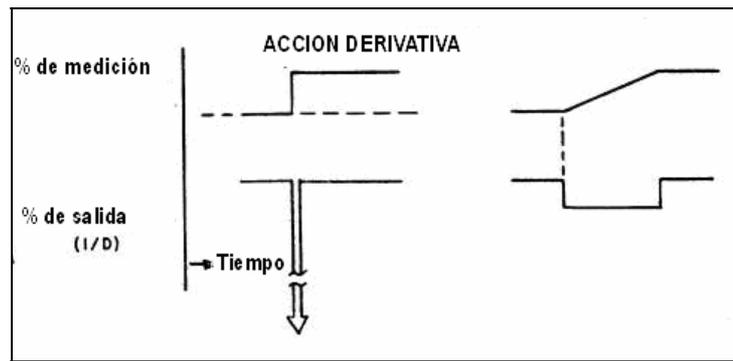


Figura 4.4.1 Acción derivativa

La primera es una respuesta a un corte en la medición alejada del valor de consigna. Para un escalón, la medición cambia en forma infinitamente rápida, y el modo derivativo del controlador produce un cambio muy grande y repentino en la salida, que muere inmediatamente debido a que la medición ha dejado de cambiar luego del escalón. La segunda parte muestra la respuesta del modo derivativo a una medición que está cambiando a un régimen constante. La salida derivativa es proporcional al régimen de cambio de éste error. Cuanto mayor sea el cambio, mayor será la salida debido a la acción derivativa. La acción derivativa mantiene ésta salida mientras la medición esté cambiando. Tan pronto como la medición deja de cambiar, esté o no en el valor de consigna, la respuesta debido a la acción derivativa cesará.

4.4.2. Señal de salida

La señal de salida del controlador del controlador PID es la que se muestra a continuación en la ecuación 4.4.2 de la cual se tiene:

τ_D = Constante de tiempo derivativo

τ_I = Constante de tiempo integral

K_c = Ganancia proporcional del integrador

C_s = Señal del controlador cuando el error es cero

$$C(t) = C_s + K_c \varepsilon(t) + \frac{K_c}{\tau_I} \int_0^t \varepsilon(t) dt + K_c \tau_D \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (4.4.2)$$

Si se define $C'(t) = C(t) - C_s$ y tomando laplacianas:

$$C'(s) = K_c \varepsilon(s) + \frac{K_c}{\tau_I} \frac{1}{s} \varepsilon(s) + K_c \tau_D s \varepsilon(s)$$

Y su función de transferencia será la que se muestra a continuación en la ecuación (4.4.3).

$$G(s) = \frac{C'(s)}{\varepsilon(s)} = K_c \left(1 + \frac{1}{\tau_I s} + \tau_D s \right)$$

(4.4.3)

4.5. Sintonización para controladores PID

4.5.1. Introducción

La determinación de los parámetros de un controlador PID, para una determinada planta resulta ser algo complicado. Lo que se acostumbra es determinar estos parámetros de forma experimental, tanto para plantas conocidas como desconocidas. En este trabajo se utilizará la regla de Ziegler-Nichols de respuesta al escalón.

4.5.2. Regla de Ziegler-Nichols

Ziegler y Nichols propusieron dos métodos para determinar los valores de la ganancia proporcional K_p , del tiempo integral T_i y del tiempo derivativo T_d , en base en las características de respuesta transitoria de una planta específica. En este caso se estudia el método de respuesta al escalón con un sobrepaso máximo de 25% mostrado en la figura 4.5.1

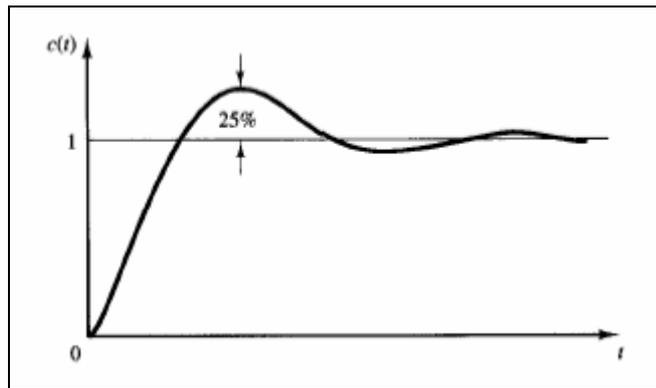


Figura 4.5.1 Curva de respuesta escalón unitario que muestra un sobrepaso máximo de 25%. OGATA. Ingeniería de control moderno. Pg. 671

Si la planta no contiene integradores ni polos complejos conjugados, la curva de respuesta al escalón unitario se presenta en forma de S figura 4.5.2

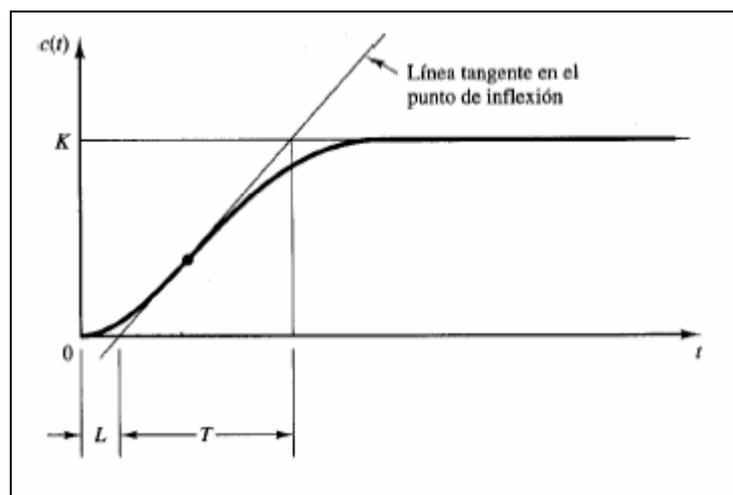


Figura 4.5.2 Curva de respuesta. OGATA. Ingeniería de control moderno. Pg. 671

Estas curvas se obtienen experimentalmente o a partir de una simulación dinámica de la planta.

La curva con forma de S se caracteriza por dos parámetros: el tiempo de retardo L y la constante de tiempo T . El tiempo de retardo y la constante de tiempo se determinan dibujando una recta tangente en el punto de inflexión de la curva con forma de S y determinando las intersecciones de esta tangente con el eje del tiempo y la línea $c(t) = K$, como se aprecia en la figura 4.5.2. En este caso, la

función de transferencia $C(s)/U(s)$ se aproxima mediante un sistema de primer orden con un retardo de transporte del modo siguiente:

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{Ke^{-Ls}}{Ts+1}$$

Ziegler y Nichols sugirieron establecer los valores de K_p , T_i y T_d de acuerdo con la fórmula de la tabla siguiente:

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9\frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2\frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

Tabla 4.5.1 Valores característicos de Ziegler-Nichols

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

$$G_c(s) = 1.2 \frac{T}{L} \left(1 + \frac{1}{2Ls} + 0.5Ls \right)$$

$$G_c(s) = 0.6T \frac{\left(s + \frac{1}{L} \right)^2}{s}$$

Por lo tanto el PID tiene un polo en el origen y un doble cero en $s = -\frac{1}{L}$

4.5.3. Sintonización y simulación con Control Station v3.7

Para obtener y sintonizar los valores de las variables de PID se utiliza el software Control Station. A continuación se describe los pasos a seguir:

1.- Iniciar el programa y elegir "Custom Process" y "Single Loop Process" (Figura 4.5.3.1)

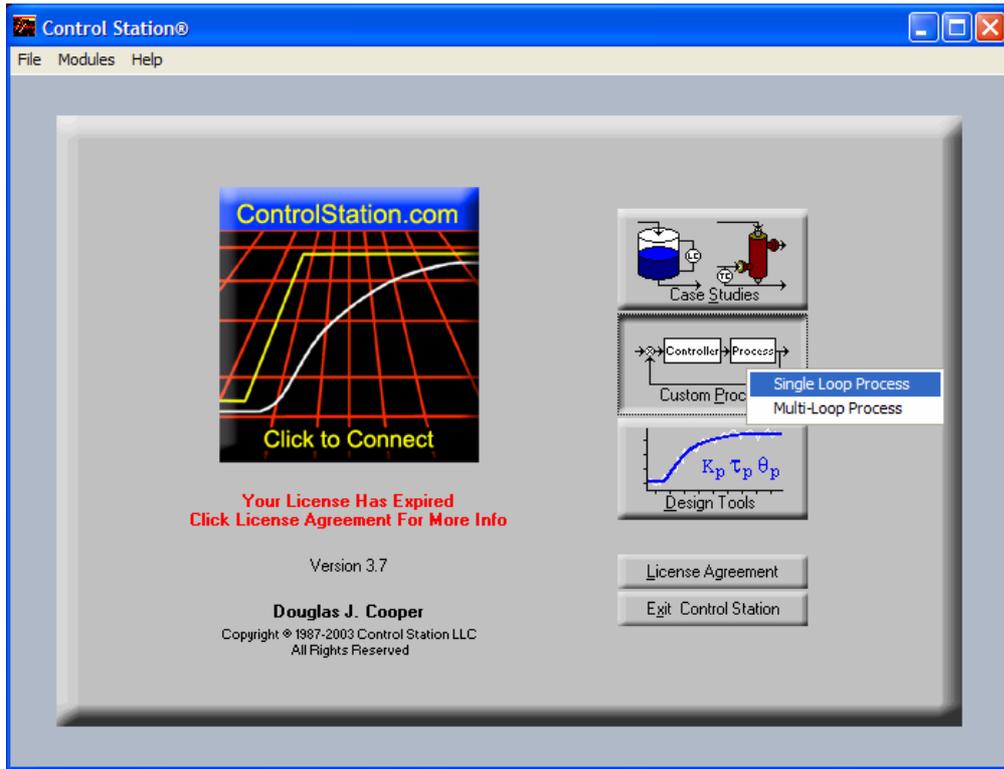


Figura 4.5.3.1 Panel de inicio de “Control Station”

2.- Dar clic en “Process” como se muestra en la figura 4.5.3.2

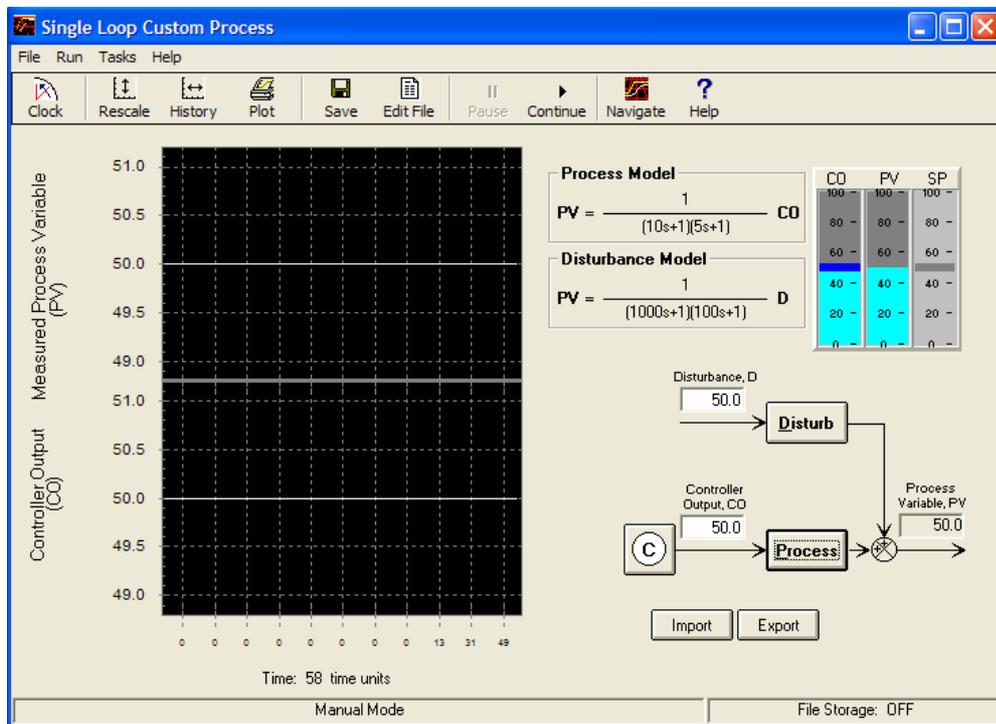


Figura 4.5.3.2 Panel de simulación del sistema.

3.- Cambiar los valores de las constantes τ_{p1} y τ_{p2} como se muestra en la figura 4.5.3.3, con los valores obtenidos de la ecuación 3.2.1 y se obtiene la función de transferencia.

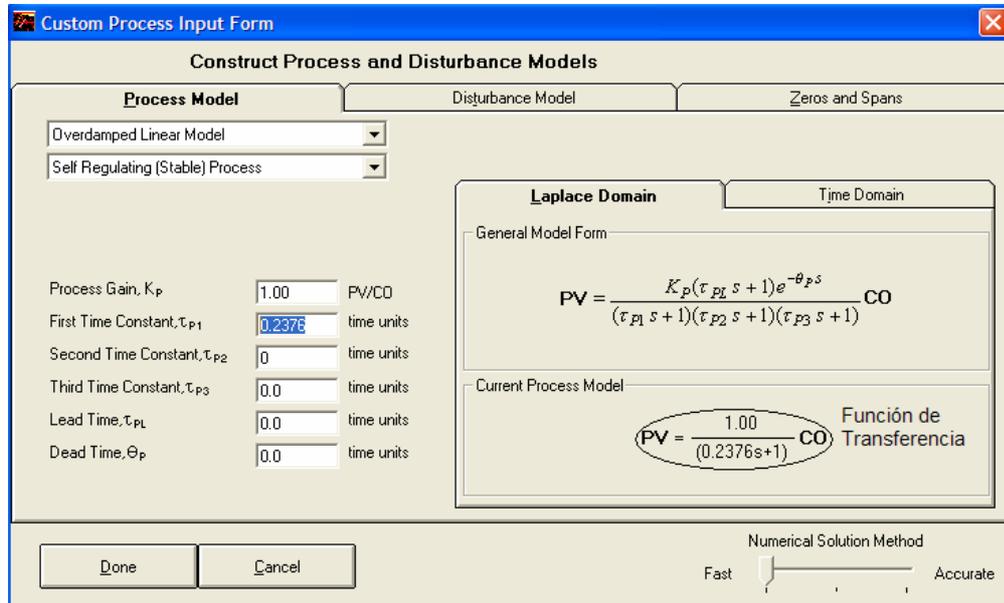


Figura 4.5.3.3 Configurar el modelo del sistema.

4.- A continuación elegir “Disturbance Model” y setear “Kp” a 0, esto quiere decir que no hay un modelo de disturbo en el sistema. Dar clic en “Done” (figura 4.5.3.4)

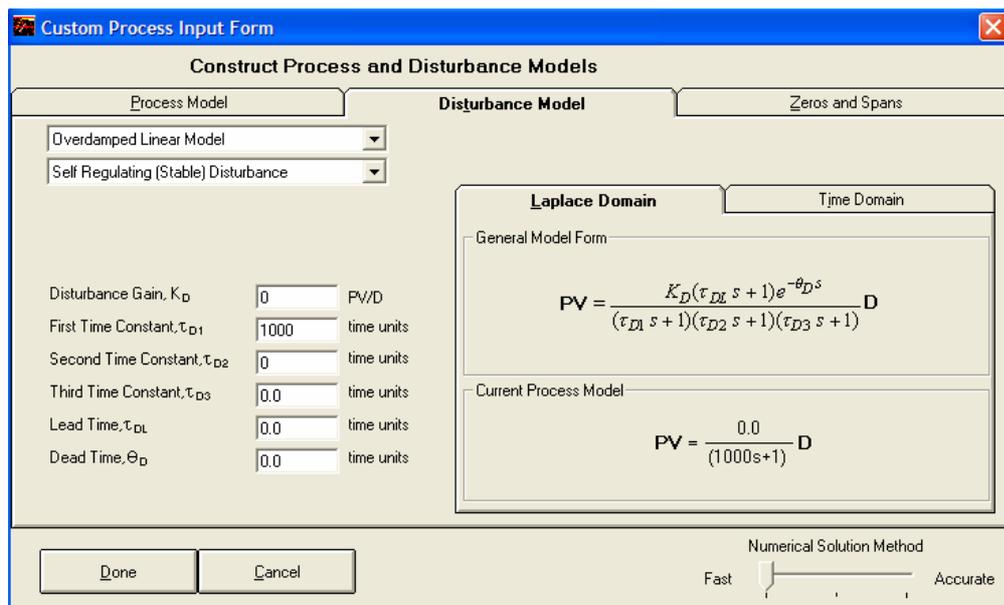


Figura 4.5.3.4 Configurar el modelo del disturbo.

5.- Dar clic en “Save”, colocar un nombre y elegir “Guardar” (figura 4.5.4.5). Se creará un archivo de texto con los datos de las variables.

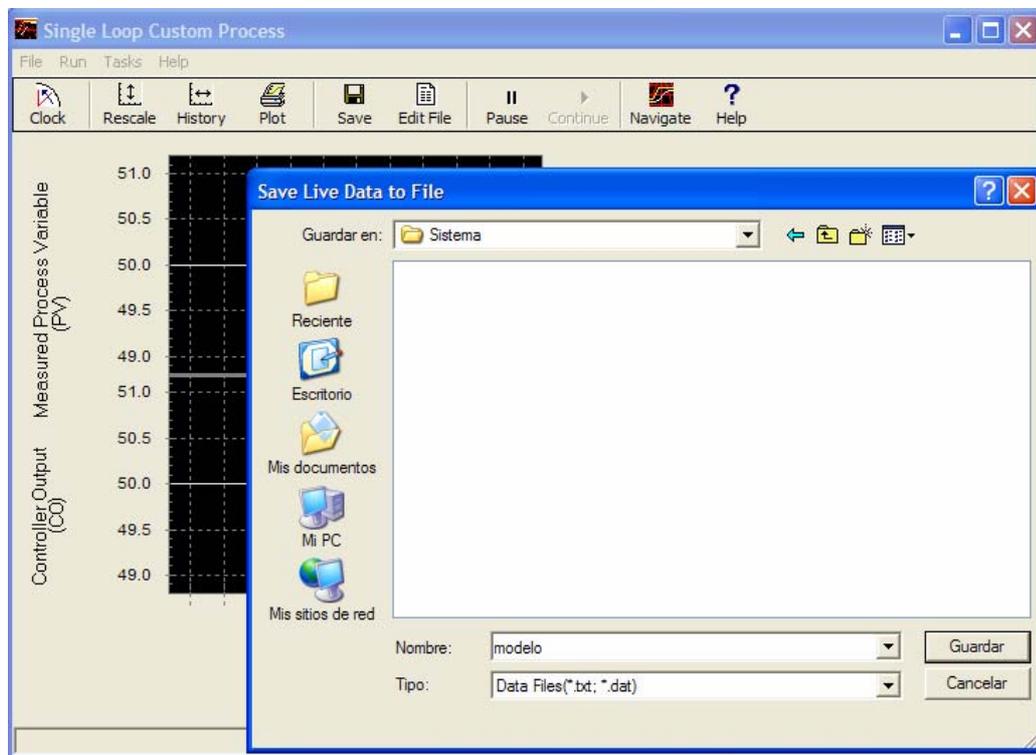


Figura 4.5.3.5 Creación del archivo de texto.

6.- En el espacio de “Controller Output, CO” cambiar el valor de 50 a 60; y dejar que se establezca (ver figura 4.5.3.6). Luego regresar a 50; y dejar que se establezca. Cambiar a 40 y después subir nuevamente a 50 y dar clic en “Save”. Esto sería los escalones para analizar la respuesta.

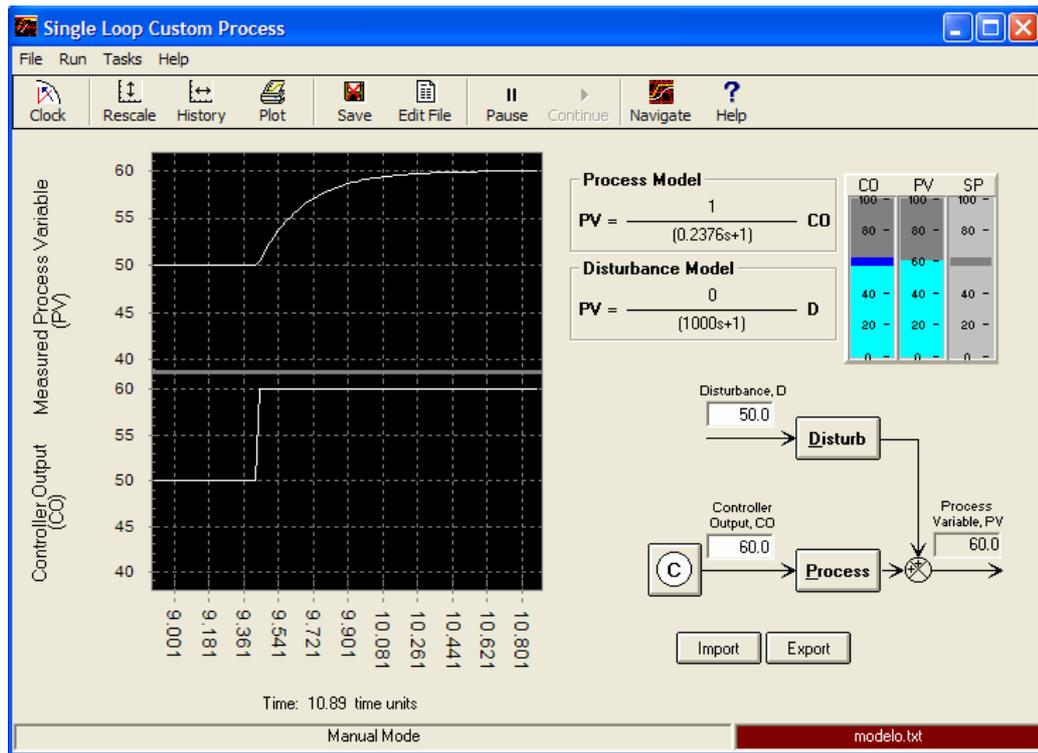


Figura 4.5.3.6 Panel de simulación del sistema.

7.- Elegir “Navigate” y “Design Tools” (figura 4.5.3.7)

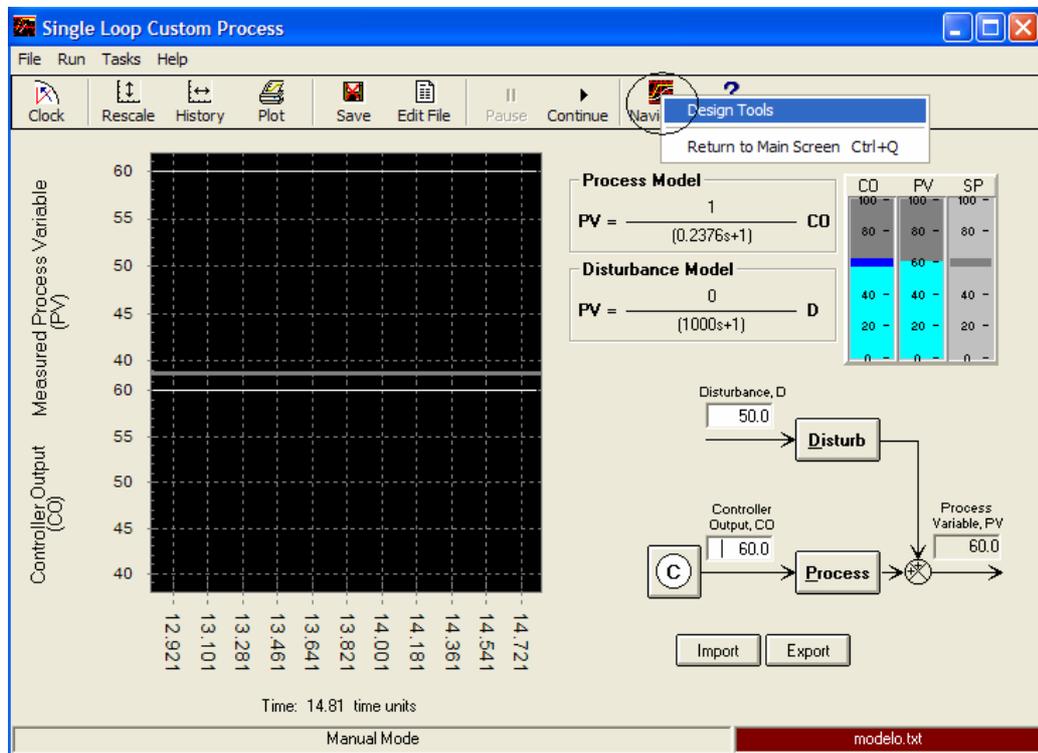


Figura 4.5.3.7 Selección de “Navigate” “Design Tools”

8.- Dar clic en “Open” y abrir el archivo creado (figura 4.5.3.8).

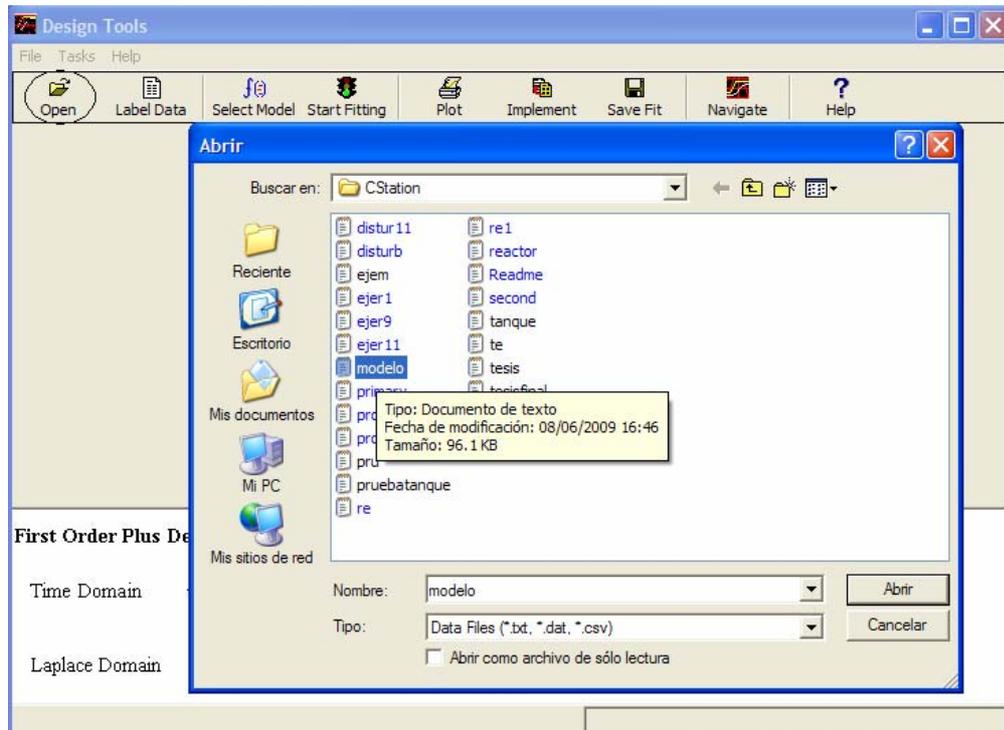


Figura 4.5.3.8 Abrir archivo de texto creado.

9.- Dar clic en “OK” (figura 4.5.3.9)

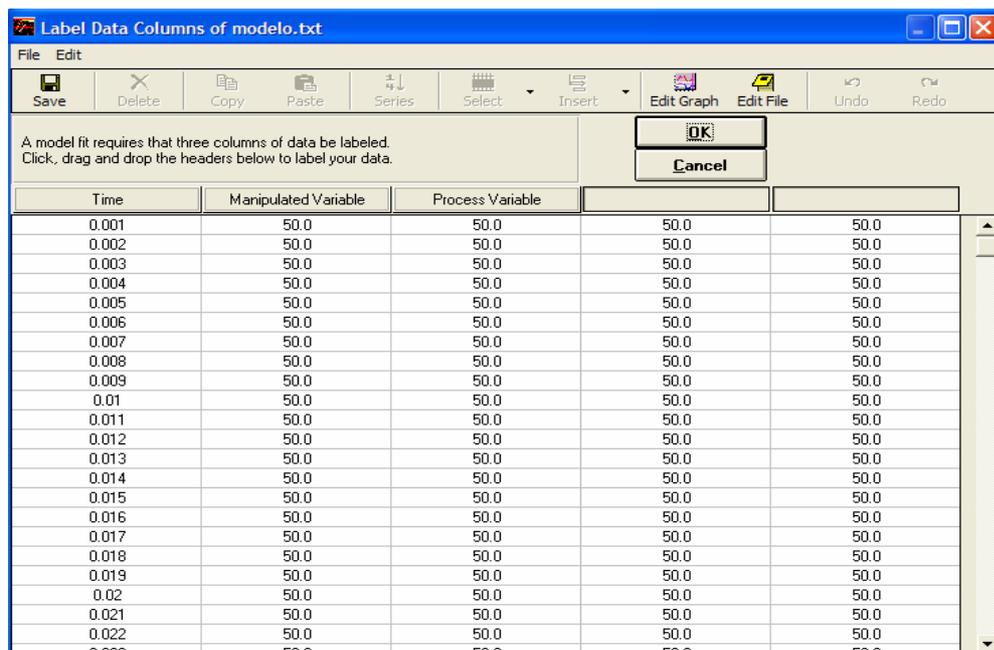


Figura 4.5.3.9 Datos de las variables

10.- Elegimos “Start Fitting” para ajustar los valores de la gráfica y obtener las constantes del controlador (figura 4.5.3.10).

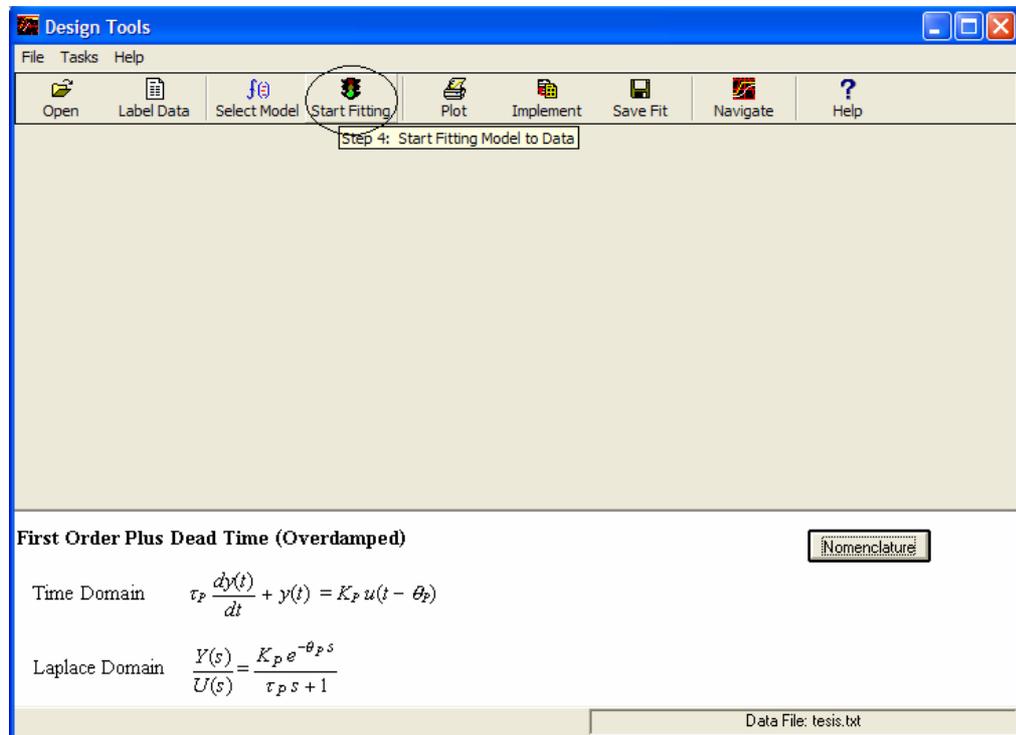


Figura 4.5.3.10 Panel de “Design Tools”.

11.- Se analiza la respuesta con respecto a los cambios del controlador mostrado en la figura 4.5.3.11



Figura 4.5.3.11 Gráfica de respuesta del sistema.

12.- Se cierra esta ventana y se tienen los valores del PID. Para este sistema se escogen los valores de PI ya que es un sistema de primer orden y no se utiliza la constante de derivación (figura 4.5.3.12).

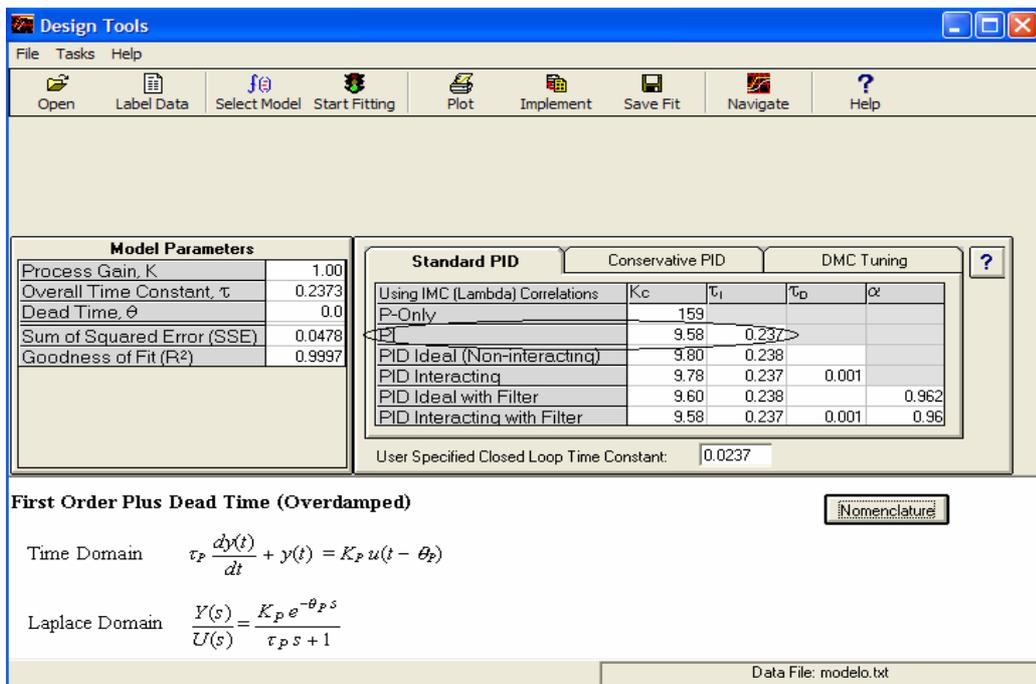


Figura 4.5.3.12 Valores de las constantes del controlador.

De esta manera se encuentran los valores de las constantes para el sistema:

Ganancia del Proceso $K_c = 9.58$

Tiempo de integración $T_i = 0.237$

4.5.4. Simulación con Simulink de Matlab™

Con los valores de las constantes de ganancia y tiempo de integración, obtenidas anteriormente, se procede a construir el diagrama de bloques en simulink y a realizar su respectiva simulación:

1.- Se ejecuta “Simulink” y se crea un nuevo proyecto. Se sacan los bloques necesarios: Función escalón “step”, función de transferencia, ganancias, sumadores, etc. (Figura 4.5.4.1).

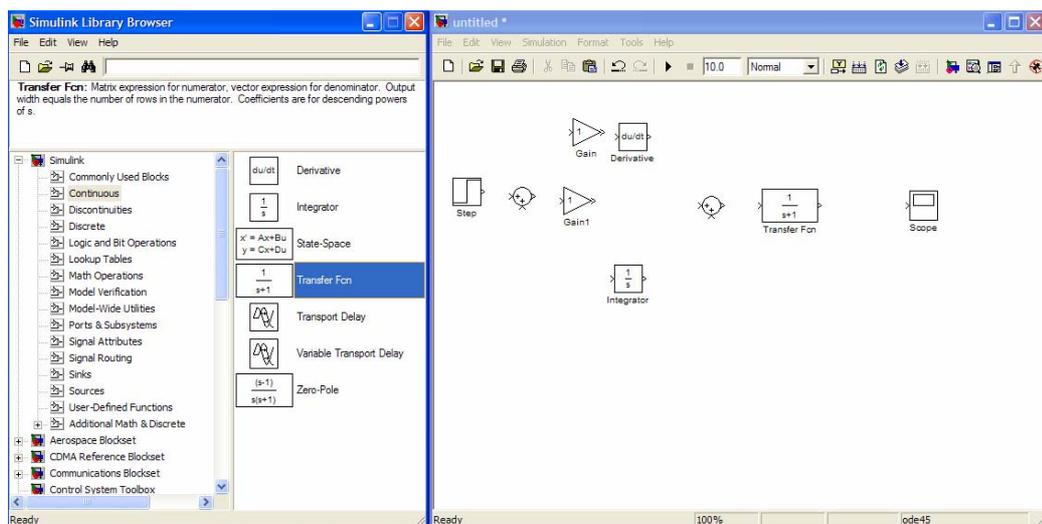


Figura 4.5.4.1 Panel de Simulink y creación de un proyecto.

2.- Se arma el diagrama completo y se colocan los respectivos valores de la función de transferencia, ganancia proporcional y tiempo de integración (figura 4.5.4.2)

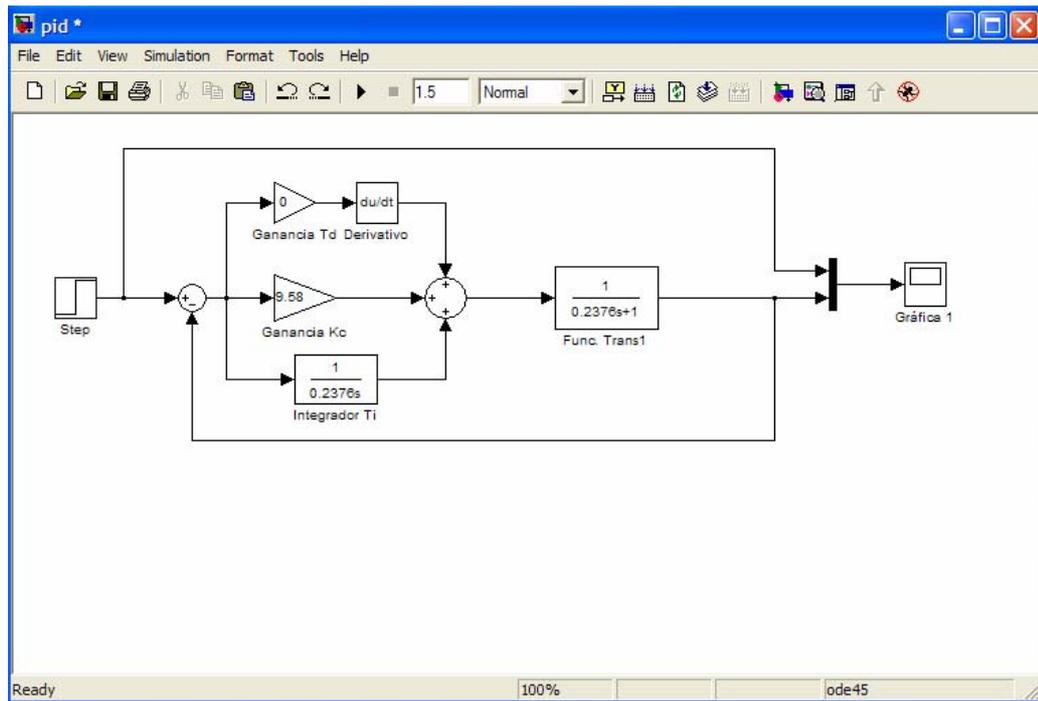


Figura 4.5.4.2 Armado de un sistema de bloques.

El controlador PID es la suma del controlador Proporcional + Integral + Derivativo como se demostró en el subcapítulo 4.2 (figura 4.5.4.3)

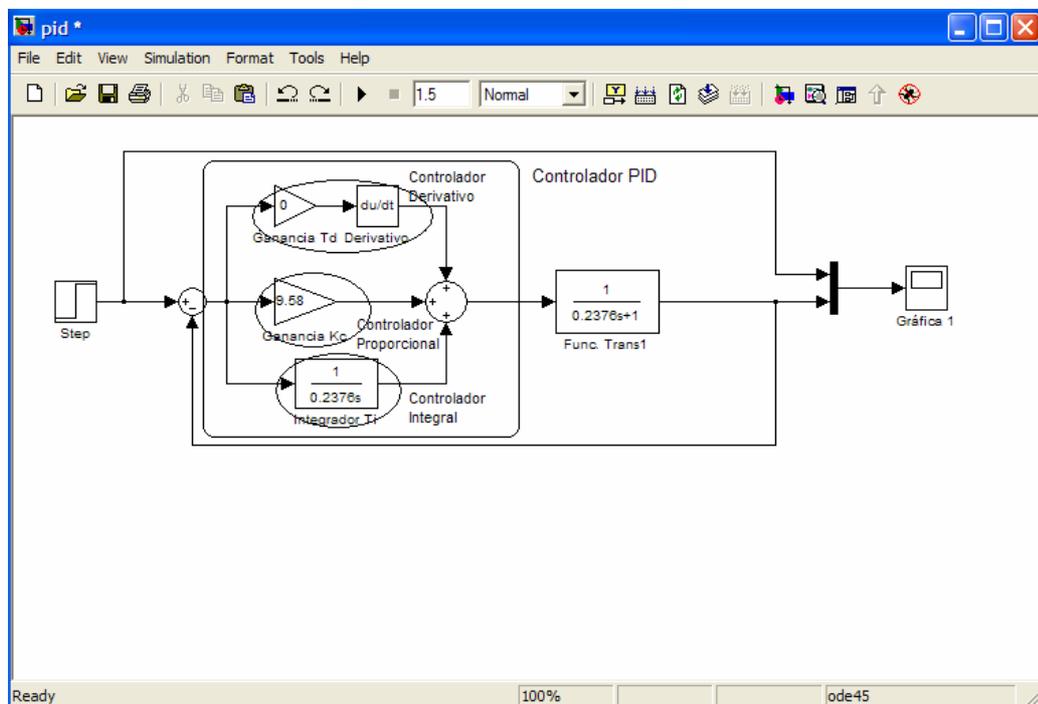


Figura 4.5.4.3 Determinación del controlador PID.

3.- Se inicia la simulación y se obtiene la gráfica resultante (figura 4.5.4.4)

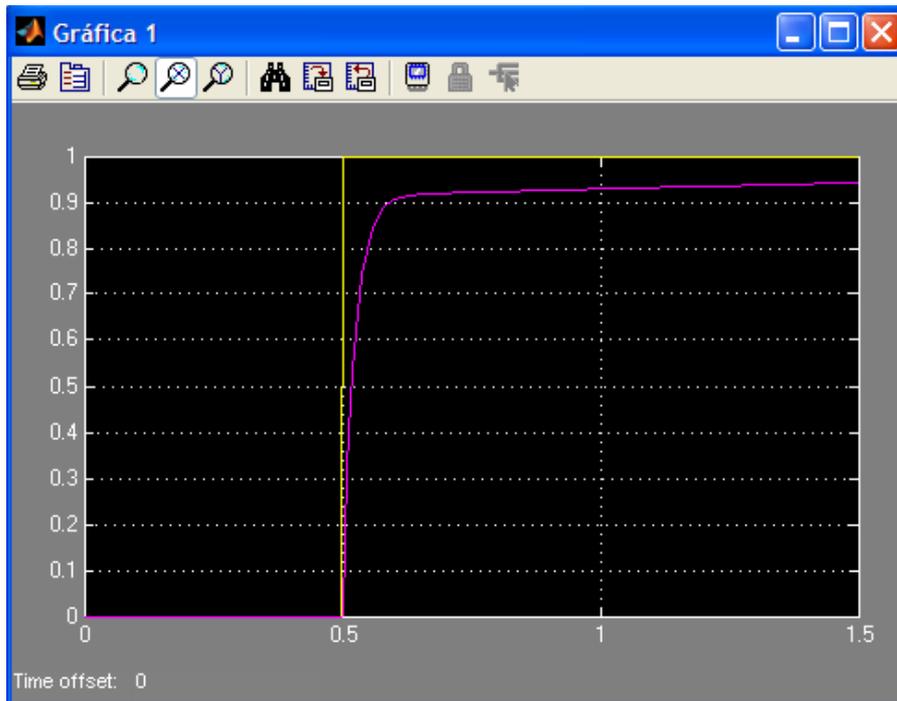


Figura 4.5.4.4 Gráfica resultante de la simulación del sistema.

Como se observa la respuesta es rápida y se estabiliza en 8s (figura 4.5.4.5)

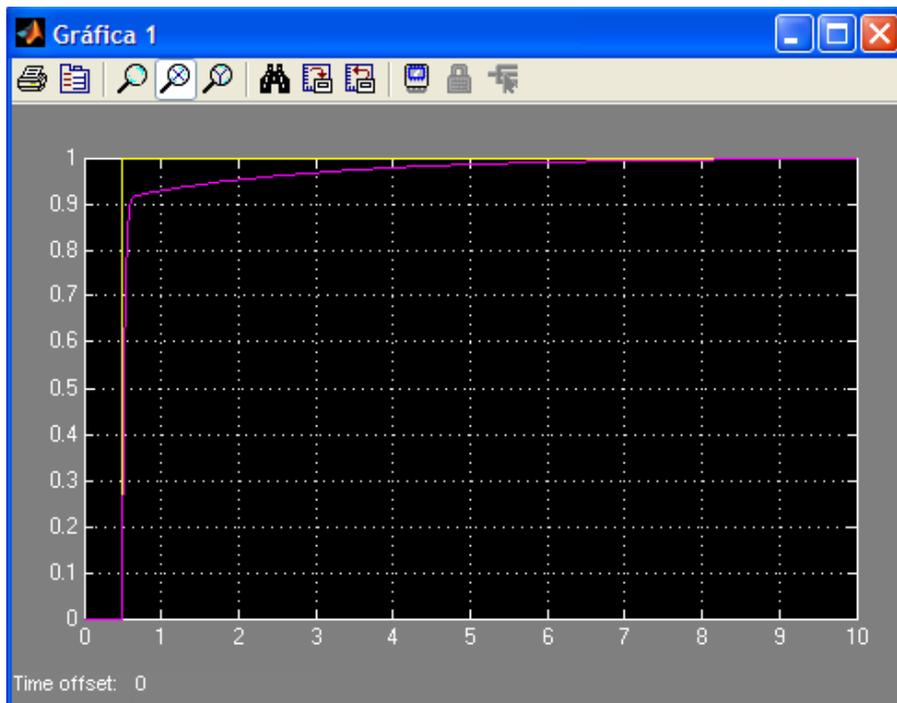


Figura 4.5.4.5. Gráfica del comportamiento del sistema.

Para evitar los bloques de cada controlador, simulink ya tiene un bloque llamado controlador PID y se lo conecta directamente, se da doble clic y se configura los parámetros (figura 4.5.4.6) y se tiene la misma gráfica resultante (ver figura 4.5.4.5)

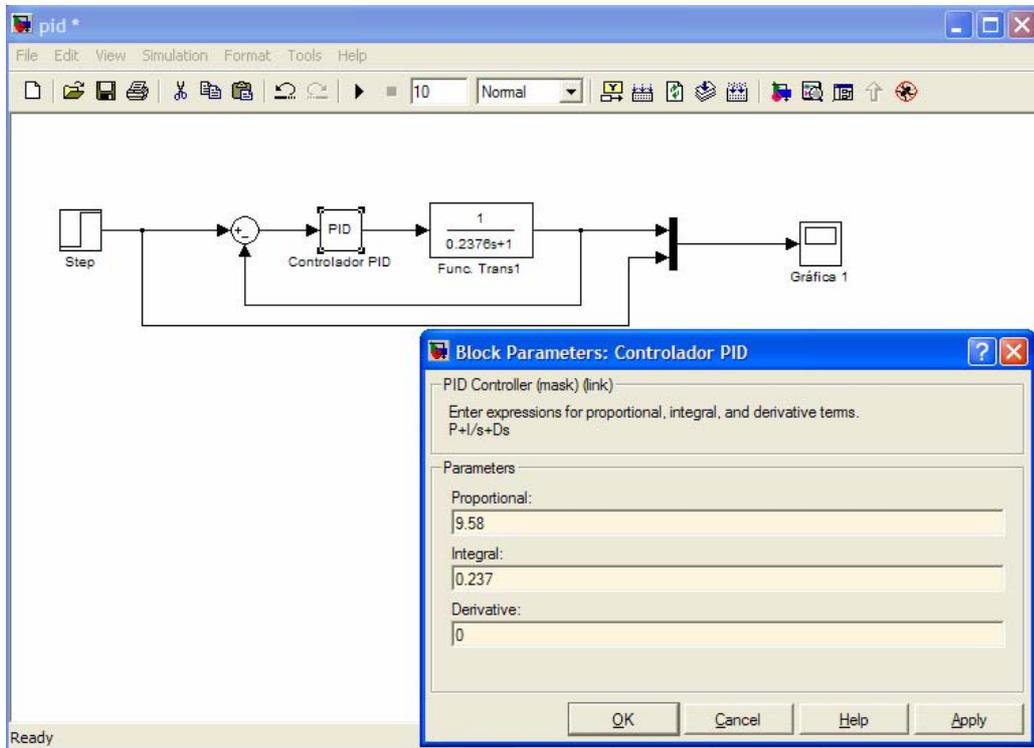


Figura 4.5.4.6 Configuración del bloque PID.

CAPITULO 5

Descripción de equipos

El capítulo 5 describe el funcionamiento y datos técnicos de los equipos e instrumentos que se necesitan para realizar el proyecto.

5.1. PLC S7-200

5.1.1. Introducción al controlador lógico programable (PLC)

Un PLC es un equipo electrónico, programable en lenguaje no informático, diseñado para controlar, en tiempo real y en ambiente de tipo industrial, procesos secuenciales. Este controlador trabaja en base a la información recibida por los captadores y el programa lógico interno, actuando sobre los accionadores de la instalación.

El PLC por sus especiales características de diseño tiene un campo de aplicación muy extenso. La constante evolución del hardware y software amplía constantemente este campo para poder satisfacer las necesidades que se detectan en el espectro de sus posibilidades reales.

Su utilización se da fundamentalmente en aquellas instalaciones en donde es necesario un proceso de maniobra, control, señalización, etc. Por tanto, su aplicación abarca desde procesos de fabricación industriales de cualquier tipo a transformaciones industriales, control de instalaciones, etc.

Sus reducidas dimensiones, la extremada facilidad de su montaje, la posibilidad de almacenar los programas para su posterior y rápida utilización, la modificación o alteración de los mismos, etc., hace que su eficacia se aprecie fundamentalmente en procesos en que se producen necesidades tales como:

- Espacio reducido.
- Procesos de producción periódicamente cambiantes.
- Procesos secuenciales.
- Maquinaria de procesos variables.
- Instalaciones de procesos complejos y amplios.
- Chequeo de programación centralizada de las partes del proceso.

5.1.2. Arquitectura

Los elementos principales que posee un autómata como mínimo son:

5.1.2.1. Unidades de entrada y salida

Dentro de las líneas de entrada y/o salida se puede disponer de dos tipos de módulos mostrados a continuación:

- **Digitales.** Están basados en el principio de todo o nada, es decir o no conducen señal alguna o mantienen un nivel mínimo de tensión. Estas entradas/salidas se manejan a nivel de bit dentro del programa.
- **Analógicas.** Pueden adquirir cualquier valor dentro de un rango determinado especificado por el fabricante. Estas señales se manejan a nivel de byte o palabra de (8/16 bits) dentro del programa.

5.1.2.2. Unidad central de proceso (CPU)

La (CPU) se encarga de procesar el programa que el usuario ha introducido. Esta toma, una a una, las instrucciones programadas por el usuario y las va ejecutando, cuando llega al final de la secuencia de instrucciones programadas, la CPU vuelve al principio y sigue ejecutándolas de manera cíclica. Para ello, dispone de diversas zonas de memoria, registros, e instrucciones de programa. Adicionalmente, en determinados modelos, podemos disponer de funciones ya integradas en la CPU; como reguladores PID, control de posición, etc.

Las funciones principales de la (CPU), dentro del autómata programable, son:

- Ejecutar el programa del Usuario.
- Vigilar que el tiempo de ejecución del programa de usuario no excede un determinado tiempo máximo (tiempo de ciclo máximo). A esta función se le suele denominar "Watchdog" (Perro guardián).

- Crear una imagen de las entradas, ya que el programa del usuario no accede directamente a dichas entradas.
- Renovar el estado de las salidas, en función de la imagen de las mismas, obtenidas al final del ciclo de ejecución del programa de usuario.
- Chequeo del sistema.

5.1.2.3. Memoria

Dentro de la CPU se dispone de un área de memoria, la cual se emplea para diversas funciones:

- **Memoria del programa de usuario:** aquí se introduce el programa que el autómata va a ejecutar cíclicamente.
- **Memoria de la tabla de datos:** se suele subdividir en zonas según el tipo de datos (como marcas de memoria, temporizadores, contadores, etc.)
- **Memoria del sistema:** aquí se encuentra el programa en código de máquina que monitoriza el programa del sistema. Este programa es ejecutado directamente por el microprocesador o el microcontrolador que posea el autómata.
- **Memoria de almacenamiento:** se trata de memoria externa que se emplea para almacenar el programa de usuario, y en ciertos casos parte de la memoria de la tabla de datos. Suele ser de uno de los siguientes tipos: EPROM, EEPROM, o FLASH.

5.1.2.4. Interfaces

Todo autómata, salvo casos excepcionales, posee la virtud de poder comunicarse con otros dispositivos (como un PC). Lo normal es que posea una E/S serie del tipo RS-232 (puerto serie). A través de esta línea se pueden manejar todas las características internas del autómata, incluido la programación del mismo, y suele emplearse para monitorizar el proceso.

5.1.2.5. Unidades de programación

La programación del autómata puede realizarse, generalmente, empleando alguno de los siguientes elementos.

- **Consola de programación:** suele tener la forma de calculadora. Su funcionamiento es específico y de tamaño portátil como se muestra a continuación en la figura 5.1.2.5



Figura 5.1.2.5 Consola de programación portátil

- **PC:** en la actualidad es el modo más empleado. Permite programar desde un ordenador personal y además estándar, de esto obtenemos: herramientas más potentes, posibilidad de almacenamiento de programas, transferencia de datos, monitoreo mediante software “SCADA”, etc.

5.1.2.6. Periféricos

El autómata programable, en la mayoría de los casos, puede ser ampliado. Las ampliaciones abarcan un gran abanico de posibilidades: módulos auxiliares de E/S (analógicas, digitales, etc.), memoria adicional, conexión con otros autómatas, etc. Cada fabricante facilita las posibilidades de ampliación de sus modelos, los cuales pueden variar incluso entre modelos de la misma serie. Por ejemplo, para este proyecto, el módulo EM 235 es un periférico del CPU 224 dado que es un módulo auxiliar de E/S analógico.

5.1.3. Datos técnicos de la CPU 224

Descripción	CPU 224 AC/DC/Relé
tamaño físico	
Dimensiones (l x a x p)	120.5 mm x 80 mm x 62 mm
Peso	410 g

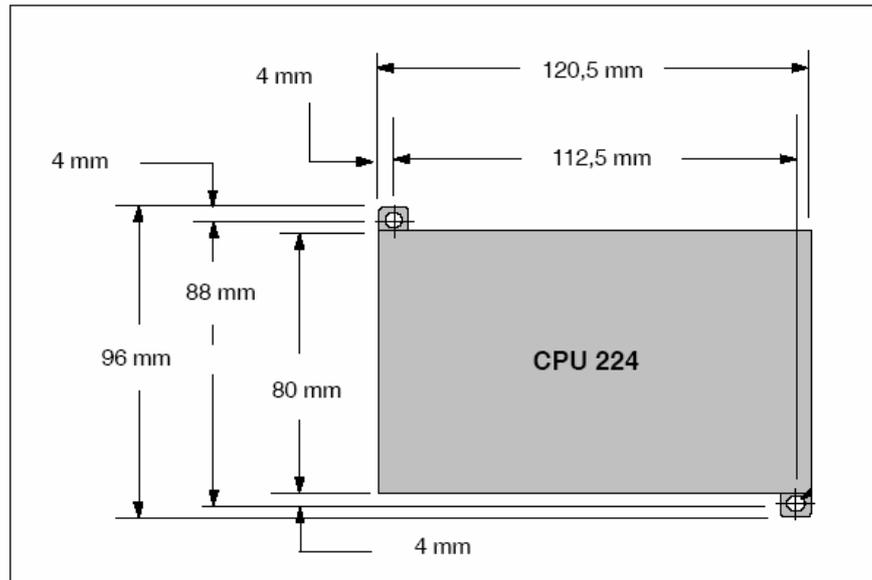


Figura 5.1.3.1 Dimensiones de montaje para una CPU 224. SIEMENS AG, Manual del sistema simatic S7-200. Pg. 2-4

Descripción	CPU 224 AC/DC/Relé
Características de la CPU	
Entradas digitales integradas	14
Salidas digitales integradas	10
Salidas de impulsos	2 a una frecuencia de 20 khz
Potenciómetros Analógicos	2 con resolución de 8 bits
Interrupciones temporizadas	2 con resolución de 1 ms
Capturar impulsos	14 entradas de captura de impulsos
Reloj de tiempo real (Precisión)	2 minutos por mes a 25ª C 7 minutos por mes a 55ª C
Tamaño del programa (Permanente)	4096 palabras
Tamaño del bloque de datos	2560 palabras
Almacenamiento permanente en	112 bits

OFF	
Comunicación integrada	
N de puertos	1 puerto
Puerto eléctrico	RS-485
Alimentación	
Tensión de línea (Margen admisible)	AC 85 a 264 V
Corriente de entrada	30/100 mA a AC 240 V 60/200 mA a AC 120 V

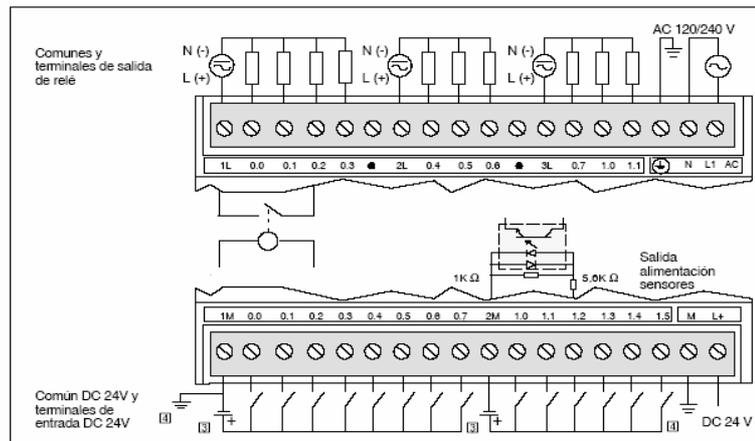


Figura 5.1.3.2 Identificación de terminales de conexión para la CPU 224. SIEMENS AG, Manual del sistema simatic S7-200. Pg. A-20

Descripción	CPU 224 AC/DC/Relé
Características de las entradas	
Número de entradas integradas	14 entradas
Tensión de entrada	
Tensión máx. Continua admisible	DC 30 V
Sobre tensión transitoria	DC 35 V, 0,5 s
Valor nominal	DC 24 V a 4 mA, nominal
Señal 1 lógica (mín.)	mín. DC 15 V a 2,5 mA
Señal 0 lógica (máx.)	Máx. DC 5 V a 1 mA
Número de entradas ON Simultáneamente	
55 ^a C	14
Conexión de sensor de proximidad de 2 hilos	
Corriente de fuga admisible	Máx. 1 mA
Longitud del cable	
No apantallado (no HSC)	300 m

Apantallado	50 m
Entradas HSC, apantallado	50 m
Características de las salidas	
Número de salidas integradas	10 salidas
Tipo de salida	Relé, contacto de baja potencia
Tensión de salida	
Margen admisible	DC 5 a 30 V ó CA 5 a 250 V
Corriente de salida	
Señal 1 lógica	2.00 A
Número de salidas ON máx.	10
Corriente máx. por común/grupo	8ª
Resistencia estado ON (Contactos)	0,2 ohm, máx.
Sobre corriente momentánea	7A (Contactos cerrados)
Protección contra sobrecarga	No

5.2. Módulo Analógico EM 235

5.2.1. Introducción

Dentro de los instrumentos a utilizar para la construcción del proyecto está el módulo analógico EM 235 de Siemens, mostrado en la figura 5.2.1. Este elemento estará encargado de recibir la señal del sensor así como de emitir la señal de control. La forma de conexión y las virtudes del módulo se encuentran descritas en este capítulo.



Figura 5.2.1 Módulo analógico EM 235.

5.2.2. Datos técnicos del EM 235

Descripción	EM 235
Dimensiones	
Ancho	71.2 mm
Alto	80 mm
Profundidad	60 mm
Peso	
Peso, aprox.	186 g
Valores analógicos	
Resolución con rango de rebase (bits incl. signo), máx.	12 corriente de salida para bits 11 bit;
Tiempo básico de conversión, ms	<ms 0,25
Tiempo de estabilización	
Para salida de tensión	100 μ s
Para salida de intensidad	2 ms
Entradas analógicas	
Número	4
Tipos	Tensión / Intensidad
0 a 20 mA	Sí
Tensión de entrada admisible para entrada de tensión (límite de destrucción), máx	30 V
Intensidad de entrada admisible para entrada de corriente (límite de destrucción). máx	32 mA
0mV +100 a	Sí
mV +500 a 0	Sí
V +1 a 0	Sí
V +5 a 0	Sí
V +10 a 0	Sí
V +1 a V -1	Sí
V +10 a V -10	Sí
mV +100 a mV 100	Sí
V +2,5 a V -2,5	Sí
mV +25 a mV -25	Sí
mV +250 a mV -250	Sí
V +5 a V -5	Sí
mV +50 a mV -50	Sí

mV +500 a mV -500	Sí
Salidas analógicas	
Número	1
Rangos de salida (Tensión)	-10 a +10 V
Rangos de salida (Intensidad)	0 a 20 mA

5.2.3. Terminales y tipos de conexión

A continuación se indica la distribución de los terminales así como los tipos de conexión posibles para el modulo EM 235. Como se puede observar en la figura 5.2.3, las entradas al modulo se encuentran definidas con las letras (A, B, C y D). Los tipos de conexión para fuente de tensión, fuente de corriente y entradas libres están descritos para las entradas (A, B y C) respectivamente.

Con respecto a las salidas del módulo, los terminales correspondientes se encuentran definidos como (V0 e I0), representando la señal de tensión y de corriente respectivamente.

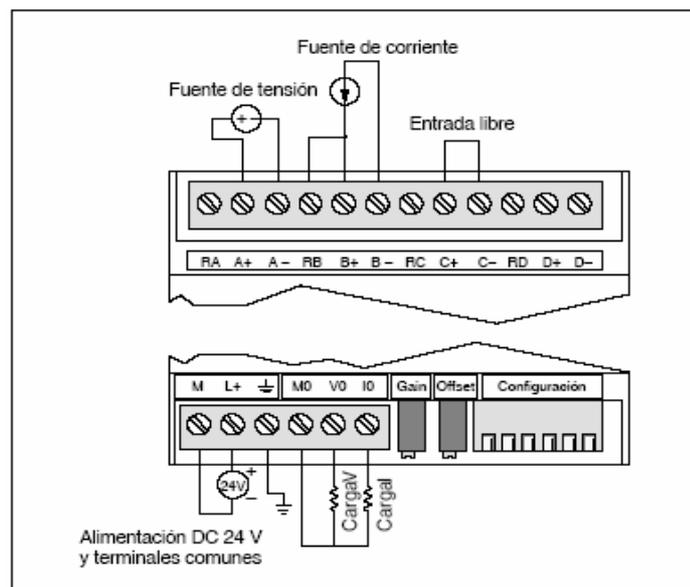


Figura 5.2.3 Terminales y tipos de conexión para en módulo EM 235. SIEMENS AG, Manual del sistema simatic S7-200. Pg. A-41

5.2.4. Formas de configuración de las entradas del módulo EM 235

La tabla 5.2.4 muestra cómo configurar el módulo EM 235 utilizando los interruptores DIP. El margen de las entradas analógicas y la resolución se seleccionan con los interruptores 1 a 6. Todas las entradas se activan en un mismo margen y formato.

Unipolar						Margen de tensión	Resolución
Interruptor 1	Interruptor 2	Interruptor 3	Interruptor 4	Interruptor 5	Interruptor 6		
ON	OFF	OFF	ON	OFF	ON	0 a 50 mV	12,5 μ V
OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	0 a 100 mV	25 μ V
ON	OFF	OFF	OFF	ON	ON	0 a 500 mV	125 μ V
OFF	ON	OFF	OFF	ON	ON	0 a 1 V	250 μ V
ON	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	0 a 5 V	1,25 mV
ON	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	0 a 20 mA	5 μ A
OFF	ON	OFF	OFF	OFF	ON	0 a 10 V	2,5 mV
Bipolar						Margen de tensión	Resolución
Interruptor 1	Interruptor 2	Interruptor 3	Interruptor 4	Interruptor 5	Interruptor 6		
ON	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	\pm 25 mV	12,5 μ V
OFF	ON	OFF	ON	OFF	OFF	\pm 50 mV	25 μ V
OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF	\pm 100 mV	50 μ V
ON	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	\pm 250 mV	125 μ V
OFF	ON	OFF	OFF	ON	OFF	\pm 500 mV	250 μ V
OFF	OFF	ON	OFF	ON	OFF	\pm 1 V	500 μ V
ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	\pm 2,5 V	1,25 mV
OFF	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	\pm 5 V	2,5 mV
OFF	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	\pm 10 V	5 mV

Tabla 5.2.4 Interruptores de configuración del EM 235. SIEMENS AG, Manual del sistema simatic S7-200. Pg. A-43

5.2.5. Formato de la palabra de datos de entrada del módulo EM 235

Como se muestra en la figura 5.2.5, los 12 bits del valor de conversión analógica/digital (ADC) se justifican a la izquierda en el formato de palabra de datos. El MSB (bit más significativo) indica el signo, en tanto que cero indica un valor positivo de la palabra de datos. En formato unipolar, los tres ceros a la derecha modifican el valor de la palabra de datos en incrementos de 8 por cada cambio del valor ADC. En formato bipolar, los cuatro ceros a la derecha modifican el valor de la palabra de datos en incrementos de 16 por cada cambio del valor ADC.

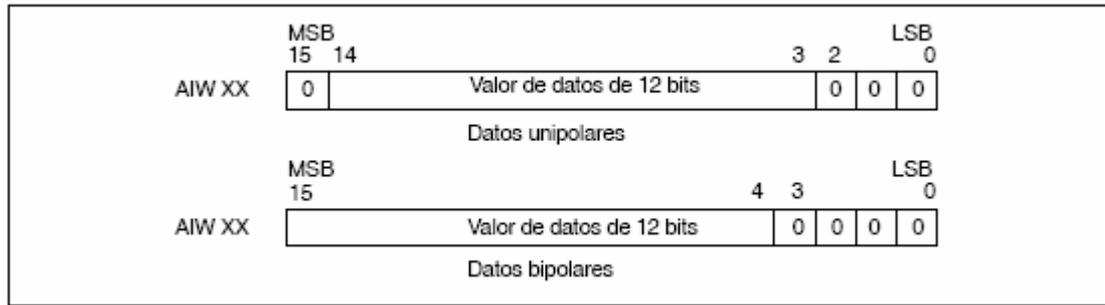


Figura 5.2.5 Formato de la palabra de datos de entrada del módulo EM 235. SIEMENS AG, Manual del sistema simatic S7-200. Pg. A-44

5.2.6. Formato de la palabra de datos de salida del módulo EM 235

Los 12 bits del valor de conversión digital/analógica (DAC) se justifican a la izquierda en el formato de palabra de datos de salida, como lo muestra la figura 5.2.6. El MSB (bit más significativo) indica el signo, en tanto que cero indica un valor positivo de la palabra de datos. Los cuatro ceros a la derecha se truncan antes de cargarse en los registros DAC. Estos bits no tienen efecto alguno en el valor de señal de salida.

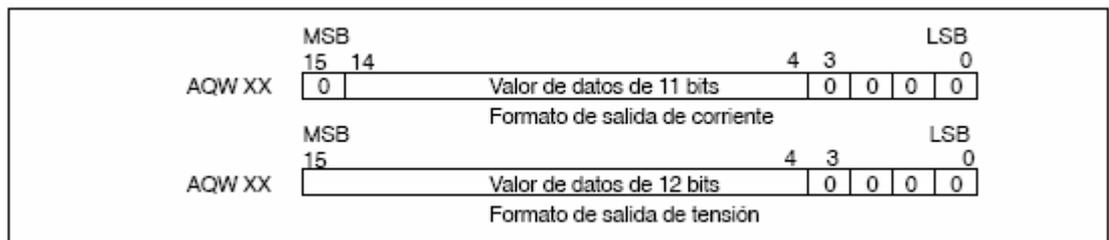


Figura 5.2.6 Formato de la palabra de datos de salida del módulo EM-235. SIEMENS AG, Manual del sistema simatic S7-200. Pg. A-46

5.3. Sensor ultrasónico SICK UM30-13113

La luz y el sonido son dos fenómenos naturales que nos permiten vivir reconociendo el entorno sin contacto físico y a grandes distancias. Al igual que los procesos industriales requieren información segura y fiable. Los sensores ultrasónicos SICK UM30 detectan objetos y miden distancias con gran precisión. Se

utiliza el sensor ultrasónico ya que no tiene problemas con objetos transparentes o coloridos ya que otros sensores se calibran según el color del objeto a medir. De igual manera son muy fiables así trabajen en ambientes hostiles como: altas temperaturas, luz muy fuerte, vapor o ambientes sucios.

5.3.1. Descripción y funcionamiento

El sensor genera una onda ultrasónica por un elemento piezoeléctrico ubicado en la parte frontal del cuerpo del sensor, esta onda de sonido se dispersa a través de la atmósfera de acuerdo con las leyes de la física, la onda rebota en un objeto y el mismo elemento piezoeléctrico detecta y mide el sonido reflejado, de esta manera funciona como transmisor y receptor (transceptor).

El principio de medida del sensor ultrasónico esta basado en que una vez que la onda viaja a través del aire las señales son transmitidas en paquetes definidos con la ayuda de la electrónica en el transceptor, que evalúa el tiempo entre la transmisión de un paquete de sonido y la llegada de la onda reflejada desde el objeto. Como resultado, cualquier señal es proporcional a la distancia y es enviada por una interface analógica como una señal de 4 a 20mA o 0 a 10V. La precisión de la medida y el rango máximo de escaneo depende principalmente del medio y la rugosidad del objeto en cuestión.

5.3.2. Rango de detección

Para determinar el área de detección del sensor, una serie de medidas son llevadas a cabo con dos objetos estandarizados: una varilla redonda delgada y un platillo. El área tridimensional dentro del cual el sensor responde a la varilla tiene la forma de un delgado bastón, esto marca el rango típico de escaneo del sensor.

El sensor responde al platillo dentro del área de un haz más largo. Esta área define el límite del máximo rango de escaneo del sensor.

Cuando se proyecta en un plano bidimensional (figura 5.3.2) los perfiles típicos se crean los diagramas de operación del sensor ultrasónico los cuales son el rango de operación, el rango límite, la forma específica y la zona protegida para que el rango

de detección pueda ser leído. Los objetos más pequeños que la varilla podrían ser detectados solo dentro de un área menor que la del rango de operación.

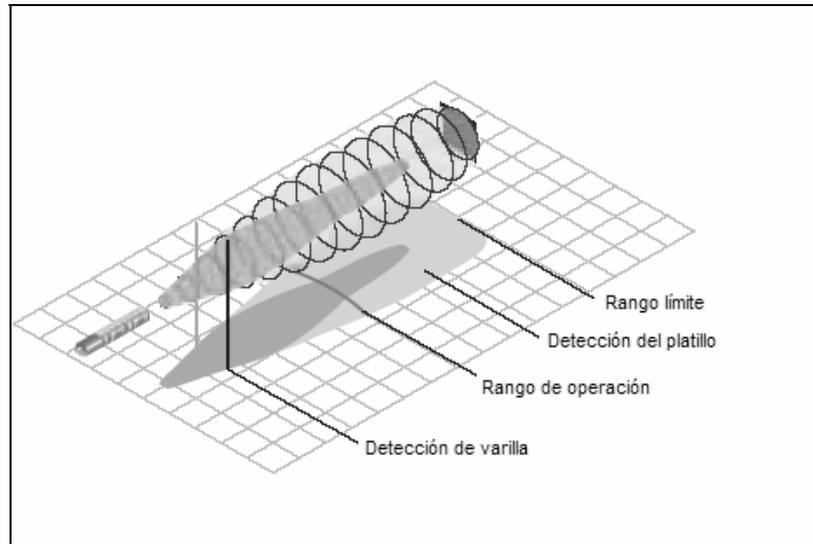


Figura 5.3.2 Diagrama de funcionamiento del sensor. SICK AG, Manual del sensor ultrasónico D18 D30 Pg. 4

5.3.3. Datos técnicos

Rango de operación (límite)	200...1300mm (2000mm)
Frecuencia	200Khz
Resolución	0.36mm
Repetitividad	± 0.15% del valor final
Exactitud	≤ 2% del valor final
Voltaje de alimentación	12...30V DC
Ripple	± 10%
Consumo de corriente	≤ 70mA
Salida analógica	QA 4...20mA / 0...10V
Tiempo de respuesta	110ms
Tiempo de retardo	2s
Tipo de conexión	Plug M12, 5-pin (figura 4.7.3)
Temperatura de operación	-20... +70°C
Peso	260g
Material	Níquel – Latón chapado

La figura 5.3.3.1 muestra el rango de detección del sensor ultrasónico.

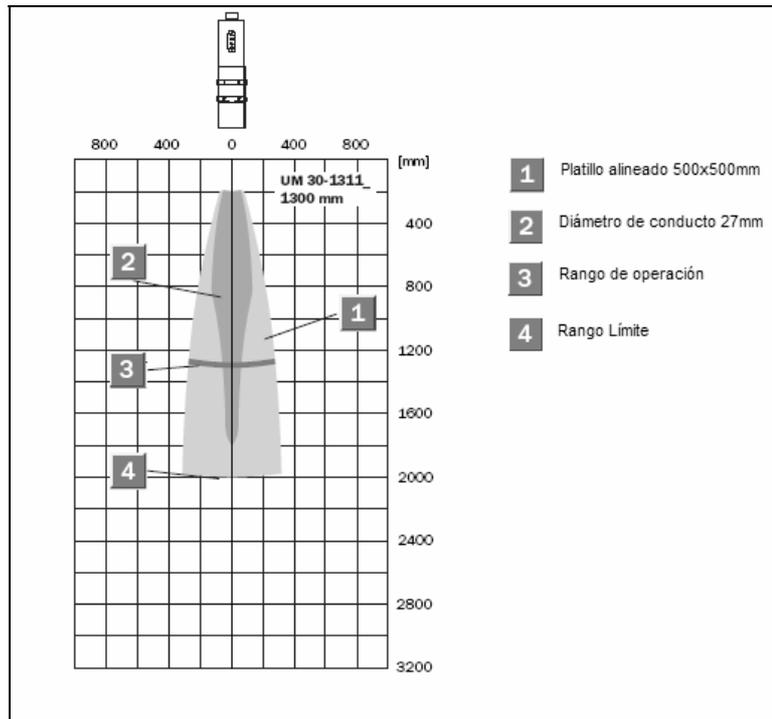


Figura 5.3.3.1 Rango de detección del sensor. SICK, Manual del sensor ultrasónico Pg. 9

En la figura 5.3.3.2 se muestra los terminales del conector con la siguiente descripción:

L: Alimentación

NC: Sin conexión

M: Tierra

QA: Señal de Salida (0-10V—4-20mA)

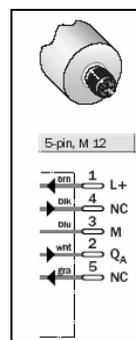


Figura 5.3.3.2 Conector M12. SICK AG, Manual del sensor ultrasónico D18 D30 Pg. 8

CAPITULO 6

Programación y configuración de los elementos de control

Hasta el momento se ha estudiado el modelado y realizado el controlador PID del sistema de nivel de líquido. En este capítulo se procede a programar y configurar los elementos para poner en práctica la teoría.

6.1. Descripción del funcionamiento

El sistema consta de un tanque para mantener un nivel de agua constante. Para ello se utiliza una bomba de velocidad variable para añadir agua al tanque con un caudal apto para mantener un nivel adecuado de agua y evitar así que se vacíe.

La consigna (“Setpoint”) de este sistema es el nivel de agua; el cual se colocará según la necesidad del usuario. La variable del proceso la suministra el sensor ultrasónico que señala el nivel de llenado del tanque; equivale a 0 % cuando está vacío y a 100 % cuando está completamente lleno. La salida es una señal de 0 a 10V que permite controlar la velocidad de la bomba, del 0 al 100 % de su velocidad máxima.

La consigna está predeterminada y se introduce directamente en la tabla del lazo. El sensor suministra la variable del proceso que es un valor analógico unipolar. La salida del lazo se escribe en una salida analógica unipolar que se utiliza para controlar la velocidad de la bomba. El alcance tanto de la entrada como de la salida analógica es de 32000.

La ganancia del lazo y las constantes de tiempo se han determinado en el subcapítulo 4.5 y se ajustan para obtener una regulación óptima. Los valores calculados de las constantes de tiempo se indican a continuación:

K_c es 9.58

T_s es 0,1 s

T_i es 0.237 s

La velocidad de la bomba se controlará de forma manual hasta que el tanque se llene al valor deseado, seguidamente se abre la válvula para sacar agua del mismo. Simultáneamente se conmuta la bomba de modo manual a automático. La entrada digital se utiliza para conmutar de manual a automático. Esta entrada se describe seguidamente:

I0.0 es control manual/automático; 0 = manual, 1 = automático

En modo manual, el operador ajusta la velocidad de la bomba en VD108 mediante un valor real de 0.0 a 1.0.

6.2. Algoritmo

La figura 6.2.1 muestra el algoritmo para la programación PID del PLC.

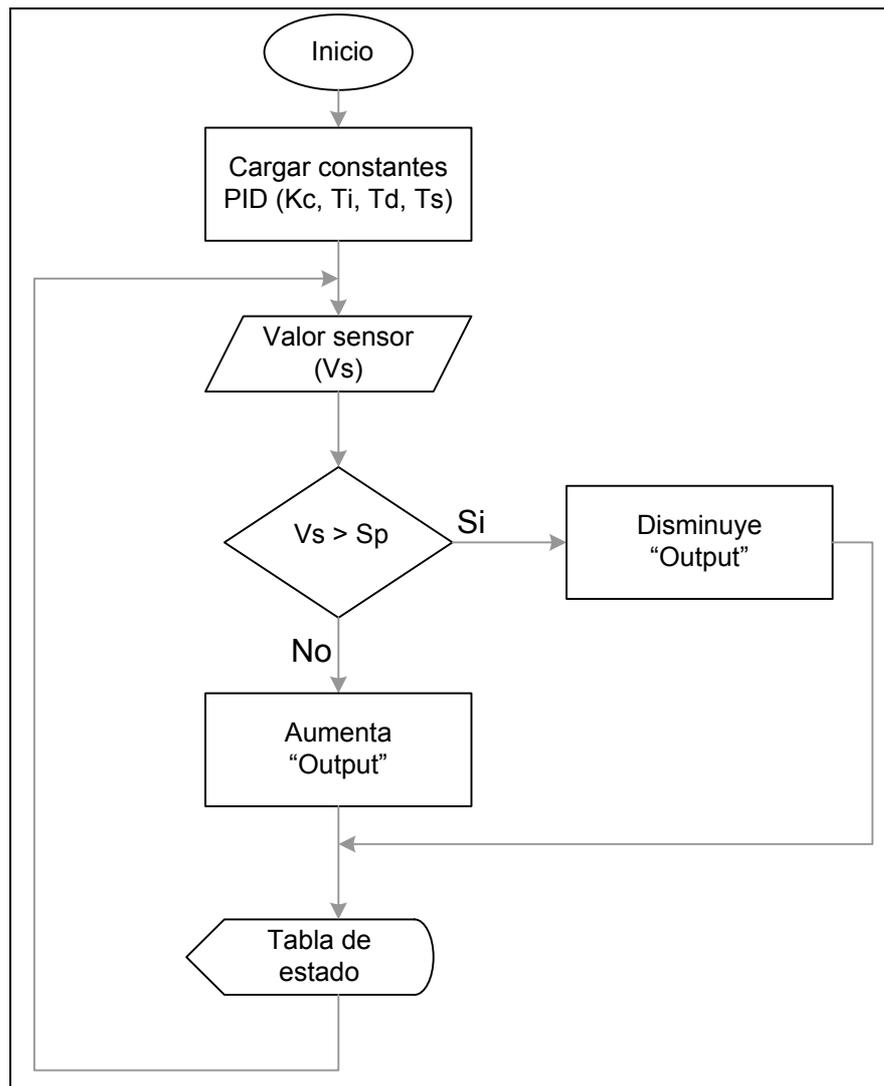
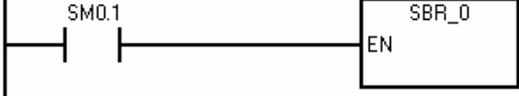


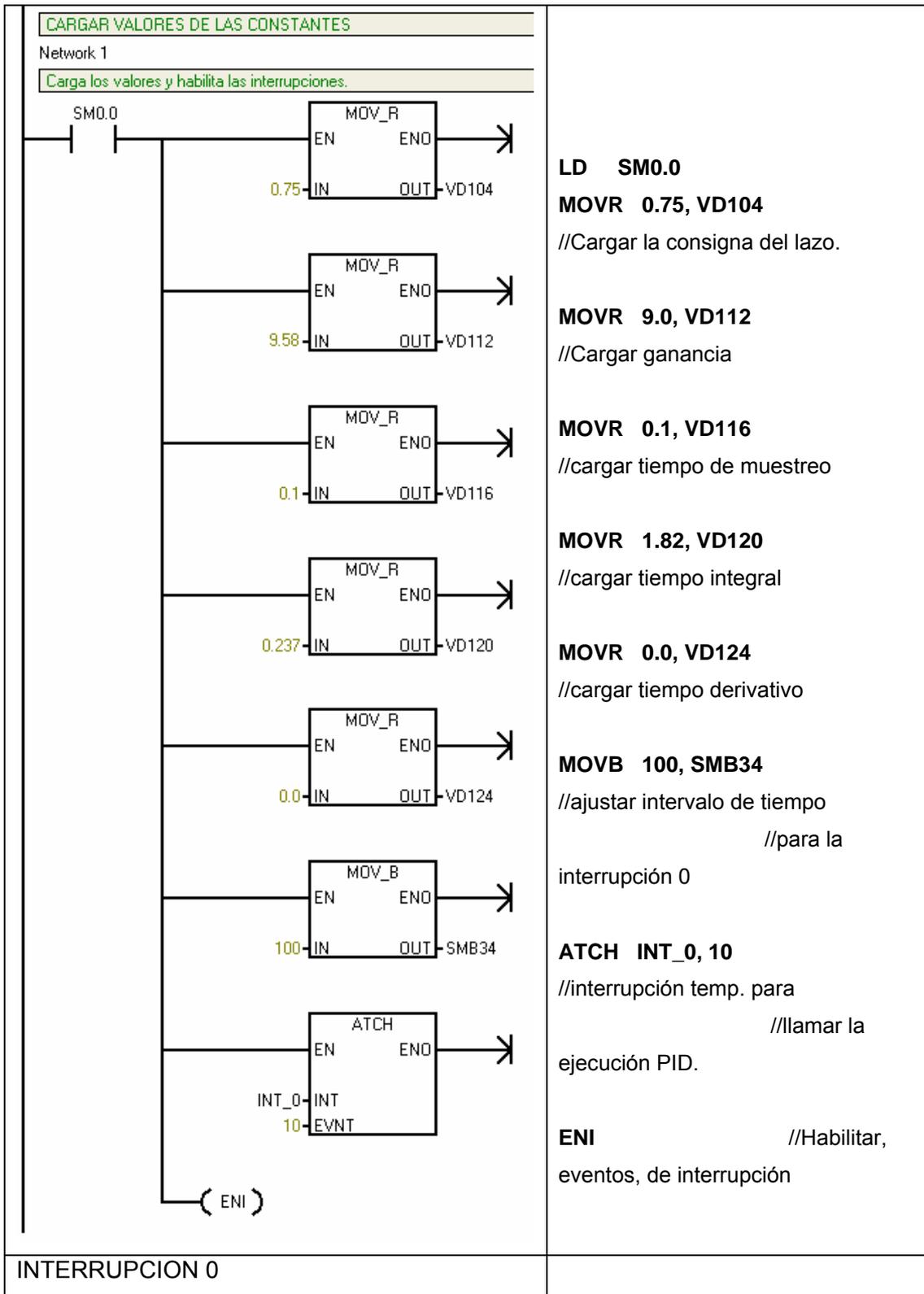
Figura 6.2.1 Algoritmo del sistema PID

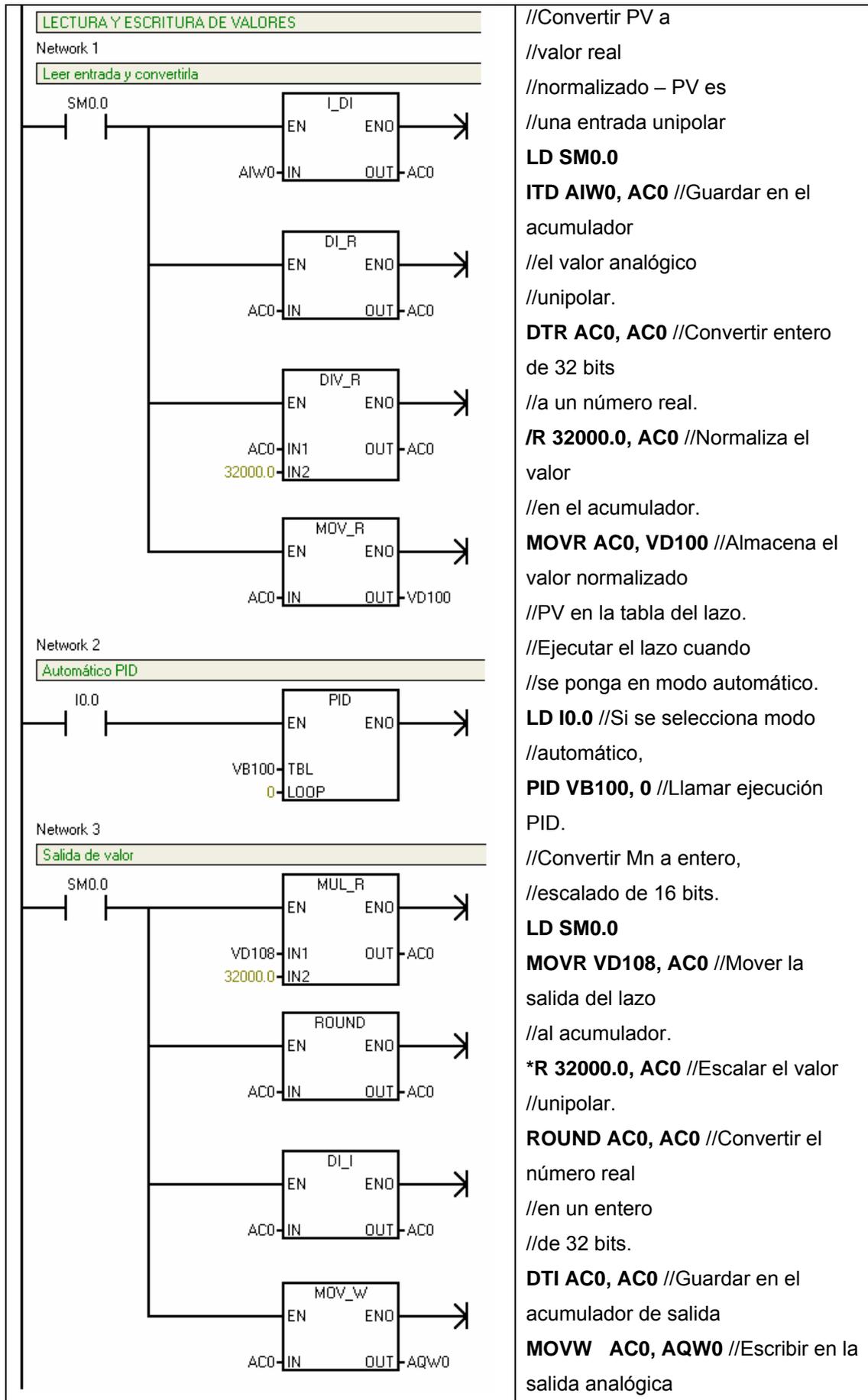
6.3. Programación del PLC con Step 7 Microwin

La programación del PLC y su control PID se puede realizar de dos formas: programación paso a paso y utilizando el asistente PID.

1. Programación paso a paso.

Lenguaje KOP	Lenguaje AWL
PROGRAMA PRINCIPAL	
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p style="margin: 0;">CONTROL PID</p> <p style="margin: 0;">Network 1</p> <p style="margin: 0; color: green;">En el primer ciclo de programa llamar a la rutina de inicialización</p>  </div>	<pre style="margin: 0;">LD SM0.1 //En el primer ciclo CALL SBR_0 //llamar a la rutina //de inicialización</pre>
SUBROUTINA	





2. Programación utilizando el asistente PID

Esta forma de programación es más sencilla, ya que la subrutina y la interrupción se crean con ciertos pasos. A continuación se explica paso a paso la utilización del asistente:

- En el menú Herramientas, elegir la opción “Asistente de operaciones”.
- Dentro de los programas que permite generar el asistente, elegir “PID” y pulsar “Siguiente”.
- Aparecerá una ventana en la que se pregunta por el lazo PID a configurar (el autómata puede manejar varios lazos PID simultáneamente). Elegir el lazo 0 y pulsar “Siguiente”.
- En la siguiente ventana (ver figura 6.3.1) se pedirán diversos datos para la configuración del controlador:
 - Límites inferior y superior de la consigna del lazo. Indican los valores máximo y mínimo que se podrán utilizar para introducir referencias de posición. Elegir como valores máximo y mínimo 0.0 y 1.0. 0 Tanque vacío y 1 Tanque lleno.
 - Parámetros de lazo.
 - Tiempo de muestreo: tomar 0.1 segundos.
 - Ganancia: se refiere a la constante proporcional (P) del regulador
 $K_c = 9.58$
 - Tiempo de acción integral: se refiere a la constante integral (I) del regulador. $T_i = 0.237$
 - Tiempo de acción derivada: se refiere a la constante diferencial (D) del regulador. Elegir un valor 0.0 para indicar que no se desea efecto diferencial.

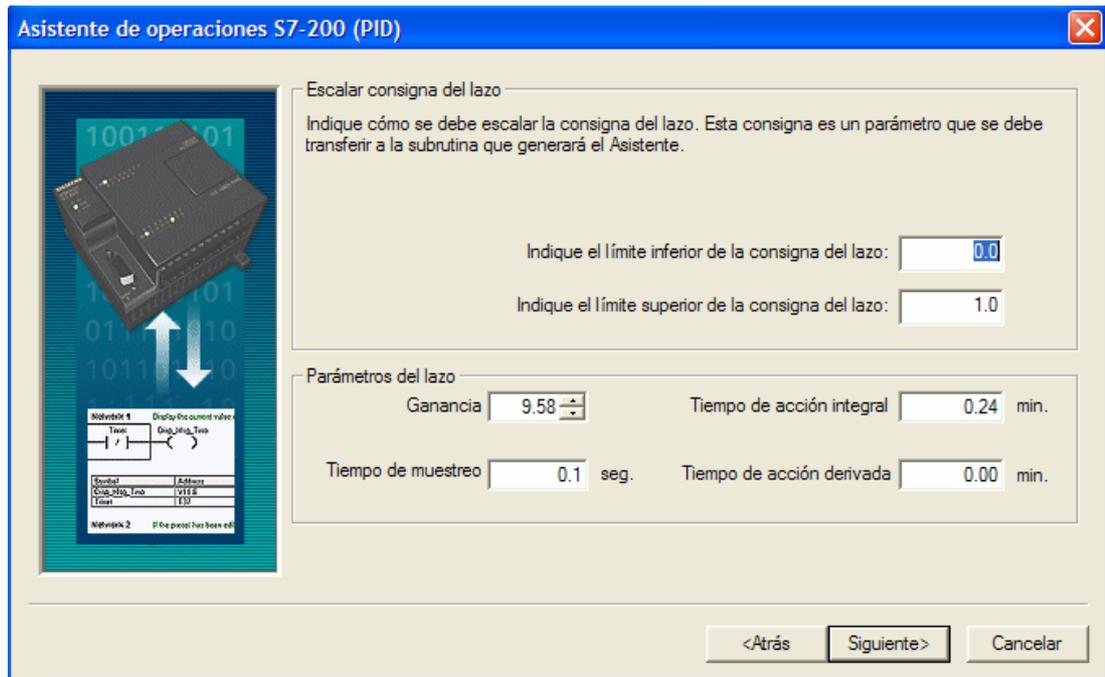


Figura 6.3.1 Configuración de parámetros de lazo.

Una vez indicados todos los parámetros de esta ventana, pulsar “Siguiente”.

- Aparecerá otra ventana (figura 6.3.2) en la que se pedirán datos sobre las entradas/salidas del autómatas que se utilizarán para el control y su configuración:
 - Opciones de la entrada del lazo (señal de entrada: sensor)
 - Escala: unipolar (de 0 a +10V).
 - Límites superior e inferior por defecto.
 - Opciones de la salida del lazo (señal de salida: tensión para la bomba)
 - Tipo de salida: analógica (en el caso de un control todo/nada se elegiría salida digital).
 - Escala: unipolar (de 0 a +10V).

-Límites superior e inferior por defecto.

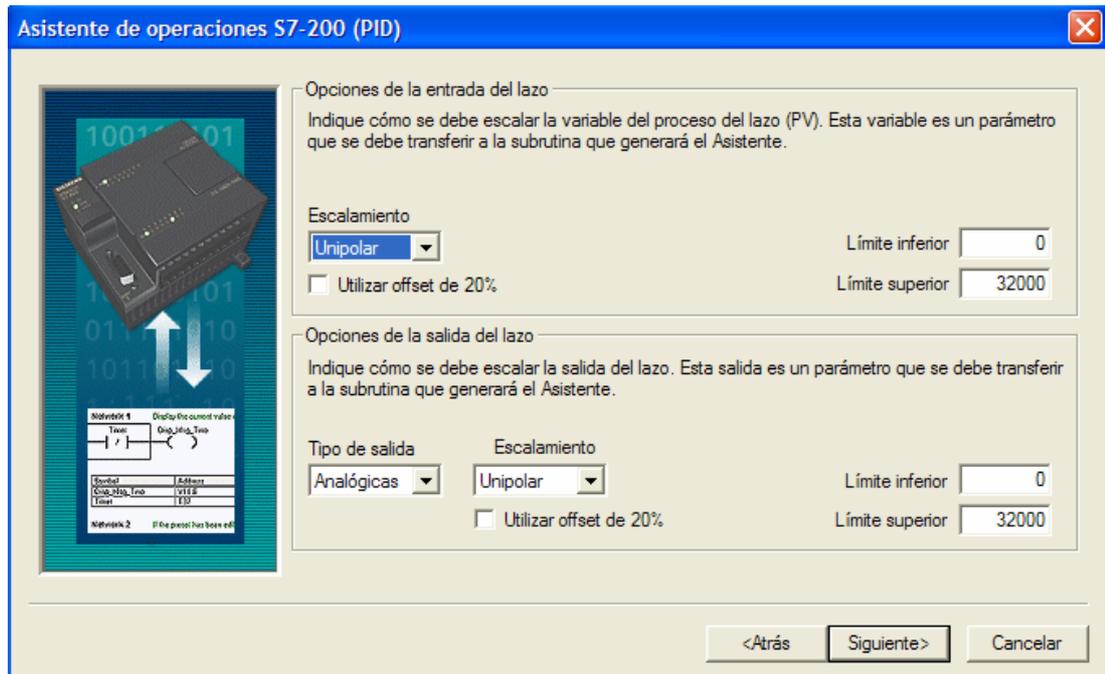


Figura 6.3.2 Configuración de entrada y salida.

Una vez indicados todos los parámetros de esta ventana, pulsar “Siguiete”.

- En la siguiente ventana se posibilita la habilitación de alarmas. Dado que no se desea utilizar ninguna alarma, se dejarán las casillas desactivadas y se pulsará “Siguiete”.
- Aparecerá una ventana (figura 6.3.3) en la que se solicitan dos datos: el primero de ellos se refiere al área de memoria que utilizará el programa para realizar cálculos. Dejaremos el valor por defecto que aparece en el asistente: VB0. El segundo dato solicitado es la activación del control manual del PID. Si no se marca la casilla, el control PID comenzará a ejecutarse automáticamente al arrancar el autómeta. Si se marca, será necesario activar una de las entradas del autómeta para que el bucle PID comience a ejecutarse. Para este caso, no se marcará la casilla.

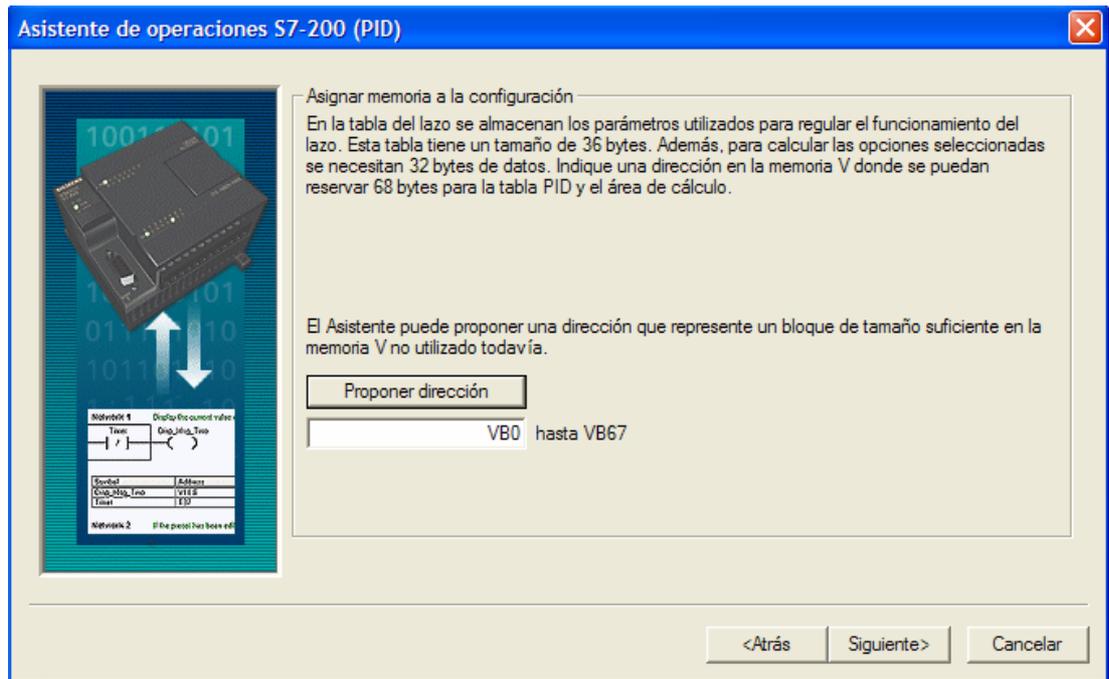


Figura 6.3.3 Configuración de memoria.

En la siguiente ventana (figura 6.3.4) se solicitan nombres tanto para la rutina de inicialización del PID como para la rutina de interrupción del PID. Es indiferente el nombre que se les asigne (por ejemplo, 'inicia' e 'interr', pero es necesario recordar el nombre elegido porque será utilizado más adelante.

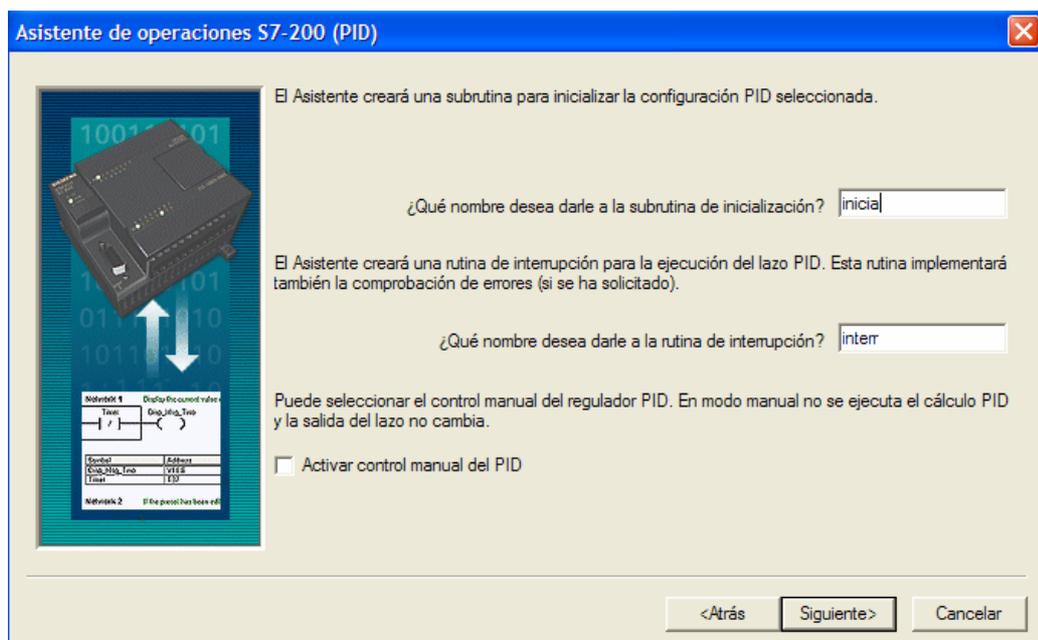


Figura 6.3.4 Configuración de subrutinas.

- La última ventana nos confirma los nombres de las rutinas que se crearán y nos recuerda que debemos incluir una línea en el programa principal que llame a la rutina de inicialización en cada ciclo (utilizando la marca especial SM0.0). Al pulsar “Cerrar” se generarán automáticamente las rutinas.

Una vez finalizada la ejecución del asistente, es necesario generar manualmente el código pedido: la llamada a la subrutina de inicialización del controlador PID. Esta llamada la haremos utilizando la marca especial SM0.0 (activa siempre) de modo que sea sencillo modificar los parámetros del regulador durante el funcionamiento. El código a generar consta sólo de una línea, y se muestra en la figura 6.3.5:

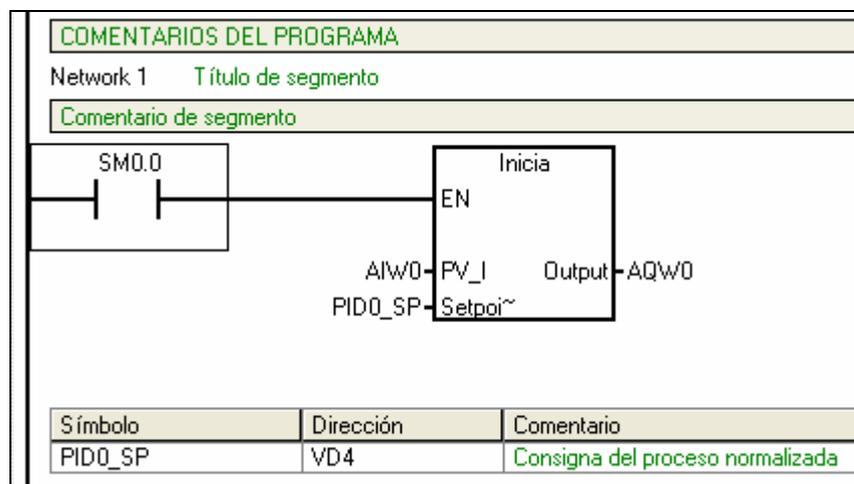


Figura 6.3.5 Código de programa principal.

El programa llama a la subrutina ‘inicia’ en cada ciclo de programa. Los parámetros se fijarán en estos valores:

-**PV_I**: se refiere a la entrada analógica del autómeta que se utilizará para leer los datos del proceso (en este caso, nivel del tanque). Se elegirá la entrada AIW0.

-**Output**: se refiere a la salida analógica del autómeta que se utilizará para enviar órdenes o acciones de control al proceso (en este caso tensiones a aplicar a la bomba). Se elegirá la salida AQW0.

-**Setpoint**: se refiere a la posición de memoria donde se indicarán las referencias para la bomba. Se indicará la posición de memoria VD4, y automáticamente

aparecerá el nombre que el asistente ha dado a esa posición de memoria: PID0_SP.

Con el objetivo de poder modificar los parámetros del regulador PID durante la ejecución y de forma cómoda, se creará una tabla de estado.

La tabla de estado se visualiza desde la opción 'Tabla de estado' del menú 'Ver', submenú 'Componente'. Se deben introducir las siguientes direcciones, una en cada fila: VD4, VD8, VD12, VD16, VD20, VD24. El programa cambiará automáticamente estos nombres para indicar los nombres simbólicos de tales variables. También será necesario cambiar el tipo de dato a 'coma flotante', para poder visualizar correctamente sus valores. La figura 6.3.6 muestra el aspecto que debe tomar la tabla de estado:

	Dirección	Formato	Valor actual	Nuevo valor
1	PID0_SP	Coma flotante		
2	PID0_Output	Coma flotante		
3	PID0_Gain	Coma flotante		
4	PID0_SampleTime	Coma flotante		
5	PID0_I_Time	Coma flotante		
6	PID0_D_Time	Coma flotante		
7		Con signo		

Figura 6.3.6 Tabla de estado del PID.

Los datos que se muestran son:

- PID0_SP: referencia.
- PID0_Output: acción de control.
- PID0_Gain: valor del efecto proporcional del controlador.
- PID0_SampleTime: periodo de muestreo.
- PID0_I_Time: valor del efecto integral del controlador (tiempo integral).
- PID0_D_Time: valor del efecto diferencial del controlador (tiempo diferencial).

Los valores de los parámetros no se mostrarán hasta que no se haya transferido el programa al autómatas y se haya pulsado el botón 'Estado de tabla' indicado en la figura 6.3.7:

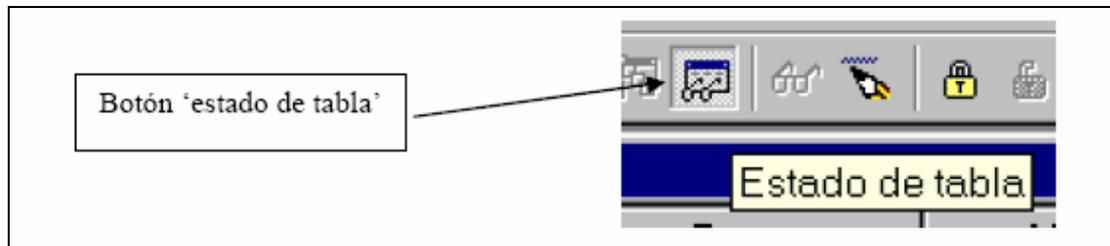


Figura 6.3.7 Botón de estado de tabla.

Para modificar los parámetros (por ejemplo, cambiar la referencia o cambiar los valores proporcional, integral y diferencial del algoritmo PID) es necesario escribir el valor deseado en la casilla 'nuevo valor' y pulsar el botón 'escribir todo' tal y como se muestra en la figura 6.3.8:

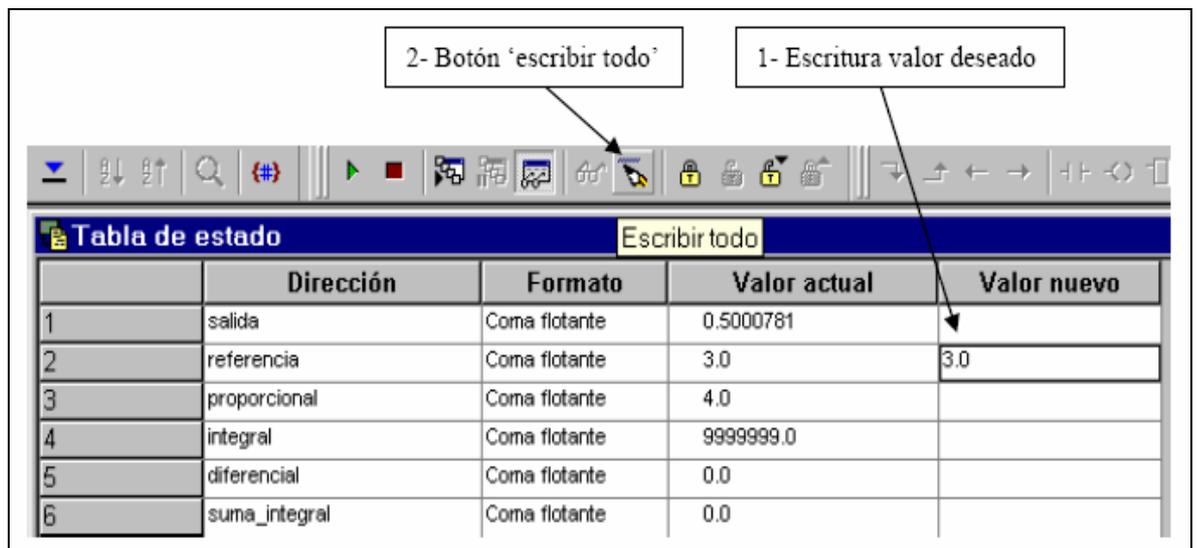


Figura 6.3.8 Lectura y escritura de valores.

6.4. Configuración del módulo analógico EM 235

Dentro de la configuración del módulo analógico existen tres temas principales: el primero es el tipo de entrada al módulo, segundo el rango de la señal de entrada al módulo y por ultimo el tipo de salida del mismo.

Para el primer tema, referido al tipo de entrada al módulo, la característica la da el sensor. Para el proyecto se establece una entrada de tensión de 0 a 10 V y se utiliza la entrada A del módulo. Las tres entradas sobrantes se configuran según lo visto en el capítulo 5.2 subcapítulo 5.2.3. Esta configuración se muestra en la figura 6.4.1 a continuación.

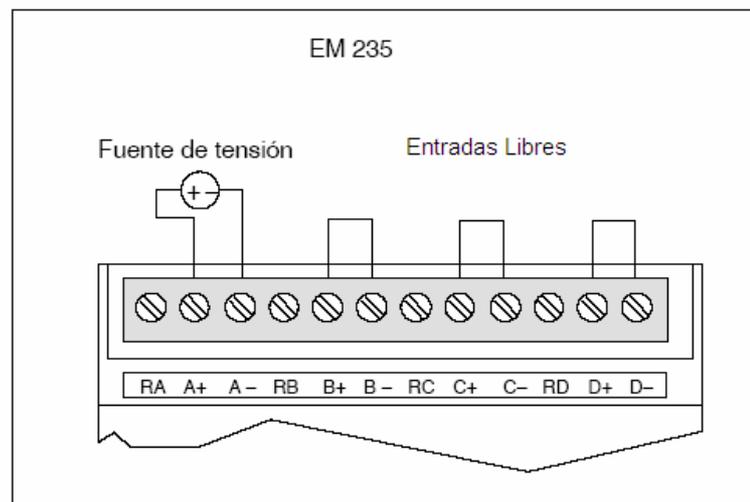


Figura 6.4.1 Configuración para una entrada (fuente de tensión). SIEMENS AG, Manual del sistema simatic S7-200 Pg. A-41

Para la segunda parte de la configuración, referida al rango de entrada de la señal, el módulo EM 235 posee un "DIP" para elegir el rango, como se indicó en el capítulo 5.2 subcapítulo 5.2.4. Para la fuente de tensión, de 0 a 10 V, la configuración es la mostrada a continuación en la figura 6.4.2.



Unipolar						Margen de tensión	Resolución
Interruptor 1	Interruptor 2	Interruptor 3	Interruptor 4	Interruptor 5	Interruptor 6		
ON	OFF	OFF	ON	OFF	ON	0 a 50 mV	12,5 μ V
OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	0 a 100 mV	25 μ V
ON	OFF	OFF	OFF	ON	ON	0 a 500 mV	125 μ V
OFF	ON	OFF	OFF	ON	ON	0 a 1 V	250 μ V
ON	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	0 a 5 V	1,25 mV
ON	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	0 a 20 mA	5 μ A
OFF	ON	OFF	OFF	OFF	ON	0 a 10 V	2,5 mV

Figura 6.4.2 Configuración del “DIP” Para una entrada de 0 a 10 V

Para la última parte de la configuración del módulo, la figura 6.4.3 muestra los terminales conectados para la salida de tensión.

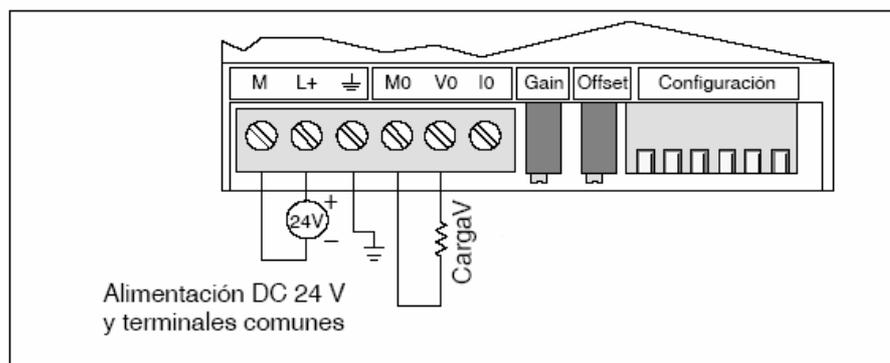


Figura 6.4.3 Salida de tensión del módulo. SIEMENS AG, Manual del sistema simatic S7-200 Pg. A-41

6.5. Configuración del sensor ultrasónico

La configuración del sensor ultrasónico es un proceso muy sencillo, este depende básicamente de dos pulsantes (P1 y P2) integrados al sensor; así como de dos indicadores lumínicos (D1 y D2). La figura 6.5.1 muestra estos elementos de configuración del sensor ultrasónico.

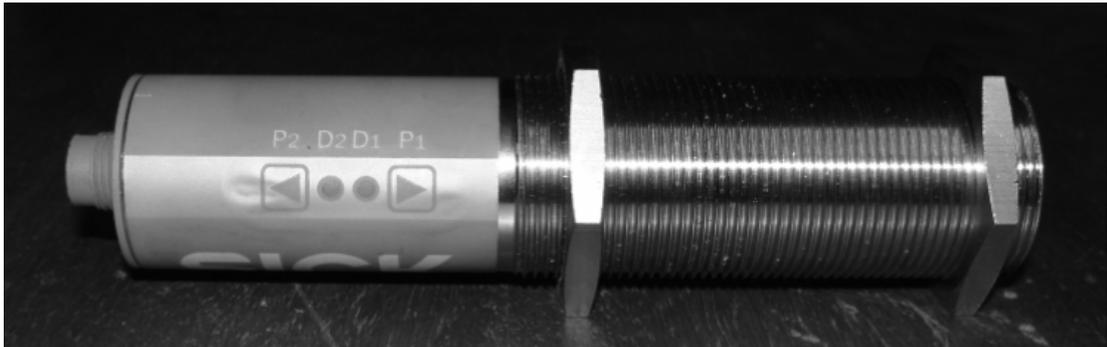


Figura 6.5.1 Elementos de configuración integrados al sensor ultrasónico

Después de conectar el sensor con las especificaciones mostradas en el capítulo 5 y realizar el montaje del sensor dentro del sistema de control, como se verá en el capítulo 7, el sensor entra en un estado llamado de normal funcionamiento. Para configurar el rango analógico del sistema se mantienen pulsados simultáneamente P1 y P2 durante 3 segundos; provocando en los indicadores un pulso amarillo. Después de esto el sistema entra en un estado de selección, en el cual con un pulso corto de P1 ó P2 se puede acceder al modo de enseñanza del punto máximo ó del punto mínimo respectivamente. Si escogemos P1, D1 dará un pulso amarillo, por el otro lado D2 hará lo mismo para P2. En cualquiera de estas dos posibilidades se enseña al sensor, el punto máximo o mínimo, pulsando brevemente P1 y P2. En este mismo estado de enseñanza se puede presionar únicamente P1 para incrementar el punto máximo o P2 para decrementar el mismo. Todo esta configuración esta representada por el modelo mostrado en la figura 6.5.2

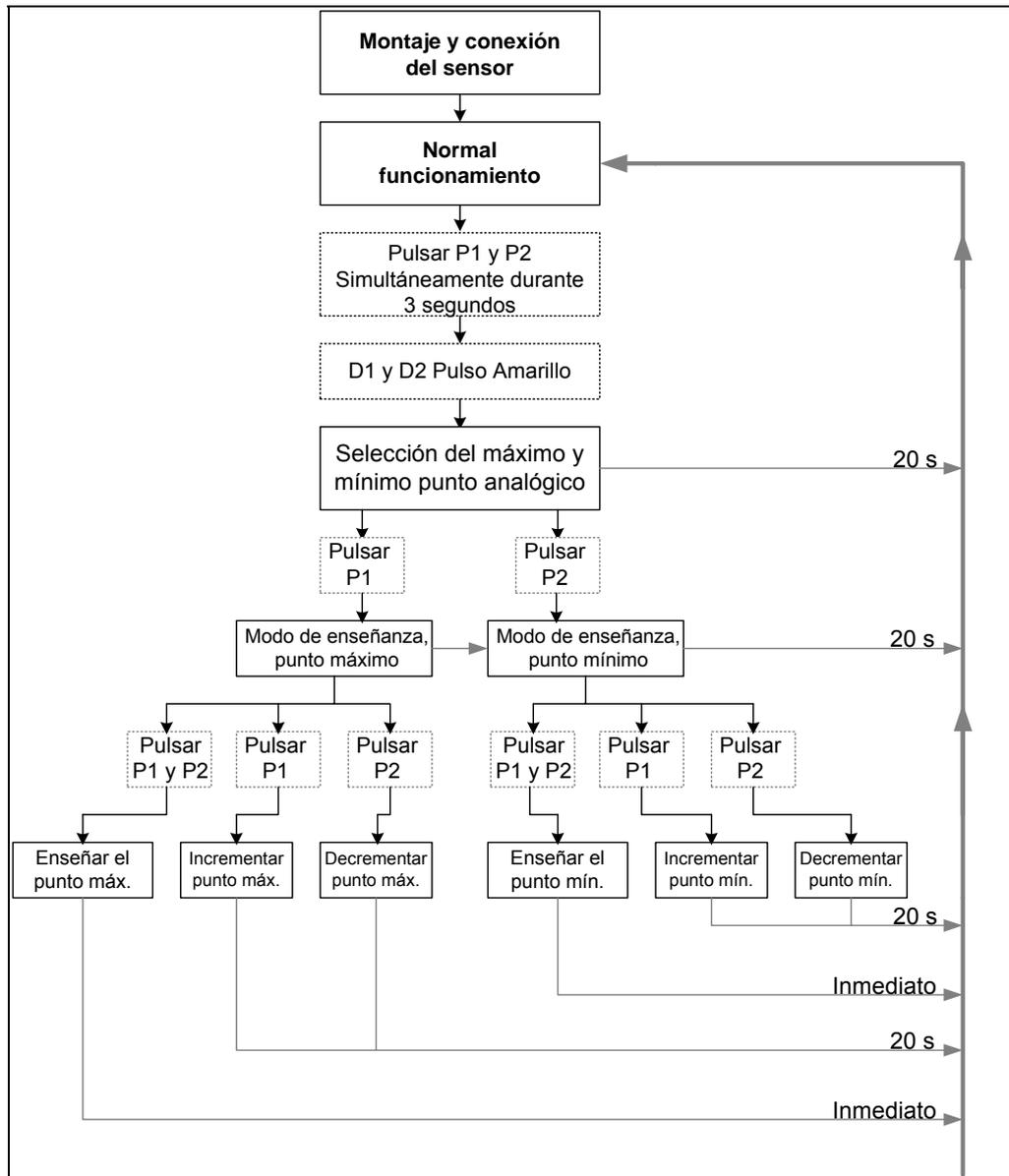


Figura 6.5.2 Bloques de configuración del sensor.

6.6. Programación del microcontrolador para generar PWM

Para el control de velocidad de la bomba DC de 12 V se genera una señal PWM con el microcontrolador PIC16F877A. En el capítulo 7 se muestra el circuito y montaje respectivo. A continuación se describe el código de programa para el PIC.

```
list p=16f877A
```

```
#include <p16f877A.inc>
```

```
.*****
```

```
;Definición de Variables
```

```
.*****
```

```
=====
```

```
;ZONA DE DECLARACIÓN DE SÍMBOLOS Y VARIABLES.
```

```
=====
```

```
=====
```

```
;contadores para demoras.
```

```
cont1      equ    0x20    ;contadores para demora
```

```
cont2      equ    0x21
```

```
cont3      equ    0x22
```

```
;multiplicadores para demora
```

```
N          equ    0x23    ;factores de demora
```

```
M          equ    0x24
```

```
;otras variables
```

```
index      equ    0x25    ;índice de tabla de códigos 7 segmentos de los números.
```

```
temp       equ    0x26    ;variable temporal auxiliar.
```

```
size       equ    0x27    ;tamaño del cartel
```

```
ch_cont    equ    0x28    ;contador de caracteres para cartel
```

```
tecla      equ    0x29    ;contador de teclas
```

```
k_flag     equ    0x2a    ;bandera de tecla pulsada
```

```
dato       equ    0x2b    ;adquiere el dato
```

```
fsr_temp   equ    0x2c    ;respaldo temporal del fsr
```

```
stat_temp  equ    0x2d    ;;variable para respaldar el registro STATUS durante la
```

```
interrupción
```

```
wtemp     equ    0x2e    ;res paldo ac
```

```
rs        equ    4       ;pin ra4
```

```
e         equ    0       ;pin rc0
```

```

;Vectores dentro de la Memoria de Programas (en este caso sólo Vector de Reset)
;porque en este ejemplo no se maneja interrupciones.

```

```

org 0
goto inicio          ;vector de RESET.
org 4
goto IT

```

```

;TABLA DE CARTELES

```

```

tabla
    addwf PCL,1
    retlw 'C'      ;index 0
    retlw 'I'      ;size 10
    retlw 'C'
    retlw 'L'
    retlw 'O'
    retlw '_'
    retlw 'U'
    retlw 'T'
    retlw 'I'
    retlw 'L'
    retlw ':'

```

```

;TABLA DE DECODIFICACIÓN DE BINARIO A ASCII

```

```

ascii
    addwf PCL,1
    retlw'F'
    retlw'E'
    retlw'D'
    retlw'C'
    retlw'B'
    retlw'A'
    retlw'9'
    retlw'8'

```

```

retlw'7'
retlw'6'
retlw'5'
retlw'4'
retlw'3'
retlw'2'
retlw'1'
retlw'0'

```

```

;=====

```

BLOQUE DE CONFIGURACION

```

;=====

```

```

inicio

```

```

;=====

```

```

;Banco 1

```

```

;=====

```

```

;Entrada Salida

```

```

    bsf 3,5 ; banco 1
    bsf 5,0; ra0 entrada conversor
    clrf 8; PortD salida-Bus de Datos
    bcf 5,4; Ra4 salida
    bcf 7,0; Rc0 salida
    bcf 7,2 ;Rc2 salida de PWM
    ;Configurar ADCON1
    movlw b'00001110' ;
    movwf ADCON1
    ;Habilitar INT del A/D
    bsf PIE1,ADIE

```

```

;-----

```

```

;Configurar PR2

```

```

    movlw d'250'
    movwf PR2

```

```

;=====

```

```

;Banco 0

```

```

;=====

```

```

;configurar ADCON0

```

```

    bcf 3,5
    movlw b'10000000'

```

```

movwf ADCON0
; Habilitar el INTCON
movlw b'11000000'
movwf INTCON

;-----
;Configurar el Timer 2
movlw b'00000011'
movwf T2CON
;Configura CCP1CON
movlw b'00001111'
movwf CCP1CON
;condiciones iniciales
clrf dato
;Defino CU Inicial
movlw b'11111111'
movwf CCPR1L

;-----
;inicia el LCD
call ini_lcd; inicial el LCD
;-----

;Cartel de medición
call clrdisp
clrf index ;index = 0
movlw d'10'
movwf size ;size = 10
call write

;-----
clrf TMR0 ;inicia tmr0
bsf T2CON,2 ;enc timer 2
bsf INTCON,7
;habilita INTs
;-----
;=====

```

```
;PROGRAMA PRINCIPAL *****
```

```
;
```

```
again      call convierte
           call visualiza_1
           bsf PORTC,2
           comf dato,0
           movwf CCPR1L
           goto again
```

```
;
```

```
;BLOQUE DE SUBRUTINAS
```

```
;
```

```
convierte      ;adquiere el dato presente en RA0
```

```
    bsf ADCON0,0 ;enciende conversor
    call dem_40us ; carga el Chold-(tiempo de adquisición)
    bsf ADCON0,2 ; GO!
    return
```

```
;
```

```
;SUBRUTINA DE VISUALIZACION_1
```

```
;
```

```
visualiza_1
```

```
;
```

```
;visualizar el valor del canal seleccionado (hex)
```

```
    movf dato,w; dato w
    andlw 0x0f; máscara
    call ascii;convierto a ASCII
    movwf temp ; respaldo
    movlw 0x8C
    call chdir ;direccionn el LCD
    movf temp,w
    movwf 8 ; dato al LCD
    call pulse
    call dem_40us
    ;parte alta
    swapf dato,w
    andlw 0x0f
    call ascii
```

```

movwf temp
movlw 0x8D
call chdir
movf temp,w
movwf 8
call pulse
call dem_40us
return
;=====
; SUBROUTINA DE INTERUPCION
;=====
IT      ;Respalda registros
        movwf wtemp ;respaldo ac
        swapf STATUS,w
        movwf stat_temp
        movf FSR,0
        movwf fsr_temp;respaldo el FSR
;-----
;Encuesta de banderas
        btfss PIR1,ADIF
        goto back_ad
;-----
; Atender al A/D
        movf ADRESH,w
        movwf dato
        bcf ADCON0,0
        goto back_ad
        back_ad
        bcf PIR1,ADIF
        goto back

back
        movf fsr_temp,w
        movwf FSR ;restituye FSR
        swapf stat_temp,w
        movwf STATUS ;restituye STATUS
        swapf wtemp,f
        swapf wtemp,w ;restituye W sin afectar las banderas del STATUS.
;la instrucción "swapf f ", no afecta el contenido del STATUS
retfie

```

```

;=====
;inicia Display de Cristal Líquido
;=====

ini_lcd
    call dem_100ms
    bcf 7,e                ;E = 0 (LCD inhabilitado E = 0)
    bcf 5,rs              ;RS = 0 (Modo de Instrucciones)
                        ;INICIO DE LA SECUENCIA DE RESET DEL CRISTAL

    call dem_5ms         ;demora de power UP
    movlw 0x38
    movwf 8
    call pulse           ;enable
    call dem_40us

;FIN DE SECUENCIA DE RESET DEL CRISTAL

;*****
;
;FUNCTION SET INST
;*****
;
;Modo de transferencia de Datos: 8 bits
;Display en 2 líneas
;Matriz de 5x7 puntos

    movlw 0x38           ;funtion set = 38h
    movwf 8
    call pulse           ;pulso de 1us en "E"
    call dem_40us       ;demora de 40 us

;*****
;
;DISPLAY ON/OFF CONTROL
;*****
;
;display ON
;cursor ON
;cursor parpadea
    movlw b'00001100'
    ;movlw 0x0e         ;display ON/OFF control = 0ch
    movwf 8
    call pulse           ;pulso de 1us en "E"
    call dem_40us

;*****
;

```

```
;ENTRY MODE SET INST
```

```
;*****
```

```
;La posición del cursor se incrementa (direcciones de la DD RAM)
```

```
;No desplazar el Dato
```

```
    movlw 6                ;entry mode set = 6
```

```
    movwf 8
```

```
    call pulse             ;pulso de 1us en "E"
```

```
    call dem_40us
```

```
;*****
```

```
;DISPLAY CLEAR
```

```
;*****
```

```
;limpia la RAM de display y pone el cursor en la posición cero
```

```
    movlw 1                ;display clear = 1
```

```
    movwf 8
```

```
    call pulse             ;pulso de 1us en "E"
```

```
    call dem_1640us
```

```
;*****
```

```
;RAM A LA 80H
```

```
;*****
```

```
;limpia la RAM de display y pone el cursor en la posición cero
```

```
    movlw 0x80             ;display clear = 1
```

```
    movwf 8
```

```
    call pulse             ;pulso de 1us en "E"
```

```
    call dem_40us
```

```
    bsf 5,rs               ;modo datos
```

```
    return
```

```
;=====
```

```
;limpia display
```

```
clrdisp
```

```
    bcf 5,rs
```

```
    movlw 1                ;display clear = 1
```

```
    movwf 8
```

```
    call pulse             ;pulso de 1us en "E"
```

```
    call dem_1640us
```

```
    bsf 5,rs               ;modo datos
```

```
    return
```

```
;=====
```

;habilita display (da un pulso en el pin enable)

pulse

```

    bcf 7,e
    bsf 7,e           ;E = 1
    nop
    nop
    nop
    nop           ;demora de 1 us
    bcf 7,e           ;E = 0
    return

```

;cambia de dirección en el display

;requisitos: cargar previamente la dirección en WREG

;ej: movlw 0xc2 ;dir a donde se desea cambiar.

;call chdir

chdir

```

    bcf 5,rs           ;modo comandos
    movwf 8           ;la dirección viene en el acumulador
    call pulse
    call dem_40us
    bsf 5,rs
    return

```

;escribe cualquier cartel en el LCD por el método de indexado de TABLA

;antes de llamarla deben cargarse las variables "index" y "size"

write

```

    clrf ch_cont           ;contador de caracteres del
    ;clrf PCLATH           ;cartel que se está sacando

```

next_char

```

    movf index,w           ;indexo
    call tabla           ;tabla de caracteres del cartel
    movwf 8           ;saco caracter
    call pulse           ;pulso enable
    call dem_40us           ;demora de ejecución
    movf ch_cont,w
    subwf size,w           ;resta ch_cont del size
    btfsc 3,2
    return           ;RETORNA, se escribió completo

```

;próximo caracter del cartel

incf index

incf ch_cont

goto next_char

;DEMORA DE 5.32 ms

dem_5ms

movlw d'60'

movwf N

;parámetro a cargar en contadores

movlw d'5'

movwf M

;parámetro a cargar en contadores

call demora

;demora de 47us

return

;DEMORA DE 100ms

dem_100ms

movlw d'97'

movwf N

;parámetro a cargar en contadores

movlw d'14'

movwf M

;parámetro a cargar en contadores

call demora

;demora de 47us

return

*;DEMORA DE 47US**

dem_40us

movlw d'8'

movwf N

;parámetro a cargar en contadores

movlw d'1'

movwf M

;parámetro a cargar en contadores

call demora

;demora de 47us

return

;DEMORA DE 1.64ms (1640 US)

dem_1640us movlw d'46'

movwf N

;parámetro a cargar en contadores

```

        movlw d'1'
        movwf M                                ;parámetro a cargar en contadores
        call demora                            ;demora de 47us
        return

;-----
;DEMORA DE 1s aprox
;-----
dem_1s    movlw d'80'
          movwf N                                ;parámetro a cargar en contadores
          movlw d'128'
          movwf M                                ;parámetro a cargar en contadores
          call demora                            ;demora de 47us
          return

;-----
;subrutina de DEMORA paramétrica general
;-----
demora
          ;return
          movf N,w
          movwf cont1
          movwf cont2
          movf M,w
          movwf cont3

loop
          decfsz cont1
          goto loop
          movf N,w
          movwf cont1
          decfsz cont2
          goto loop
          movf N,w
          movwf cont2
          decfsz cont3
          goto loop
          ;fin del proceso, inicia contadores
          return

end

```

CAPITULO 7

Montaje

El montaje esta referido a la construcción y posición física de los instrumentos utilizados en el sistema de control. Es necesario definir con exactitud las dimensiones, materiales y estructura para identificar cada bloque del sistema.

7.1. Diseño del circuito de control para la bomba

Para el elemento final de control, una bomba de agua, se diseñó un sistema de control de potencia. El mismo que esta basado en PWM (Pulso de onda modulada). La señal entregada por el módulo **EM 235** es una señal de (0 a 10V), la cual fue reducida a una de (0 a 5V) mediante un partidor de tensión formado por la resistencia R1 y R3 especificado en la figura 7.1.1. Esta tensión ya puede ser usada como señal de entrada para el PIC 16f877A.

La programación del PIC esta especificada en el capitulo 6.5. Y la alimentación del mismo se muestra en la figura 7.1.1. Para el proyecto se utilizó el “kit” de entrenamiento desarrollado en la Universidad, como lo muestra la figura 7.1.2, para evitar la construcción de una placa adicional.

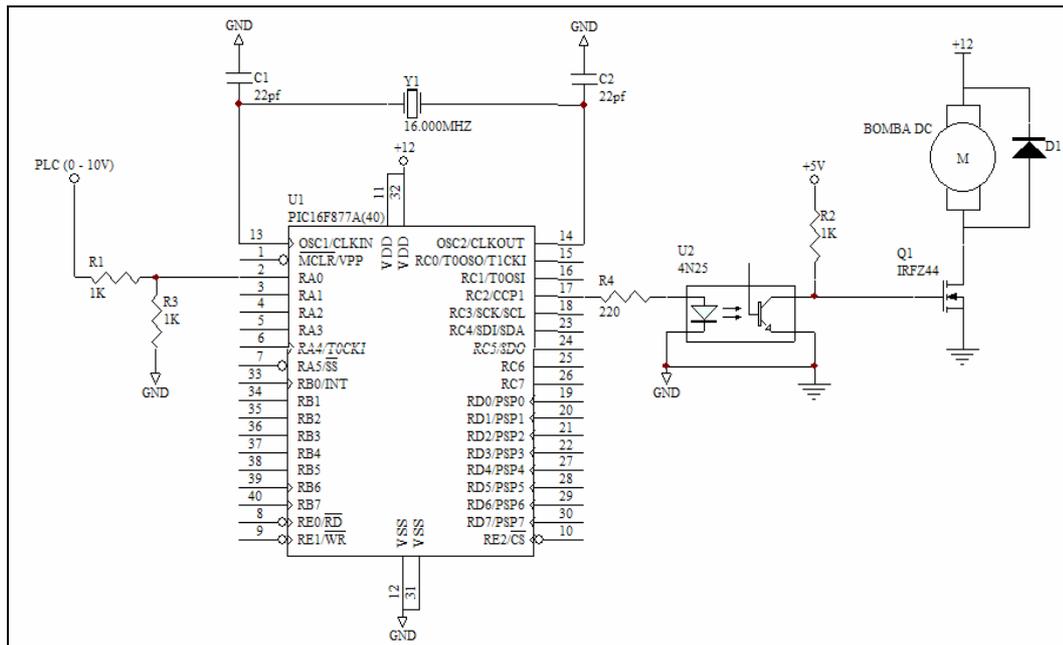


Figura 7.1.1 Diseño del circuito de control para la bomba.

La señal PWM generada por el PIC, conmuta al mosfet IRFZ44, mediante un optoacoplador 4N25, como se muestra en la figura 7.1.1. Esto permite manejar una tensión de 12 voltios y además una intensidad de 10 A, como lo especifica los datos de la bomba, figura 7.1.4. La placa de potencia terminada se muestra en la figura 7.1.3

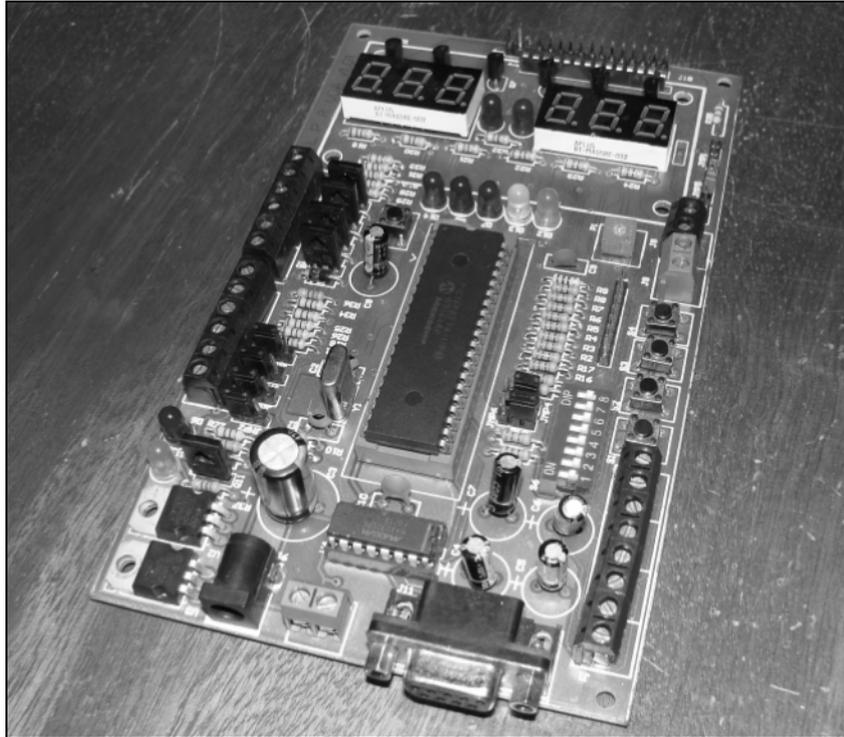


Figura 7.1.2 “Kit” de entrenamiento desarrollado en la (UDA)

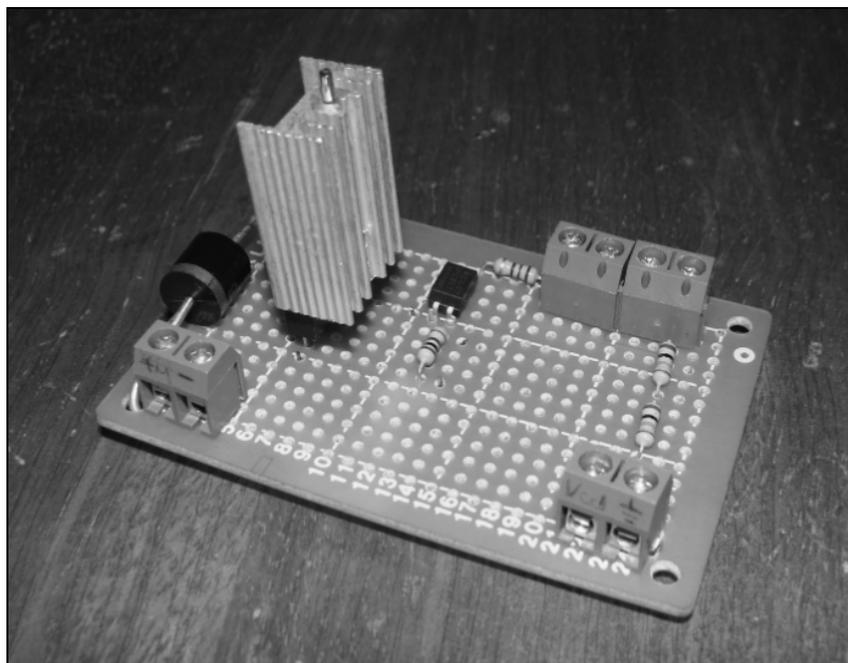


Figura 7.1.3 Placa de control de potencia terminada



Figura 7.1.4 Bomba de agua, elemento final de control

7.2. Montaje de los tanques

Para el montaje del sistema se comenzó con la numeración de los dos tanques: el primero (1) para el cual se realiza el control diseñado y el segundo (2) que será la fuente de alimentación de líquido como se muestra en la figura 7.2.1. Los dos se encuentran conectados lo que provoca que el agua se recicle.

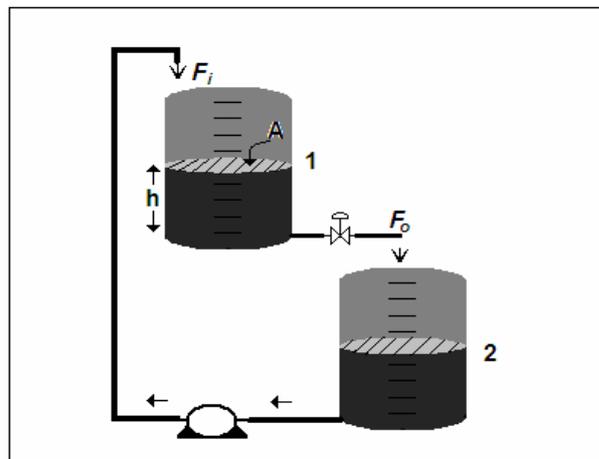


Figura 7.2.1 Definición del Tanque (1) y (2) del sistema

Para realizar el montaje del sensor sobre el tanque (1) se construyó un puente sobre el mismo, este permitirá colocar el sensor según las especificaciones de catálogo. El sensor debe situarse a $1/3$ del diámetro y a 25 cm. del punto máximo como lo muestra la figura 7.2.2 a continuación.



Figura 7.2.2 Posición del sensor en el puente

El líquido dentro del tanque (1) se muestra mediante un tubo transparente conectado al mismo, basado en vasos comunicantes, la figura 7.2.3 muestra el ensamble final.



Figura 7.2.3 Visualización del nivel de líquido para el tanque (1)

La salida de agua del tanque (1) está controlada por una válvula de paso de $\frac{3}{4}$ de pulgada. Esta termina en la parte superior del tanque (2). La bomba se alimenta de éste mediante una salida de $\frac{1}{2}$ pulgada cerrando así el ciclo de agua en el sistema como se muestra en la figura 7.2.4 a continuación.



Figura 7.2.4 Sistema terminado de tanques.

CAPITULO 8

Resultados prácticos

En este capítulo se pone a prueba todo el conocimiento teórico frente a los resultados prácticos, para esto se ha dispuesto realizar varias pruebas al sistema para contrastar los resultados, los mismos que determinaran las conclusiones mediante un estudio.

8.1. Pruebas y análisis

Para el análisis del sistema se realizan varias pruebas, básicamente cambiando los valores de la tabla mostrada en el subcapítulo 6.3 y variando el caudal de salida del tanque (1).

En primera instancia se ingresaron los datos obtenidos del modelado y análisis del sistema como lo muestra la siguiente tabla.

Kc	9.6
Ti	0.24
Td	0
SP	0.25

Los resultados para estos valores no fueron los mejores, cuando se procedió a llenar el tanque desde un valor inferior al setpoint, el valor del nivel de agua se pasó 3 mm de acuerdo al valor de consigna. Luego se procedió a llenar más el tanque y se regresó al setpoint original, el nivel resultante se pasó 9mm por debajo. Al final el nivel resultante se estabilizó en 10 min.

En la siguiente prueba se disminuyó el valor de la ganancia proporcional y se aumentó el tiempo de integración con el mismo valor de consigna.

Kc	8
Ti	5
Td	0
SP	0.25

De igual manera se llenó el tanque desde un valor inferior al setpoint y el nivel resultante se pasó 2mm. Se realizó la misma prueba de llenar el tanque a un mayor nivel y regresar al setpoint original y el nivel resultante no tuvo errores. El nivel resultante se estabilizó en 8 min.

Luego de realizar varios cambios en las constantes del controlador se obtuvo unos mejores resultados para las constantes, a continuación se muestra en la tabla.

Kc	10
Ti	2.5
Td	0
SP	0.25

Con estos valores se obtuvo menor error y el tiempo de estabilización fue menor.

A continuación se varió el caudal de salida y el controlador respondió con mayor tiempo de estabilización.

En una de las pruebas realizadas se escogió un tiempo de integración muy pequeño y el sistema se volvió oscilante.

Conclusiones

Mediante el asistente de operaciones S7-200 (PID), integrado al programador STEP 7 – Micro/Win 32, se puede realizar la programación de un controlador PID de manera sencilla y con un ambiente amigable para el programador. El programador funciona a manera de un sistema “SCADA” mientras esta corriendo. Puesto que, se puede interactuar en tiempo real con el sistema.

La bomba de agua, como elemento final de control, presento inexactitud al momento del arranque. Puesto que, la señal enviada por el controlador no era suficiente para vencer la inercia. Esto provocó que en el momento que el SP “Setpoint” era menor al nivel de agua tome un tiempo para el arranque.

El término fundamental dentro de un controlador PID es el proporcional P. Este origina una actuación correctiva proporcional al error. El termino integral I origina una corrección proporcional a la integral del error, Esto implica la reducción del error de regulación a cero. Por otro lado, el efecto integrador puede desestabilizar el controlador. El termino derivativo D genera una acción de control proporcional a la velocidad de cambio del error. Esto provoca mayor estabilidad al sistema.

Los resultados que se obtuvieron determinan que un sistema lazo abierto no tiene inestabilidad, mientras que el sistema lazo cerrado presento mucha inestabilidad para ciertos valores de ganancia y tiempo de integración.

Recomendaciones

Para mejorar el rendimiento y disminuir el error del sistema, se debe utilizar una bomba de agua de mayor potencia y caudal. Además, el caudal de salida (apertura de la válvula de salida) no debe realizar cambios bruscos. Es decir, el caudal de salida no debe ser mayor a la máxima potencia de la bomba (caudal de entrada).

Realizar varias pruebas para sintonizar de mejor manera los valores de las constantes del controlador PID, ya que, estos valores varían según las dimensiones del tanque utilizado y el comportamiento de la bomba.

En este trabajo no se pudo utilizar un elemento de control final (electroválvula diferencial), es por eso que se utilizó un controlador PWM para el funcionamiento de la bomba, se recomienda utilizar un microcontrolador de mayor resolución para que no se pierda datos para el PWM. Se debe considerar, de igual manera, la potencia consumida por la bomba y utilizar el mejor transistor para su rendimiento.

Debido a la gran resolución del sensor ultrasónico, se debe tener en cuenta que, el sensor debe estar sujeto firmemente y el líquido estar completamente estático para su correcta calibración.

Bibliografía

Referencias bibliográficas:

- DOUGLAS J. Cooper, USER GUIDE CONTROL STATION 3.7, 2004
- KUO Benjamin C. SISTEMAS DE CONTROL AUTOMÁTICO, México, Prentice – Hall, 1996, 7ma. Edición
- OGATA Katsuhiko, INGENIERIA DE CONTROL MODERNO, México, Prentice – Hall, 1998, 3ra. Edición
- SICK AG, Manual de sensor ultrasónico D30, Alemania, 2003
- SIEMENS AG, Manual del sistema simatic S7-200, 2000
- UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES (UBA), Curso de control y automatización, Argentina, 2008

Referencias electrónicas:

- CISTERNA O. Marcos, SAEZ Doris, GONZALEZ Humberto, Tutorial Instalación y Programación en PLC S7-200, Chile
http://www.infopl.net/Descargas/Descargas_Siemens/Des_SiemensFiles/infoPLC_net_s7_200_tutorial_plc.html
- CONTRERAS Juan A. INTRODUCCION A LA IMPLEMENTACION DE CONTROLADORES PID ANALOGOS, Colombia, 2006
http://www.automatas.org/hardware/teoria_pid.htm

- HERRERA Z. Leandro, DINAMICA Y CONTROL DE PROCESOS, Chile, 2009
<http://www.ing.uchile.cl/~leherrer/IQ57A/apunte57.htm>
- LOIOLA Iban, AUTOMATAS PROGRAMABLES, España, 2001
<http://www.sc.ehu.es/sbweb/webcentro/automatica/WebCQMH1/PAGINA%20PRINCIPAL/PLC/plc.htm>
- MIRANDA José F. APLICACIÓN DE LOS ALGORITMOS PID A UN PLC, Costa Rica, 2004
<http://www.eie.ucr.ac.cr/uploads/file/proybach/pb0434t.pdf>
- SALESIANOS, AUTOMATAS S7200, España, 2009
<http://www.salesianos.edu/alcoy.juanxxiii/dpts/docs/automatas.pdf>
- UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA, SENSORES, México, 2009
<http://proton.ucting.udg.mx/dpto/tesis/quetzal/TES35-01.html>